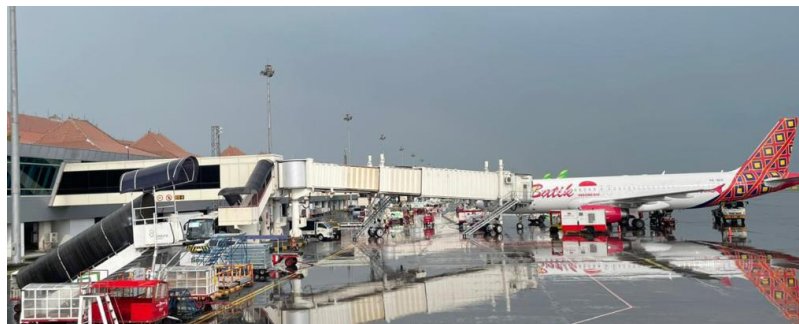


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Konsep Garbarata (*Passenger Boarding Bridge*)

Garbarata atau *Passenger Boarding Bridge* (PBB) merupakan struktur jembatan bergerak yang menghubungkan pintu keluar terminal bandar udara dengan pintu masuk pesawat. Fasilitas ini dirancang untuk memberikan akses yang nyaman, aman, dan terlindung bagi penumpang saat proses *boarding* maupun *deboarding* tanpa harus melalui area *apron* secara langsung. Garbarata sebagai sistem jembatan bergerak yang dilengkapi mekanisme teleskopik dan rotasi untuk menyesuaikan posisi dengan berbagai tipe pesawat Ghafur dkk. (2025). Dalam operasional bandara, garbarata berperan penting dalam meningkatkan efisiensi *turnaround* pesawat sekaligus memberikan kenyamanan bagi penumpang, khususnya saat kondisi cuaca ekstrem.



Gambar II. 1 Garbarata Bandar Udara Juanda
(Sumber: Bandar Udara Internasional Juanda Surabaya, 2026)

Garbarata merupakan salah satu fasilitas utama dalam operasional bandar udara yang berfungsi sebagai penghubung antara terminal penumpang dengan pesawat udara. Secara konseptual, garbarata adalah lorong tertutup yang menghubungkan langsung pintu pesawat dengan gedung terminal sehingga memungkinkan penumpang untuk melakukan proses naik dan turun pesawat tanpa harus melalui area terbuka (Fahmi & Fauziah, 2024).

Dalam operasional bandar udara, garbarata tidak dapat dipandang sebagai fasilitas pasif. Peralatan ini bekerja melalui gabungan sistem mekanik, kelistrikan, kontrol, dan pengawasan operator. Penggunaannya juga berada

dalam kendali personel *Apron Movement Control* karena berkaitan langsung dengan aktivitas di area apron(Kurniasari dkk., 2022)

Keberadaan garbarata memberikan kemudahan dalam proses *boarding* dan *deboarding* karena mampu menciptakan jalur perpindahan penumpang yang lebih praktis dan efisien. Selain itu, penggunaan garbarata juga dapat mengurangi ketergantungan terhadap tangga manual maupun kendaraan pengangkut penumpang, sehingga aktivitas operasional di apron menjadi lebih tertata. Kondisi ini menunjukkan bahwa garbarata tidak hanya berfungsi sebagai fasilitas fisik, tetapi juga berperan dalam meningkatkan efisiensi operasional bandar udara (Artika & Yudianto, 2025).

Dari sisi pelayanan, garbarata memiliki kontribusi yang cukup besar terhadap kenyamanan dan keselamatan penumpang. Dengan adanya fasilitas ini, penumpang tidak perlu lagi terpapar langsung oleh kondisi cuaca seperti hujan atau panas yang berlebihan saat berpindah dari terminal ke pesawat. Selain itu, penggunaan garbarata juga memberikan rasa aman yang lebih tinggi, terutama bagi penumpang dengan keterbatasan fisik, karena akses yang diberikan lebih stabil dan terkontrol (Fahmi & Fauziah, 2024).

Lebih lanjut, kondisi dan kualitas garbarata menjadi faktor penting yang mempengaruhi kualitas layanan secara keseluruhan. Fasilitas yang tidak terawat atau mengalami gangguan teknis dapat berdampak langsung pada kenyamanan penumpang serta kelancaran operasional penerbangan. Hal ini menunjukkan bahwa keberadaan sistem pemeliharaan yang baik sangat diperlukan untuk menjaga performa garbarata agar tetap optimal dalam mendukung aktivitas di bandar udara (Artika & Yudianto, 2025).

Komponen utama garbarata terdiri atas beberapa subsistem yang bekerja secara terintegrasi. Sistem mekanik mencakup struktur teleskopik yang dapat memanjang dan memendek sesuai kebutuhan, sementara sistem motor penggerak menggunakan motor listrik untuk menggerakkan roda serta mengatur ketinggian dan sudut kemiringan jembatan. Sistem kontrol garbarata terdiri atas panel kendali dan sensor posisi yang memungkinkan operator mengoperasikan peralatan secara manual maupun semi-otomatis. Prinsip kerja

pergerakan garbarata didasarkan pada kombinasi gerak translasi horizontal untuk penyesuaian jarak, gerak rotasi untuk penyesuaian sudut, serta gerak vertikal untuk penyesuaian ketinggian terhadap ambang pintu pesawat.

B. *Monitoring*

Sistem *monitoring* merupakan suatu mekanisme yang digunakan untuk mengamati, mengukur, dan mengevaluasi kondisi suatu sistem atau peralatan secara berkelanjutan. Dalam konteks operasional, *monitoring* memiliki peran penting karena memungkinkan pengelola untuk mengetahui kondisi aktual dari suatu perangkat, sehingga dapat dilakukan tindakan yang tepat ketika terjadi penyimpangan atau gangguan. *Monitoring* tidak hanya berfungsi sebagai alat pengawasan, tetapi juga sebagai dasar dalam pengambilan keputusan yang berkaitan dengan kinerja dan pemeliharaan peralatan (Sari dkk., 2024).

Dalam praktiknya, sistem *monitoring* dapat dibedakan menjadi dua pendekatan utama, yaitu *monitoring* secara manual dan *monitoring* berbasis sistem digital. *Monitoring* manual umumnya dilakukan melalui pencatatan langsung oleh operator di lapangan. Metode ini memiliki keterbatasan karena bergantung pada kehadiran manusia, rentan terhadap kesalahan pencatatan, serta tidak mampu memberikan data secara real time. Hal ini menyebabkan informasi yang diperoleh seringkali terlambat dan kurang akurat untuk digunakan dalam pengambilan keputusan operasional (Zuhair et al., 2025).

Pada peralatan seperti garbarata, *monitoring* menjadi penting karena alat bekerja secara berulang mengikuti aktivitas penerbangan. Jika pemantauan hanya dilakukan secara manual, data yang diperoleh cenderung terbatas pada saat teknisi melakukan pemeriksaan. Kurniasari dkk. menunjukkan bahwa *monitoring* dan *maintenance* pada panel *aviobridge* masih banyak dilakukan dari panel ke panel. Teknisi biasanya baru menuju lokasi setelah ada laporan gangguan dari operator atau AMC, terutama ketika muncul masalah tegangan tidak stabil atau low voltage (Kurniasari dkk., 2022).

Sebaliknya, sistem *monitoring* berbasis digital menawarkan keunggulan dalam hal efisiensi dan akurasi data. Dengan memanfaatkan teknologi, data dapat dikumpulkan secara otomatis melalui sensor dan dikirimkan secara langsung

ke sistem pemantauan. Proses ini memungkinkan pengguna untuk mengakses informasi kondisi peralatan secara *real time* tanpa harus berada di lokasi secara langsung. Selain itu, sistem digital juga mampu menyimpan data historis yang dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut dalam mendukung pengelolaan peralatan (Tama & Winardi, 2022).

Penggunaan sistem monitoring berbasis teknologi juga memberikan dampak signifikan terhadap peningkatan efektivitas operasional. Dengan adanya data yang diperoleh secara kontinu, potensi terjadinya kerusakan dapat dideteksi lebih awal sehingga tindakan pencegahan dapat segera dilakukan. Hal ini sangat penting dalam lingkungan operasional yang membutuhkan tingkat keandalan tinggi, karena keterlambatan dalam mendeteksi gangguan dapat menyebabkan penurunan kinerja bahkan kerusakan yang lebih besar pada peralatan (Romansdani dkk., 2024).

Lebih lanjut, perkembangan teknologi telah mendorong integrasi sistem *monitoring* dengan jaringan internet, sehingga memungkinkan proses pemantauan dilakukan secara jarak jauh. Sistem seperti ini tidak hanya meningkatkan kemudahan akses, tetapi juga mempercepat proses penyampaian informasi kepada pengguna. Dengan demikian, monitoring tidak lagi bersifat pasif, melainkan menjadi sistem aktif yang mampu memberikan informasi secara cepat dan akurat untuk mendukung operasional yang lebih optimal (Simanjuntak, 2026).

C. *Internet of Things (IoT)*

Internet of Things atau IoT merupakan konsep yang memungkinkan perangkat fisik terhubung ke jaringan internet untuk membaca, mengirim, menerima, dan mengolah data. Dalam sistem monitoring, IoT berperan sebagai penghubung antara kondisi lapangan dengan pengguna. Data yang sebelumnya harus dibaca langsung pada alat dapat dikirim ke tampilan digital, sehingga proses pemantauan menjadi lebih cepat dan terdokumentasi. IoT melibatkan penggunaan sensor dan perangkat lunak pada suatu objek agar objek tersebut dapat berkomunikasi, dikendalikan, terhubung, dan bertukar data dengan perangkat lain melalui internet (Haryanto dkk., 2024).

IoT merupakan konsep yang mengacu pada kemampuan berbagai perangkat untuk saling terhubung dan berkomunikasi melalui jaringan internet tanpa memerlukan interaksi manusia secara langsung. Dalam sistem ini, perangkat dilengkapi dengan sensor dan modul komunikasi yang memungkinkan pengumpulan serta pertukaran data secara otomatis. Dengan demikian, IoT tidak hanya berfungsi sebagai media konektivitas, tetapi juga sebagai sistem yang mampu mengolah dan menyampaikan informasi secara berkelanjutan (Tama & Winardi, 2022).



Gambar II. 2 Konsep IoT
(Sumber Global Sign)

Dalam implementasinya, IoT terdiri dari beberapa komponen utama yang saling terintegrasi, yaitu sensor sebagai alat pengumpul data, mikrokontroler sebagai pengolah data, serta jaringan internet sebagai media transmisi. Sensor berperan dalam membaca kondisi fisik seperti arus listrik, suhu, atau tegangan, kemudian data tersebut diproses oleh mikrokontroler sebelum dikirimkan ke *platform monitoring*. Proses ini memungkinkan pengguna untuk memperoleh informasi kondisi sistem secara real time melalui perangkat seperti smartphone atau komputer (Sari dkk., 2024).

Pemanfaatan IoT dalam sistem monitoring memberikan berbagai keunggulan dibandingkan metode konvensional. Salah satu keunggulan utamanya adalah kemampuan untuk melakukan pemantauan secara jarak jauh tanpa harus berada di lokasi peralatan. Selain itu, sistem ini juga mampu menyajikan data secara kontinu dan terstruktur sehingga memudahkan proses analisis. Dengan adanya

data yang tersimpan secara sistematis, pengguna dapat melakukan evaluasi terhadap kinerja peralatan serta mengidentifikasi potensi gangguan yang mungkin terjadi (Simanjuntak, 2026)

Lebih lanjut, penggunaan IoT dalam *monitoring* peralatan terbukti mampu meningkatkan efektivitas dalam pengelolaan sistem operasional. Data yang dikumpulkan secara otomatis dapat digunakan sebagai dasar dalam menentukan tindakan perawatan, sehingga proses pemeliharaan tidak lagi bersifat reaktif melainkan lebih terencana. Dalam konteks ini, IoT menjadi salah satu teknologi yang mendukung penerapan konsep perawatan berbasis data, di mana keputusan diambil berdasarkan informasi yang akurat dan aktual (Pratama dkk., 2025)

Selain itu, IoT juga memungkinkan integrasi antara berbagai perangkat dalam satu sistem yang terpusat. Hal ini memberikan kemudahan dalam pengawasan karena seluruh data dapat diakses melalui satu *platform* yang sama. Kemampuan ini sangat penting dalam lingkungan operasional yang kompleks, di mana banyak peralatan harus dipantau secara bersamaan. Dengan adanya integrasi tersebut, proses *monitoring* menjadi lebih efisien dan mampu memberikan respons yang lebih cepat terhadap perubahan kondisi sistem (Mangunsong dkk., 2025).

ESP32 menjadi komponen penting dalam sistem IoT karena memiliki kemampuan komunikasi nirkabel. Wenno dkk. menjelaskan bahwa ESP32 mendukung koneksi WiFi dan Bluetooth, memiliki konsumsi daya rendah, serta dapat digunakan untuk pengendalian dan pemantauan jarak jauh Wenno dkk. (2025). Dalam prototype *monitoring* garbarata, ESP32 digunakan untuk menerima data dari sensor, mengolah status penggunaan, menghitung durasi, dan mengirimkan informasi ke tampilan lokal maupun jarak jauh. Dengan demikian, ESP32 menjadi penghubung antara rangkaian elektronik dan sistem informasi *monitoring*.

IoT juga memungkinkan sistem memiliki dua bentuk tampilan. Putra dkk. menggunakan ESP32 untuk mengirimkan data ke website sekaligus menampilkannya melalui LCD 20x4 I2C Putra dkk. (2025). Konsep ini relevan

dengan penelitian ini karena teknisi di lokasi tetap membutuhkan tampilan langsung, sementara data yang sama dapat dipantau melalui *dashboard*. Dengan dua jalur tampilan tersebut, sistem menjadi lebih fleksibel dan tidak sepenuhnya bergantung pada satu media akses.

Dalam konteks *preventive maintenance*, IoT memiliki nilai penting karena data yang dikumpulkan dapat digunakan sebagai dasar evaluasi. Apriliya dkk. menunjukkan bahwa sistem *monitoring* berbasis IoT dapat membaca berbagai parameter mesin, termasuk tegangan, arus, getaran, temperatur, dan jam operasional, lalu menampilkannya melalui *web dashboard* untuk mendukung *maintenance* berbasis data Apriliya dkk., (2025). Prinsip tersebut sejalan dengan penelitian ini, karena data jam penggunaan dan parameter listrik garbarata dapat menjadi dasar awal untuk menentukan prioritas pemeriksaan.

D. Biaya Tarif Penggunaan Garbarata

Pelayanan Jasa Pemakaian Garbarata (*Aviobridge*) adalah pelayanan jasa yang diberikan Perusahaan kepada setiap Badan Usaha Angkutan Udara dan/atau Perusahaan Angkutan Udara Asing sehubungan pemakaian fasilitas Bandar Udara berupa Garbarata (*Aviobridge*) pada saat keberangkatan atau kedatangan penumpang. Penagihan Pelayanan Jasa Pemakaian Garbarata (*Aviobridge*) dibagi dalam tiga pelayanan, yaitu untuk penerbangan dalam negeri, penerbangan luar negeri, dan penerbangan campuran (*Mix Flight*) Keputusan Direksi PT Angkasa Pura I (Persero) Nomor : KEP.DU.24/KB.02.01.01/2021

Menurut KEP.DU 13 Tahun 2021 Pedoman Pelayanan Jasa Pendaratan, Penempatan dan Penyimpanan Pesawat Udara (PJP4U) mencakup Pelayanan Jasa Pendaratan yaitu pelayanan jasa yang diberikan terhadap pesawat udara yang mendarat di Bandar Udara, Pelayanan Jasa Penempatan yaitu pelayanan jasa yang diberikan untuk penempatan pesawat udara di tempat terbuka di Bandar Udara, Pelayanan Jasa Penyimpanan yaitu pelayanan jasa yang diberikan terhadap penyimpanan pesawat udara dalam hanggar tanpa melakukan aktivitas perawatan Pesawat Udara

Tarif jasa pemakaian garbarata (*Aviobridge*) merupakan besaran biaya yang dibayarkan oleh badan usaha angkutan udara yang menggunakan garbarata

kepada penyedia jasa. Menurut PM 36 Tahun 2014 perhitungan tarif garbarata dihitung sejak garbarata dipasang (*docking*) pada badan pesawat hingga dilepas kembali (*undocking*) (Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 36 Tahun 2014 tentang Tata Cara dan Prosedur Pengenaan Tarif Jasa Kebandarudaraan, 2014). Perhitungan waktu penggunaan dalam satuan dua jam pertama, dan apabila penggunaan garbarata lebih dari dua jam tersebut, maka akan dikenakan biaya tambahan berdasarkan kelipatan satu jam sesuai waktu *block off* yang terdapat dalam dokumen *Apron Movement Control (AMC) sheet* yang dicatat oleh *Airport Operation*. Ketentuan ini menunjukkan bahwa durasi penggunaan ini merupakan salah satu variabel utama dalam menentukan besarnya tarif yang dikenakan.

Selain durasi, perhitungan biaya juga dapat dikaitkan dengan data energi. Suwarno menunjukkan bahwa energy meter berbasis ESP32 dan PZEM 004T dapat menampilkan tegangan, arus, power factor, daya, energi, frekuensi, serta lama waktu ON Suwarno. (2025). Informasi lama waktu ON relevan dengan penelitian ini karena jam penggunaan menjadi dasar utama perhitungan. Sementara itu, data daya dan energi dapat membantu memberi gambaran mengenai konsumsi listrik selama garbarata digunakan.

Prinsip estimasi biaya berbasis energi juga terlihat pada penelitian Susanto dkk. yang menggunakan data energi dari sensor PZEM 004T untuk menampilkan estimasi biaya listrik. Biaya dihitung dari energi listrik dalam kWh yang dikalikan dengan nilai tarif tertentu Susanto dkk. (2025). Pola ini dapat diadaptasi pada *prototype monitoring* garbarata, dengan catatan bahwa nilai tarif yang digunakan bersifat input sistem dan dapat disesuaikan dengan ketentuan pengelola.

Pembebasan Tarif PJP4U dan Aviobridge dapat diberikan untuk penerbangan dengan ketentuan seperti Pesawat udara Negara Republik Indonesia yang melakukan penerbangan Non Komersial, Pesawat udara yang khusus dipergunakan oleh tamu negara, kepala negara atau kepala pemerintah beserta rombongannya dalam kunjungan resmi kenegaraan di Indonesia, Pesawat Udara yang dipergunakan untuk keperluan pencarian/ *Search And Rescue*

(SAR), Pesawat udara milik Kementerian Perhubungan atau TNI/ Kepolisian Republik Indonesia yang digunakan untuk pendidikan awak kokpit pesawat udara atau kegiatan lainnya yang berkaitan dengan pembinaan keselamatan penerbangan dan/ atau kegiatan kalibrasi, Pesawat udara militer asing yang telah mendapat izin dari Pemerintah Republik Indonesia, dan Pesawat udara yang memiliki Keperluan misi kemanusiaan yang pelaksanaannya dapat didelegasikan melalui surat Direktur Utama Kepada *General Manager*.

Pemakaian garbarata lebih dari dua jam dikenakan tarif pelayanan jasa pemakaian garbarata per dua jam pertama. Pemakaian garbarata dua jam dikenakan tarif pelayanan jasa pemakaian garbarata dengan kelipatan satu jam berikutnya sebesar 50% dari tarif pelayanan jasa pemakaian garbarata. Selain berdasarkan waktu, salah satu variabel ukuran tarif juga dihitung berdasarkan berat pesawat udara dalam satuan ton yang mengacu pada *Maximum Take Off Weight* (MTOW) untuk mengetahui kapasitas dan beban operasional pesawat sehingga sesuai dengan jenis pesawat. Pengenaan tarif PJP4U baik untuk penerbangan dalam negeri (domestik) dan penerbangan luar negeri (internasional) keduanya dikenakan atas MTOW pesawat udara.

a. Perhitungan Tarif Pelayanan Jasa Pemakaian Garbarata (Aviobridge)
Penerbangan Dalam Negeri

Tagihan garbarata = perhitungan *docking* + perhitungan *undocking*

Perhitungan Docking /Undocking = MTOW + Tarif 2 jam Pertama

Tarif Tambahan (surcharge)

= MTOW × 50% Tarif 2 jam pertama × Durasi jam

b. Perhitungan Tarif Pelayanan Jasa Pemakaian Garbarata (Aviobridge)
Penerbangan Luar Negeri

Tagihan garbarata = perhitungan *docking* + perhitungan Undocking

Perhitungan Docking/ Undocking = MTOW + Tarif 2 jam Pertama × Kurs IDR

Tarif Tambahan (surcharge)

= MTOW × 50% Tarif 2 jam pertama × Kurs IDR × Durasi jam

c. Tarif PJP4U

D/I	TARIF PENDARATAN				TARIF PENEMPATAN	TARIF PENYIMPANAN	TARIF PARKING SURCHARGE
	TAHAP I BERAT 0 s.d 20.000 kg	TAHAP II BERAT > 20.000 kg s.d 40.000 kg	TAHAP III BERAT > 40.000 kg s.d 100.000 kg	TAHAP IV BERAT > 100.000 kg			
DOMESTIK	RP 5.449	RP 6.420	RP 7.062	RP 7.768	RP 1.463		RP 351
INTERNASIONAL	\$ 4,71	\$ 4,82	\$ 5,79	\$ 6,95	\$ 0,55		\$ 0,55

Gambar II. 3. Tarif PJP4U Bandar Udara Juanda
(Sumber: KEP.DU 13 Tahun 2021)

d. Tarif Aviobridge

Tabel II. 1. Tarif Garbarata KEP.DU 13 Tahun 2021

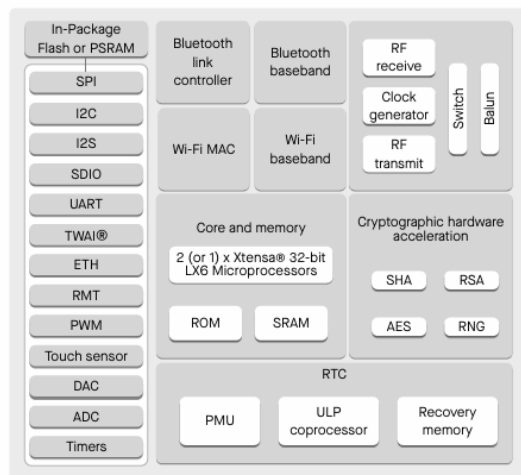
BANDARA	Tarif Garbarata / 2 Jam Pertama	Tarif Setelah 2 Jam Pertama
JUANDA SURABAYA	Rp. 4.429 / ton/ sekali pemakaian (Docking dan atau Undocking)	Tarif tambahan (surcharges) garbarata sebesar 50% dari tarif normal dengan kelipatan per 1 (1) jam

Tabel II. 2 Tarif Garbarata berdasarkan MTOW KEP.DU 13 Tahun 2021

Tarif Garbarata / 2 Jam Pertama Berdasarkan Kelompok MTOW Pesawat				Tarif Setelah 2 Jam Pertama
s.d 100.000 kg	> 100.000 kg 200.000 kg	> 200.000 kg - 300.000 kg	> 300.000 kg	Tarif tambahan (surcharges) garbarata sebesar 50% dari tarif normal dengan kelipatan per 1 (1) jam
\$ 49,95	\$ 125,55	\$ 209,25	\$ 236,25	

E. Mikrokontroler ESP32

Mikrokontroler merupakan komponen utama dalam sistem berbasis Internet of Things yang berfungsi sebagai pusat pengendali dan pengolah data. Dalam sistem monitoring, mikrokontroler bertugas untuk menerima data dari sensor, mengolah informasi tersebut, serta mengirimkannya ke sistem *monitoring* melalui jaringan internet. Dengan demikian, mikrokontroler menjadi penghubung antara perangkat keras dan sistem digital yang digunakan dalam proses monitoring (Tama & Winardi, 2022)



Gambar II. 4 Mikrokontroler ESP32
(Sumber: Datasheet Mikrokontroler ESP32 Version 5.2)

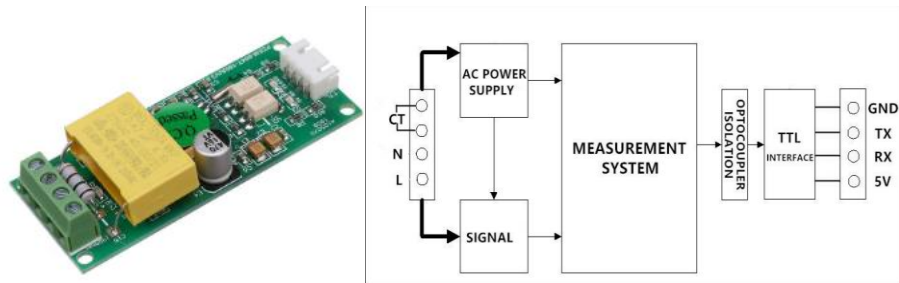
Salah satu jenis mikrokontroler yang banyak digunakan dalam sistem IoT adalah ESP32. Mikrokontroler ini memiliki kemampuan komunikasi nirkabel yang terintegrasi, seperti WiFi, sehingga memungkinkan proses pengiriman data dilakukan secara langsung tanpa memerlukan perangkat tambahan. Kemampuan ini menjadikan ESP32 sebagai pilihan yang efisien dalam pengembangan sistem *monitoring* berbasis IoT, terutama dalam hal kemudahan integrasi dan fleksibilitas penggunaan (Rozi dkk., 2025)

Dalam implementasinya, ESP32 berperan sebagai pengolah utama yang menerima input dari sensor arus, kemudian memproses data tersebut untuk menentukan kondisi operasional suatu peralatan. Data yang telah diolah selanjutnya dikirimkan ke sistem *monitoring* untuk ditampilkan dalam bentuk informasi yang dapat dipahami oleh pengguna. Proses ini memungkinkan *monitoring* dilakukan secara *real time* dan berkelanjutan (Sari dkk., 2024).

Selain itu, penggunaan mikrokontroler dalam sistem monitoring juga memberikan keunggulan dalam hal otomatisasi. Dengan adanya sistem yang terprogram, proses pengambilan data dapat dilakukan tanpa campur tangan manusia secara langsung. Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi, tetapi juga mengurangi potensi kesalahan yang dapat terjadi pada pencatatan manual. Oleh karena itu, mikrokontroler seperti ESP32 menjadi komponen penting dalam pengembangan sistem *monitoring* modern (Zuhair dkk., 2025).

F. PZEM 004T

Modul PZEM 004T merupakan modul pengukuran listrik yang digunakan untuk membaca parameter pada sistem arus bolak balik. Dalam sistem *monitoring*, modul ini berperan sebagai sensor utama yang menangkap kondisi kelistrikan dari beban, seperti tegangan, arus, daya, energi, frekuensi, dan faktor daya. Pada penelitian ini, PZEM 004T digunakan untuk memperoleh data kelistrikan garbarata, sehingga sistem tidak hanya mencatat jam penggunaan, tetapi juga mampu membaca kondisi listrik selama peralatan bekerja.



Gambar II. 5 PZEM 004T
(Sumber data sheet PZEM)

PZEM 004T banyak digunakan pada sistem *monitoring* energi berbasis IoT karena dapat dihubungkan dengan mikrokontroler seperti ESP32. Prabowo dkk. menjelaskan bahwa PZEM 004T berfungsi sebagai pengukur arus AC dan tegangan listrik AC yang digunakan oleh beban, sedangkan ESP32 bertugas memproses hasil pengukuran tersebut agar dapat ditampilkan pada *dashboard* komputer Prabowo dkk. (2023). Hubungan ini relevan dengan *prototype monitoring* garbarata karena data dari sensor harus diolah terlebih dahulu sebelum menjadi informasi yang dapat dibaca pengguna.

Kemampuan PZEM 004T tidak hanya terbatas pada arus dan tegangan. Suwarno menjelaskan bahwa *energy* meter berbasis ESP32 dan PZEM 004T dapat menampilkan tegangan, arus, *power factor*, daya nyata, daya semu, daya reaktif, energi, frekuensi, dan lama waktu ON Suwarno, (2025). Parameter lama waktu ON sangat penting dalam penelitian ini karena berkaitan langsung dengan pencatatan jam penggunaan garbarata. Sementara itu, parameter energi

dan daya dapat menjadi dasar tambahan untuk membaca pola pemakaian listrik dan estimasi tarif penggunaan.

Dari sisi teknis, PZEM 004T dapat dikomunikasikan dengan mikrokontroler melalui jalur serial. Wenno dkk. menyebutkan bahwa PZEM 004T menggunakan komunikasi UART dan mampu membaca tegangan, arus, daya, serta energi, dengan rentang tegangan input 80 sampai 260 VAC dan pengukuran arus yang dapat menggunakan current transformer hingga 100 A (Wenno dkk. (2025)). Karakter ini membuat PZEM 004T cukup sesuai untuk *prototype monitoring* karena modul dapat membaca parameter listrik tanpa harus membuat rangkaian pengukuran yang terlalu rumit.

Akurasi menjadi hal penting karena data dari PZEM 004T akan digunakan sebagai dasar monitoring. Prabowo dkk. menemukan bahwa hasil pengukuran arus dan tegangan menggunakan PZEM 004T memiliki selisih di bawah satu persen ketika dibandingkan dengan alat ukur manual, sehingga modul ini dinilai cukup akurat untuk pencatatan energi berbasis IoT Prabowo dkk. (2023). Namun, hasil pengukuran tetap perlu dipahami sebagai data sensor yang harus diuji pada kondisi *prototype*, terutama karena akurasi dapat dipengaruhi pemasangan, beban, koneksi, dan proses kalibrasi.

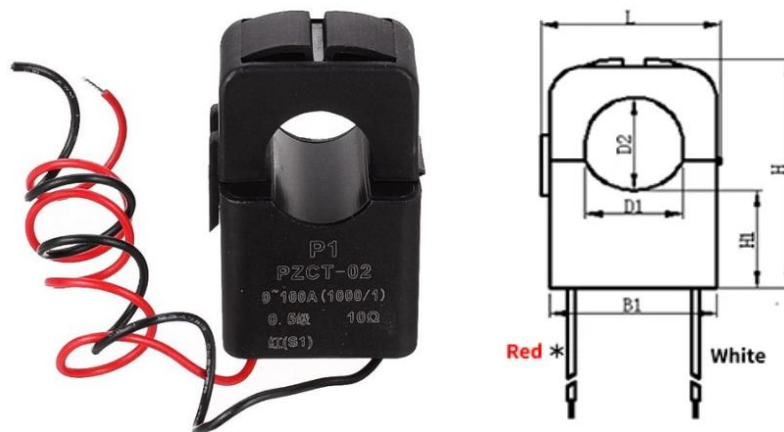
Pada sistem monitoring berbasis *web*, PZEM 004T bekerja sebagai titik awal pengambilan data. Haryanto et al. menunjukkan bahwa proses *monitoring* dimulai dari pembacaan beban oleh sensor PZEM 004T, kemudian data dikirim oleh ESP32 ke web untuk menampilkan nilai arus, tegangan, daya, dan faktor daya secara *real time* Haryanto dkk. (2024). Pola ini sesuai dengan rancangan penelitian, karena data listrik garbarata perlu dikirim ke sistem tampilan agar dapat dipantau tanpa harus membaca alat ukur secara langsung di panel.

Dalam penelitian ini, PZEM 004T digunakan untuk mendukung dua kebutuhan utama. Pertama, modul ini menyediakan data teknis berupa arus, tegangan, daya, energi, frekuensi, dan faktor daya. Kedua, data tersebut mendukung pencatatan jam operasi dan estimasi tarif penggunaan garbarata. Ketika garbarata aktif, sistem dapat membaca parameter listrik sekaligus menghitung durasi penggunaan. Dengan demikian, PZEM 004T tidak hanya menjadi sensor

listrik, tetapi bagian dari sistem pencatatan operasional yang mendukung *preventive maintenance* berbasis data.

G. *PZ Current Transformer (CT)*

PZ Current Transformer atau CT merupakan komponen yang digunakan untuk membaca arus listrik pada sistem arus bolak balik. Pada sistem *monitoring*, CT berfungsi sebagai sensor arus yang membantu modul pengukuran memperoleh nilai arus tanpa harus menempatkan rangkaian ukur secara langsung sebagai bagian utama penghantar beban. Dengan cara ini, pembacaan arus dapat dilakukan lebih aman dan lebih praktis, terutama pada sistem yang memiliki beban listrik cukup besar.



Gambar II. 6 PZCT-02
(Sumber DATASHEET PZCT-02)

Dalam penggunaan modul PZEM 004T, CT menjadi bagian penting karena arus beban dibaca melalui trafo arus yang terhubung ke modul sensor. Wenno dkk menjelaskan bahwa PZEM 004T dilengkapi current transformer yang dapat digunakan untuk mengukur arus listrik hingga 100 A Wenno dkk. (2025). Kemampuan ini membuat CT relevan untuk sistem monitoring garbarata, karena peralatan seperti *motor lift column* membutuhkan pengukuran arus yang tidak dapat diperlakukan sama seperti rangkaian elektronik kecil.

Prinsip kerja CT adalah menurunkan arus besar pada penghantar utama menjadi sinyal arus yang lebih kecil dan aman untuk dibaca oleh rangkaian pengukuran. Arus kecil tersebut kemudian diterjemahkan oleh modul sensor menjadi nilai arus yang dapat diproses oleh mikrokontroler. Haryanto dkk menyebutkan bahwa PZEM 004T sudah dilengkapi sensor tegangan dan sensor

arus CT yang telah dikalibrasi, sehingga modul dapat digunakan untuk mengukur tegangan, arus, daya, dan faktor daya pada sistem listrik Haryanto dkk. (2024). Dengan demikian, CT tidak berdiri sendiri, melainkan menjadi bagian dari sistem pengukuran energi.

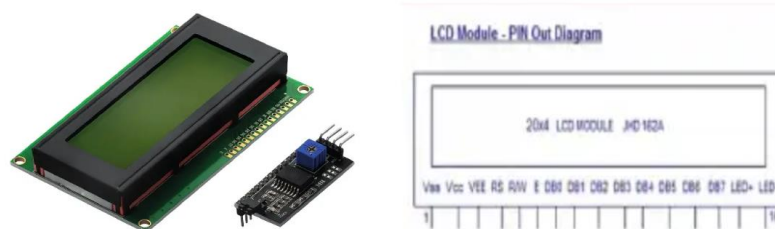
Pada rancangan sistem *monitoring* garbarata, CT berfungsi membaca arus yang mengalir ketika garbarata digunakan. Data arus ini penting karena dapat menunjukkan beban kerja peralatan. Ketika arus meningkat pada kondisi operasi yang sama, hal tersebut dapat menjadi indikasi adanya perubahan beban, hambatan mekanis, atau penurunan efisiensi pada sistem penggerak. Oleh karena itu, pembacaan arus melalui CT dapat membantu teknisi melihat gejala awal gangguan sebelum kerusakan menjadi lebih serius.

Davidson dan Agustin menunjukkan bahwa CT pada PZEM 004T dipasang sebagai bagian dari koneksi sensor dengan beban listrik, lalu data parameter listrik yang terbaca diproses oleh ESP32 dan dikirim menuju *dashboard* Davidson & Agustin, (2024) Pola ini sejalan dengan *prototype* penelitian ini, karena arus garbarata perlu dibaca sebagai data awal, diproses oleh ESP32, lalu ditampilkan dalam sistem *monitoring*. Dengan adanya CT, sistem dapat memperoleh data arus tanpa mengandalkan pencatatan manual dari alat ukur terpisah.

Dengan demikian, *Current Transformer* dalam penelitian ini berperan sebagai komponen pendukung utama bagi pembacaan arus pada sistem *monitoring* garbarata. Data arus yang diperoleh melalui CT dan PZEM 004T dapat digunakan bersama data tegangan, daya, energi, dan durasi penggunaan. Kombinasi data tersebut membantu sistem menghitung jam operasi, memperkirakan tarif penggunaan, serta menyediakan dasar awal untuk *preventive maintenance* berbasis data.

H. LCD 20 X 4 I2C

LCD 20x4 I2C merupakan media tampilan lokal yang digunakan untuk menampilkan data hasil pembacaan sistem secara langsung pada perangkat. LCD 20x4 memiliki empat baris tampilan dengan masing masing baris dapat memuat dua puluh karakter. Sementara itu, modul I2C digunakan agar sambungan antara LCD dan mikrokontroler menjadi lebih sederhana karena hanya membutuhkan jalur komunikasi yang lebih sedikit dibandingkan koneksi LCD paralel. Dalam sistem *monitoring*, LCD berfungsi sebagai tampilan cepat bagi teknisi atau pengguna yang berada di dekat alat.



Gambar II. 7 LCD 20x4 I2C
(Sumber data sheet LCD 20X4)

Pada *prototype monitoring* garbarata, LCD 20x4 I2C diperlukan karena tidak semua informasi harus selalu dilihat melalui website. Ketika teknisi berada di lokasi, nilai seperti status alat, tegangan, arus, daya, durasi penggunaan, atau tarif sementara dapat dibaca langsung dari layar. Tampilan lokal ini menjadi cadangan penting apabila koneksi internet mengalami gangguan atau pengguna hanya membutuhkan pengecekan cepat tanpa membuka *dashboard*. Dengan demikian, LCD bukan sekadar pelengkap, tetapi bagian dari antarmuka sistem yang memudahkan pembacaan data di lapangan.

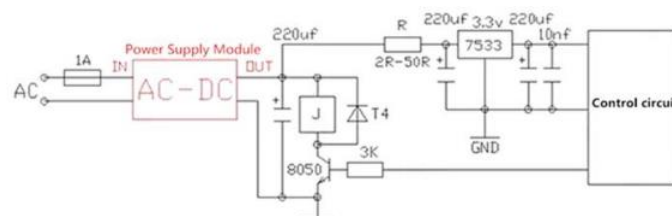
Putra dkk. menggunakan LCD 20x4 I2C untuk menampilkan data hasil pemantauan pada sistem IoT berbasis ESP32, sementara data yang sama juga dikirim ke antarmuka *website* yang dapat diakses melalui laptop atau smartphone Putra dkk. (2025). Pola ini relevan dengan penelitian ini karena *prototype* garbarata juga membutuhkan dua bentuk tampilan, yaitu tampilan lokal pada alat dan tampilan jarak jauh melalui sistem berbasis *web*. Dua tampilan tersebut membuat sistem lebih fleksibel, terutama ketika pengguna memiliki kebutuhan akses yang berbeda.

Penggunaan LCD pada sistem energi juga ditunjukkan oleh Suwarno yang menampilkan hasil pengukuran energi meter berbasis ESP32 dan PZEM 004T pada LCD 4x20. Tampilan tersebut memuat informasi seperti tegangan, arus, power factor, daya nyata, daya semu, dan daya reaktif Suwarno, (2025). Informasi ini menunjukkan bahwa LCD dapat digunakan untuk menampilkan beberapa parameter listrik secara ringkas. Pada penelitian ini, konsep serupa dapat diterapkan untuk menampilkan data penting dari *monitoring* garbarata, khususnya status operasi, jam penggunaan, dan parameter listrik utama.

Dalam penelitian *aviobridge*, Kurniasari dkk. juga menunjukkan bahwa nilai besaran listrik yang dibaca oleh sensor PZEM 004T dikirim ke mikrokontroler dan ditampilkan pada LCD sebelum data digunakan untuk monitoring berbasis web Kurniasari dkk., (2022). Hal ini memperkuat posisi LCD sebagai bagian dari sistem *monitoring* yang tetap berguna walaupun sistem telah memiliki koneksi internet. LCD membantu menjembatani antara pembacaan sensor dan pemahaman pengguna secara langsung di perangkat.

Dengan demikian, LCD 20x4 I2C dalam penelitian ini berfungsi sebagai media tampilan lokal untuk memperlihatkan hasil kerja sistem *monitoring* garbarata. Data yang ditampilkan dapat mencakup status aktif, tegangan, arus, daya, durasi penggunaan, dan estimasi tarif. Keberadaan LCD membuat prototype lebih praktis digunakan karena teknisi dapat melakukan pengecekan langsung pada alat, sementara data yang lebih lengkap tetap dapat dikirim ke sistem *web* untuk kebutuhan pencatatan dan evaluasi *preventive maintenance*.

I. Modul Power Supply AC DC



Gambar II. 8 Modul Power Supply AC DC
(Sumber data sheet LCD 20X4)

Modul power supply AC DC merupakan bagian yang menyediakan tegangan kerja bagi rangkaian elektronik pada sistem *monitoring*. Komponen seperti ESP32, sensor, LCD, dan modul komunikasi tidak dapat langsung menggunakan sumber listrik 220V AC, sehingga diperlukan rangkaian catu daya yang mampu mengubah tegangan AC menjadi tegangan DC yang lebih rendah dan stabil. Dalam sistem *prototype*, kestabilan catu daya menjadi penting karena pembacaan sensor dan kerja mikrokontroler sangat dipengaruhi oleh kualitas tegangan masukan.

power supply berfungsi menyediakan daya bagi perangkat eksternal yang membutuhkan tegangan searah atau DC. Prinsip kerjanya melibatkan perubahan tegangan dari sumber listrik utama AC menjadi tegangan DC melalui proses penurunan tegangan dan penyearahan. Pada rancangan sistem kendali dan *monitoring* penggunaan daya listrik berbasis IoT, *power supply* digunakan untuk mengubah tegangan 220V AC menjadi 12V DC sebelum daya tersebut digunakan oleh rangkaian kontrol

Dalam penelitian ini, modul *power supply* AC DC diperlukan agar sistem *monitoring* garbarata memiliki sumber daya yang mandiri dan stabil. Jika catu daya tidak stabil, maka ESP32 dapat mengalami reset, sensor dapat membaca data tidak konsisten, dan tampilan LCD dapat terganggu. Keadaan seperti ini dapat membuat data jam penggunaan dan tarif menjadi tidak akurat. Oleh karena itu, *power supply* bukan hanya komponen pendukung, tetapi bagian yang menentukan keandalan pencatatan data.

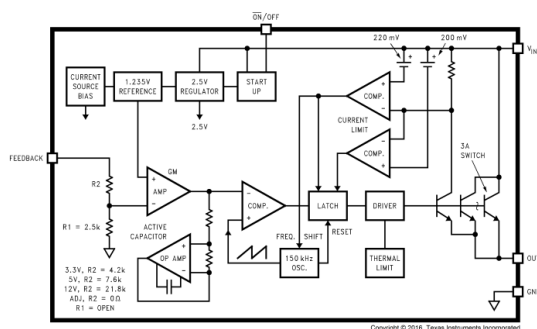
Susanto dkk. menggunakan modul Hi Link untuk mengubah tegangan 220V AC menjadi 5V DC pada prototype monitoring dan kontrol peralatan listrik berbasis IoT. Modul tersebut digunakan untuk menyediakan daya stabil bagi mikrokontroler ESP32 dan sensor PZEM 004T Susanto dkk. (2025). Contoh ini menunjukkan bahwa pada sistem *monitoring* berbasis IoT, konversi tegangan dari sumber AC ke DC menjadi kebutuhan dasar agar komponen elektronik dapat bekerja sesuai batas tegangannya.

Pada *prototype* sistem *monitoring* jam dan tarif garbarata, *power supply* AC DC berfungsi sebagai sumber utama bagi rangkaian kontrol. Tegangan DC dari

power supply dapat diteruskan ke modul *step down* apabila diperlukan penyesuaian tegangan lebih lanjut. Dengan susunan ini, sistem dapat menyediakan tegangan yang sesuai untuk ESP32, sensor PZEM 004T, LCD, dan komponen pendukung lain. Kestabilan catu daya akan membantu menjaga kontinuitas pembacaan data, pengiriman informasi, serta pencatatan jam operasi garbarata untuk kebutuhan *preventive maintenance*.

J. Modul step Down LM2596

Modul *step down* LM2596 merupakan konverter DC ke DC yang digunakan untuk menurunkan tegangan masukan menjadi tegangan keluaran yang lebih rendah. Pada sistem *monitoring* berbasis mikrokontroler, modul ini dibutuhkan karena tegangan dari *power supply* belum tentu langsung sesuai dengan kebutuhan setiap komponen. Sebagai contoh, tegangan 12V DC dari *power supply* masih perlu diturunkan menjadi 5V DC atau tegangan lain yang lebih aman untuk rangkaian kontrol.



Gambar II. 9 lm2596
(Sumber data sheet lm2596)

Pada *prototype* sistem *monitoring* jam dan tarif garbarata, LM2596 digunakan untuk memastikan rangkaian kontrol memperoleh tegangan yang sesuai. Komponen seperti ESP32, LCD, relay, dan sensor membutuhkan tegangan kerja yang stabil agar proses pembacaan, perhitungan durasi, dan pengiriman data dapat berjalan konsisten. Jika tegangan terlalu tinggi, komponen berisiko rusak. Jika tegangan terlalu rendah atau tidak stabil, sistem dapat gagal membaca data atau berhenti bekerja saat garbarata sedang dipantau.

Dengan demikian, *modul step down* LM2596 memiliki peran pendukung yang penting dalam menjaga keandalan sistem *monitoring*. Walaupun tidak secara langsung membaca data garbarata, modul ini membantu menyediakan

tegangan kerja yang stabil bagi komponen utama. Kestabilan tersebut diperlukan agar data jam operasi, parameter listrik, dan estimasi tarif penggunaan dapat dicatat dengan lebih konsisten untuk mendukung *preventive maintenance* berbasis data.

K. Sistem *Maintenance* Peralatan

Pemeliharaan atau *maintenance* peralatan merupakan serangkaian kegiatan yang dilakukan untuk mempertahankan kondisi dan fungsi peralatan agar tetap berada dalam performa optimal. Terdapat beberapa jenis pendekatan *maintenance* yang umum diterapkan dalam industri. *Preventive maintenance* merupakan pemeliharaan terjadwal yang dilakukan secara periodik tanpa mempertimbangkan kondisi aktual peralatan. *Condition-based maintenance* (CBM) merupakan pendekatan pemeliharaan yang didasarkan pada hasil pemantauan kondisi aktual peralatan. *Predictive maintenance* merupakan pengembangan lebih lanjut dari CBM yang memanfaatkan analisis data historis untuk memprediksi kapan suatu peralatan memerlukan pemeliharaan. Nazara menyatakan bahwa penerapan sistem *monitoring* berbasis IoT secara signifikan mendukung transisi dari pendekatan pemeliharaan reaktif menuju *predictive maintenance* yang lebih efisien (Nazara, 2022). Dengan tersedianya data jam kerja operasional yang akurat, unit pemeliharaan dapat menentukan interval *servis* yang lebih tepat berdasarkan tingkat penggunaan aktual, bukan sekadar kalender waktu.

Preventive maintenance merupakan suatu pendekatan pemeliharaan yang dilakukan secara terencana sebelum terjadinya kerusakan pada peralatan. Konsep ini bertujuan untuk menjaga kondisi peralatan agar tetap berada dalam performa optimal serta mengurangi kemungkinan terjadinya gangguan yang dapat menghambat operasional. Dengan kata lain, *preventive maintenance* menekankan pada tindakan pencegahan dibandingkan perbaikan setelah kerusakan terjadi (Pratama dkk., 2025)

Dalam praktiknya, *preventive maintenance* dilakukan berdasarkan parameter tertentu yang dapat menggambarkan kondisi dan tingkat penggunaan peralatan. Salah satu parameter yang umum digunakan adalah jam kerja operasional,

karena durasi penggunaan memiliki hubungan langsung dengan tingkat keausan dan potensi kerusakan suatu alat. Semakin tinggi intensitas penggunaan, maka semakin besar pula kemungkinan terjadinya gangguan apabila tidak dilakukan perawatan secara berkala (Mangunsong dkk., 2025)

Pendekatan *preventive maintenance* memiliki keunggulan dibandingkan dengan *corrective maintenance* yang hanya dilakukan setelah terjadi kerusakan. Dengan melakukan perawatan secara terencana, risiko terjadinya kerusakan mendadak dapat diminimalkan sehingga operasional dapat berjalan lebih stabil. Selain itu, biaya perawatan juga cenderung lebih efisien karena kerusakan dapat dicegah sebelum berkembang menjadi masalah yang lebih besar (Romansdani dkk., 2024)

Perkembangan teknologi turut mendorong penerapan *preventive maintenance* yang lebih modern melalui pemanfaatan sistem *monitoring* berbasis *Internet of Things*. Dalam sistem ini, data yang diperoleh dari sensor digunakan untuk memantau kondisi peralatan secara *real time*, sehingga keputusan pemeliharaan dapat dilakukan berdasarkan kondisi aktual di lapangan. Pendekatan ini menjadikan proses *maintenance* lebih tepat sasaran dan tidak lagi bergantung pada perkiraan semata (Tama & Winardi, 2022)

Lebih lanjut, integrasi antara sistem *monitoring* dan *preventive maintenance* memungkinkan terciptanya sistem pemeliharaan berbasis data. Data operasional seperti jam kerja, arus listrik, dan kondisi performa alat dapat dianalisis untuk menentukan waktu yang paling tepat dalam melakukan perawatan. Dengan demikian, sistem ini tidak hanya meningkatkan keandalan peralatan, tetapi juga mendukung efisiensi operasional secara keseluruhan (Pratama dkk., 2025).

L. *Preventive Maintenance*

Preventive maintenance merupakan kegiatan pemeliharaan yang dilakukan sebelum peralatan mengalami kerusakan. Tujuannya bukan menunggu alat berhenti bekerja, tetapi menjaga agar fungsi peralatan tetap berada dalam kondisi layak operasi. Pada peralatan yang digunakan secara rutin seperti garbarata, *preventive maintenance* menjadi penting karena gangguan kecil

pada komponen dapat berkembang menjadi kerusakan yang menghambat pelayanan penumpang. Dengan demikian, pemeliharaan tidak hanya dipahami sebagai kegiatan teknis setelah muncul gangguan, tetapi sebagai upaya menjaga kesiapan peralatan sejak awal.

Pada sistem garbarata, *preventive maintenance* tidak dapat dilepaskan dari intensitas penggunaan. Garbarata yang lebih sering digunakan akan memiliki akumulasi jam kerja lebih tinggi dibandingkan garbarata yang jarang dipakai. Perbedaan jam kerja tersebut dapat berdampak pada *motor*, *gearbox*, mekanisme *lift column*, sistem catu daya, dan komponen kontrol. Jika semua unit diperlakukan sama tanpa melihat data pemakaian, maka pemeliharaan berisiko kurang tepat. Unit yang sering digunakan mungkin terlambat Pelaksanaan *preventive maintenance* pada garbarata dilaksanakan berdasarkan prosedur dan interval pemeliharaan yang ditetapkan dalam Operation and Maintenance Manual PT Bukaka Teknik Utama. Manual tersebut memuat rekomendasi kegiatan pemeliharaan untuk setiap komponen, termasuk pelumasan (*grease*) dan penggantian oli (*gearbox lubricating oil*), yang disesuaikan dengan kondisi operasi dan akumulasi jam kerja. Dengan adanya pedoman tersebut, kegiatan pemeliharaan tidak dilakukan secara acak, tetapi mengikuti interval yang telah direkomendasikan oleh pabrikan sehingga keandalan dan umur pakai komponen dapat dipertahankan.

Frequency for Refilling and Replacing Grease

MODEL	Grease for	Operating Condition or Component Greased	Frequency
Single Reduction Unit	Refill	N/A	NOT REQUIRED Maintained free
	Overhaul*	N/A	Every 20,000 hours or every 4 to 5 years
Double Reduction Unit	Refill	Less than 10 hours/day	Every 3 to 6 months
		10 to 24 hours/day	Every 500 to 1000 hours
	Replace	Speed Reduction Mechanism & High Speed Shaft Bearings	Every 2 to 3 years
		Slow Speed Shaft Bearings	Every 3 to 5 years

* Overhaul consists of disassembling the unit, cleaning the internal parts, replacing the seals and gaskets, and then repacking the unit with grease.

Gambar II. 10 Frequency for Refilling and Replacing Grease
(Sumber : Operation and Maintenance Manual PT Bukaka Teknik Utama.)

Berdasarkan Gambar II.10, frekuensi pelumasan berbeda untuk setiap jenis *reduction* unit dan kondisi operasinya. Pada *double reduction* unit dengan waktu operasi kurang dari 10 jam per hari, penambahan *grease (refill)* direkomendasikan setiap 3–6 bulan atau sekitar 500–1000 jam operasi. Sementara itu, untuk kondisi operasi 10–24 jam per hari, penggantian *grease (replace)* direkomendasikan setiap 2–3 tahun pada mekanisme berkecepatan standar maupun tinggi. Perbedaan interval tersebut menunjukkan bahwa intensitas penggunaan menjadi salah satu faktor utama dalam penentuan jadwal pemeliharaan.

Oil Change Interval

Under all conditions, every TRANSCYKO unit needs an initial oil change after 500 hours of primary operation. The subsequent oil change interval will depend on the operational conditions.

every 6 months	less than 10 hours / day operation
every 2500 hours	10~24 hours / day operation
every 1~3 months	heavy operation condition such as high ambient temperature & high humidities.

For specific details of lubrication and maintenance, please refer to the Operating and Maintenance Manual.

Gambar II. 11 Rekomendasi Interval Penggantian Oli
(Sumber : Operation and Maintenance Manual PT Bukaka Teknik Utama.)

Selain pelumasan, manual PT Bukaka juga merekomendasikan penggantian oli *gear reducer* berdasarkan jam operasi. Penggantian oli pertama dilakukan setelah 500 jam operasi, sedangkan interval penggantian berikutnya disesuaikan dengan kondisi penggunaan. Untuk operasi kurang dari 10 jam per hari, penggantian oli direkomendasikan setiap 6 bulan, sedangkan pada penggunaan 10–24 jam per hari dilakukan setiap 2.500 jam operasi. Pada kondisi operasi berat, seperti suhu lingkungan tinggi atau kelembapan tinggi, interval penggantian oli direkomendasikan menjadi lebih sering, yaitu setiap 1–3 bulan, agar kualitas pelumasan tetap terjaga dan komponen tidak mengalami keausan dini.

Rekomendasi interval pemeliharaan tersebut menjadi dasar dalam penelitian ini. Sistem *monitoring* yang dikembangkan tidak menetapkan interval pemeliharaan baru, tetapi memanfaatkan data akumulasi jam kerja hasil monitoring berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk membandingkannya dengan interval yang direkomendasikan dalam *Operation and Maintenance Manual* PT Bukaka Teknik Utama. Dengan demikian, sistem dapat memberikan rekomendasi pelaksanaan *preventive maintenance*, khususnya penggantian oli dan pelumasan, berdasarkan data penggunaan aktual setiap unit garbarata sehingga pelaksanaan pemeliharaan menjadi lebih tepat sasaran dan terdokumentasi.

M. Sistem Kontrol dan *Monitoring* Peralatan

Sistem *monitoring* peralatan merupakan suatu rangkaian sistem yang dirancang untuk mengamati, merekam, dan menganalisis kondisi operasional suatu peralatan secara kontinu. Definisi *monitoring* dalam konteks teknik industri mengacu pada proses pengumpulan data parameter operasional secara periodik guna mendeteksi perubahan kondisi yang berpotensi mengindikasikan penurunan kinerja atau kerusakan. Tujuan utama *monitoring* peralatan adalah menyediakan informasi yang akurat sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan. Akbar dan Riady menyatakan bahwa sistem akuisisi data (*Data Acquisition System/DAQ*) yang terintegrasi dengan sensor menjadi fondasi utama dalam membangun sistem monitoring peralatan industri yang handal (Akbar & Riady, 2022).

Parameter *monitoring* pada sistem industri umumnya mencakup arus listrik, tegangan, suhu, getaran, dan tekanan. Pada sistem monitoring garbarata berbasis sensor arus, parameter utama yang dipantau adalah nilai arus listrik motor penggerak sebagai indikator aktivitas operasional. Data akuisisi dilakukan melalui pembacaan sensor yang kemudian dikirimkan ke unit pemrosesan untuk diolah menjadi informasi yang dapat diinterpretasikan oleh pengguna. Hidayat et al. membuktikan bahwa sistem *monitoring* berbasis IoT menggunakan ESP8266 mampu menampilkan data sensor secara *real-time*

melalui antarmuka *website* dengan tingkat responsivitas yang memadai untuk kebutuhan operasional (Hidayat dkk., 2021).

N. Sistem Kontrol Kelistrikan Garbarata

Sistem kontrol kelistrikan pada *Passenger Boarding Bridge* (garbarata) merupakan bagian yang berfungsi sebagai pusat pengendalian seluruh proses operasional peralatan. Sistem ini mengatur distribusi tenaga listrik, pengoperasian motor penggerak, serta memberikan perlindungan terhadap rangkaian listrik selama garbarata beroperasi. Seluruh komponen kelistrikan ditempatkan di dalam panel kontrol yang dirancang agar proses distribusi daya, pengendalian, dan pemeliharaan dapat dilakukan secara aman, terpusat, dan mudah diakses oleh teknisi.

Sumber tenaga listrik pada panel kontrol garbarata berasal dari jaringan listrik bandar udara dengan tegangan 220 VAC. Tegangan tersebut terlebih dahulu melewati *Main Circuit Breaker* (MCB) yang berfungsi sebagai pengaman utama terhadap gangguan hubung singkat (*short circuit*) maupun arus lebih (*overcurrent*). Selanjutnya daya listrik didistribusikan menuju rangkaian tenaga dan rangkaian kontrol untuk mengoperasikan berbagai komponen yang terdapat pada garbarata sesuai kebutuhan operasional.

Di dalam panel kontrol umumnya terdapat beberapa komponen utama seperti pada lampiran D, antara lain *Magnetic Contactor* sebagai penghubung dan pemutus daya menuju motor listrik, *Thermal Overload Relay* sebagai pelindung motor terhadap beban lebih, *Power Supply* sebagai pengubah tegangan AC menjadi tegangan DC yang dibutuhkan oleh rangkaian kontrol, *relay kontrol* sebagai pengendali logika kerja peralatan, terminal *block* sebagai media distribusi dan penyambungan kabel, serta indikator dan *push button* yang digunakan operator untuk memberikan perintah pengoperasian maupun mengetahui status kerja garbarata. Seluruh komponen tersebut saling terintegrasi sehingga sistem dapat mengendalikan pergerakan garbarata secara aman dan andal.

Pada sistem kontrol garbarata juga terdapat beberapa tingkat tegangan sesuai dengan fungsi masing-masing komponen. Tegangan 220 VAC digunakan

sebagai sumber utama untuk rangkaian tenaga dan motor penggerak, sedangkan tegangan DC yang dihasilkan oleh *power supply* digunakan untuk mencatu rangkaian kontrol, indikator, sensor, maupun perangkat elektronik lainnya. Pemisahan antara rangkaian tenaga dan rangkaian kontrol bertujuan untuk meningkatkan keandalan sistem, mempermudah proses perawatan, serta melindungi komponen kontrol dari gangguan yang berasal dari rangkaian daya.

Pemahaman terhadap sistem kontrol kelistrikan garbarata menjadi dasar dalam pengembangan sistem *monitoring* pada penelitian ini. Dengan memanfaatkan sumber tegangan dan jalur distribusi daya yang terdapat pada panel kontrol, *prototype monitoring* dapat diintegrasikan tanpa mengubah fungsi utama sistem operasional garbarata. Selain itu, pengambilan data arus listrik pada penghantar motor memungkinkan sistem mendeteksi kondisi operasional garbarata secara otomatis sehingga data jam kerja dapat direkam sebagai dasar perhitungan biaya penggunaan dan pelaksanaan *preventive maintenance* berbasis data.

O. Beban Operasional Peralatan

Jam kerja operasional peralatan merupakan indikator yang digunakan untuk menunjukkan durasi waktu suatu alat beroperasi dalam periode tertentu. Konsep ini umumnya digunakan dalam berbagai sektor industri sebagai dasar untuk memantau tingkat penggunaan peralatan serta mengevaluasi kinerja operasionalnya. Pencatatan jam kerja menjadi penting karena dapat memberikan gambaran mengenai intensitas penggunaan suatu alat secara aktual dan terukur (Pratama dkk., 2025).

Dalam praktiknya, pencatatan jam kerja peralatan sering dilakukan secara manual oleh operator dengan cara mencatat waktu mulai dan selesai penggunaan alat. Namun, metode ini memiliki berbagai keterbatasan, seperti potensi kesalahan pencatatan, keterlambatan dalam pengumpulan data, serta ketergantungan pada faktor manusia. Kondisi tersebut menyebabkan data yang dihasilkan kurang akurat dan tidak dapat digunakan secara optimal dalam proses analisis maupun pengambilan keputusan (Zuhair dkk., 2025).

Seiring dengan perkembangan teknologi, pencatatan jam kerja peralatan mulai beralih ke sistem otomatis berbasis sensor dan IoT. Dalam sistem ini, jam kerja dihitung berdasarkan aktivitas operasional alat yang terdeteksi melalui parameter tertentu, seperti aliran arus listrik. Ketika arus listrik terdeteksi mengalir, sistem akan mengidentifikasi bahwa alat sedang beroperasi dan mulai menghitung durasi penggunaannya. Sebaliknya, ketika tidak ada arus yang terdeteksi, sistem akan menghentikan pencatatan waktu operasional. Pendekatan ini memungkinkan pencatatan jam kerja dilakukan secara lebih akurat dan *real time* (Simanjuntak, 2026).

Lebih lanjut, data jam kerja yang diperoleh secara otomatis dapat digunakan sebagai dasar dalam perencanaan pemeliharaan peralatan. Dengan mengetahui durasi penggunaan alat secara pasti, pihak pengelola dapat menentukan jadwal perawatan yang lebih tepat dan terstruktur. Hal ini sangat penting untuk mencegah terjadinya kerusakan akibat penggunaan berlebih serta menjaga performa alat agar tetap optimal dalam jangka panjang (Pratama dkk., 2025)

Selain itu, sistem pencatatan jam kerja berbasis teknologi juga memberikan kemudahan dalam pengolahan data historis. Data yang tersimpan dapat dianalisis untuk mengetahui pola penggunaan peralatan, sehingga memungkinkan dilakukannya evaluasi terhadap efisiensi operasional. Dengan demikian, konsep jam kerja tidak hanya berfungsi sebagai indikator waktu penggunaan, tetapi juga sebagai dasar dalam pengembangan sistem *monitoring* yang lebih cerdas dan berbasis data (Mangunsong dkk., 2025).

Beban operasional merujuk pada tingkat pembebanan yang diterima oleh suatu mesin atau peralatan selama proses kerjanya. Konsep ini erat kaitannya dengan umur pakai peralatan, di mana semakin tinggi dan sering beban operasional yang diterima, semakin cepat pula potensi penurunan kondisi komponen mekanik. Hubungan antara beban operasional dan konsumsi energi bersifat langsung, di mana peningkatan beban akan menyebabkan peningkatan konsumsi arus listrik secara proporsional. pemantauan arus listrik secara kontinu dapat dimanfaatkan sebagai indikator beban operasional mesin secara tidak langsung, sehingga memberikan gambaran mengenai tingkat utilisasi

peralatan Soleh dkk. (2024). Pendekatan ini memberikan nilai strategis dalam konteks manajemen pemeliharaan berbasis kondisi aktual peralatan.

sistem *monitoring* arus listrik berbasis IoT mampu merekam dan menampilkan data besaran listrik secara *real-time* dari jarak jauh, sehingga operator tidak perlu berada di lokasi peralatan secara terus-menerus untuk memantau kondisi operasionalnya . Pandang dkk. (2023). Prinsip serupa dapat diterapkan pada sistem *monitoring* garbarata, di mana data arus listrik motor penggerak digunakan sebagai parameter utama untuk menentukan status aktif atau tidaknya peralatan serta menghitung akumulasi jam kerja operasional.

P. Penelitian Terdahulu

Penelitian ini mempunyai beberapa referensi kajian terdahulu yang di gunakan sebagai pembanding dan pembeda. Referensi ini digunakan sebagai penekanan poin pembeda antara penelitian lain dengan penelitian yang akan dilaksanakan yang akan dijabarkan melalui tabel berikut :

Tabel II. 3 Penelitian Terdahulu

No	Nama (Tahun)	Judul Penelitian	Hasil, Persamaan, dan Perbedaan
1	(Kurniasari dkk., 2022)	Monitoring dan kontrol panel <i>aviobridge</i> berbasis web untuk mendukung <i>preventive</i> dan <i>corrective maintenance</i> .	Hasil: Sistem menggunakan NodeMCU, sensor PZEM 004T, LCD, relay, dan web. Hasil pengujian menunjukkan <i>stabilizer mode auto</i> memiliki <i>error</i> 1,86 persen, sedangkan mode manual 2,24 persen. Sistem juga membutuhkan waktu sekitar 9 sampai 10 detik untuk menampilkan pembacaan sensor pada <i>web</i>. Persamaan: Penelitian ini menjadi rujukan paling dekat karena objeknya sama sama berkaitan dengan <i>aviobridge</i> atau garbarata.

			Perbedaan: Penelitian ini tidak berfokus pada <i>stabilizer</i> tegangan, tetapi pada <i>monitoring</i> jam penggunaan dan estimasi tarif garbarata sebagai dasar <i>preventive maintenance</i> berbasis data.
2	(Alamsyah dkk., 2024)	Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Monitoring <i>Real-Time</i> PM2.5 dan CO2 di Area Terminal Bandar Udara: <i>Low-Cost Sensor</i>, <i>Internet of Things</i> (IoT) dan Pengukuran Polutan Udara	Hasil: Penggunaan <i>low-cost sensor</i> dan teknologi IoT terbukti mampu meningkatkan keandalan dan responsivitas sistem <i>monitoring</i> kualitas udara secara <i>real-time</i> di terminal bandara. Persamaan: Sama-sama mengkaji penerapan teknologi IoT dan sensor untuk pemantauan kondisi operasional secara <i>real-time</i> di lingkungan bandar udara. Perbedaan: Penelitian tersebut berfokus pada <i>monitoring</i> polutan udara, sedangkan penelitian ini berfokus pada <i>monitoring</i> jam kerja garbarata melalui sensor arus listrik.
3	(Arnas dkk., 2023)	Modifikasi Alat Monitoring Suhu Dan Kelembaban Udara Dengan Iot (<i>Internet Of Things</i>) Di Wilayah Terminal Bandara.	Hasil: Sistem <i>monitoring</i> otomatis berbasis NodeMCU ESP8266, sensor DHT11, dan aplikasi Blynk berhasil menggantikan sistem pencatatan manual di 25 lokasi terminal bandara. Persamaan: Sama-sama mengembangkan sistem <i>monitoring</i> berbasis IoT untuk menggantikan metode pencatatan manual di lingkungan bandara.

			Perbedaan: Penelitian tersebut berfokus pada <i>monitoring</i> suhu dan kelembaban, sedangkan penelitian ini berfokus pada pencatatan jam kerja garbarata melalui sensor arus listrik.
4	(Prianto & Nugroho, 2026)	Analisis efisiensi energi motor penggerak <i>lift column</i> pada garbarata	Hasil: <i>Motor lift column</i> menggunakan motor induksi tiga fasa. Daya masuk motor berdasarkan arus nominal 7,85 A sebesar 4,38 kW. Efisiensi aktual dipengaruhi rugi mekanis pada <i>gearbox</i>, <i>friksi ball screw</i>, dan beban dinamis struktur. Persamaan: Penelitian ini memberi dasar bahwa garbarata memiliki beban mekanis dan kelistrikan yang perlu dievaluasi secara berkala. Perbedaan: Penelitian ini tidak hanya melihat efisiensi motor, tetapi merancang <i>prototype</i> untuk mencatat jam operasi, membaca parameter listrik, dan menghubungkannya dengan tarif serta <i>maintenance</i>.
5	(Pandang dkk., 2023)	<i>Prototype</i> Kendali Arus dan Tegangan Menggunakan <i>Internet of Things</i> (IoT)	Hasil: Sistem <i>monitoring</i> dan kendali arus serta tegangan berbasis IoT melalui aplikasi Blynk berhasil memantau besaran listrik secara <i>real-time</i> dari jarak jauh. Persamaan: Sama-sama mengembangkan <i>prototype</i> sistem <i>monitoring</i> arus listrik berbasis IoT yang mampu merekam dan menampilkan data secara <i>real-time</i>.

			Perbedaan: Penelitian tersebut berfokus pada pemantauan arus dan tegangan di gardu induk, sedangkan penelitian ini berfokus pada pemanfaatan arus listrik motor garbarata sebagai indikator aktivitas operasional untuk pencatatan jam kerja di bandar udara.
6	(Prabowo dkk., 2023)	Pengujian akurasi modul PZEM 004T berbasis ESP32 untuk pencatatan energi listrik.	Hasil: PZEM 004T digunakan untuk membaca arus dan tegangan AC, sedangkan ESP32 memproses hasil pengukuran. Pengujian menunjukkan hasil pengukuran arus dan tegangan memiliki selisih kecil dibandingkan alat ukur manual, sehingga layak dipakai untuk <i>monitoring</i> berbasis IoT. Persamaan: Penelitian ini mendukung pemilihan PZEM 004T dan ESP32 sebagai komponen utama dalam sistem <i>monitoring</i>. Perbedaan: Penelitian ini tidak berhenti pada validasi sensor, tetapi memakai sensor untuk kebutuhan operasional garbarata, yaitu jam pakai, tarif, dan data pemeliharaan.
7	(Andrianto dkk., 2024)	Platform pemantauan penggunaan energi listrik berbasis IoT melalui ESP32 dan web.	Hasil: Sistem berhasil membaca data arus, tegangan, dan daya dari digital power meter, mengirimkan data ke ESP32, menyimpan data ke database MySQL, dan menampilkan data pada halaman <i>web</i>. Persamaan: Penelitian ini relevan karena menunjukkan alur <i>monitoring</i>

			dari perangkat ukur menuju platform <i>web</i> dan <i>database</i>. Perbedaan: Penelitian ini menggunakan platform <i>monitoring</i> untuk energi listrik gedung, sedangkan penelitian ini menerapkannya pada garbarata dengan tambahan pencatatan durasi dan tarif penggunaan.
8	(Suwarno, 2025)	Perbandingan <i>energy</i> meter berbasis ESP32 dan PZEM 004T dengan <i>smart plug</i> komersial.	Hasil: <i>Energy</i> meter ESP32 dan PZEM 004T dapat menampilkan tegangan, arus, <i>power factor</i>, daya nyata, daya semu, daya reaktif, energi, frekuensi, serta lama waktu ON. Sistem buatan lebih <i>fleksibel</i> karena dapat diprogram sesuai kebutuhan. Persamaan: Penelitian ini penting karena mendukung konsep pencatatan lama waktu ON yang dekat dengan kebutuhan <i>monitoring</i> jam penggunaan garbarata. Perbedaan: Penelitian ini tidak membandingkan alat ukur dengan <i>smart plug</i>, tetapi memanfaatkan konsep pencatatan waktu aktif untuk menghitung jam dan tarif penggunaan garbarata.
9	(Apriliya dkk., 2025)	Sistem monitoring berbasis IoT untuk <i>predictive maintenance</i> generator set menggunakan <i>machine learning</i> .	Hasil: Sistem menggunakan ESP32 dan sensor untuk membaca tegangan, arus, temperatur, tekanan oli, putaran mesin, getaran, level bahan bakar, dan jam operasional. Data dikirim ke web dashboard. Model <i>Random</i>

			<i>Forest</i> memperoleh akurasi 98,47 persen dalam klasifikasi kondisi. Persamaan: Penelitian ini relevan karena menunjukkan pentingnya jam operasional dan data sensor sebagai dasar pemeliharaan berbasis data. Perbedaan: Penelitian ini tidak menggunakan <i>machine learning</i>, tetapi mengambil prinsip bahwa data jam operasi dan parameter listrik dapat menjadi dasar <i>preventive maintenance</i> garbarata.
10	(Sutani, 2024)	<i>Platform predictive maintenance</i> berbasis IoT pada <i>turnout system</i> kereta api.	Hasil: Platform mengintegrasikan perawatan terencana dengan analisis real time menggunakan sensor lidar dan <i>accelerometer</i>. Pengujian menunjukkan <i>throughput</i> 270.000 per detik dan <i>response time</i> 1742 <i>response per millisecond</i>, sehingga data dapat digunakan sebagai acuan <i>maintenance</i>. Persamaan: Penelitian ini relevan karena sama sama berada pada konteks peralatan transportasi yang membutuhkan keandalan operasi. Perbedaan: Penelitian ini tidak membahas <i>turnout system</i> kereta api, tetapi menerapkan gagasan <i>monitoring</i> berbasis data pada garbarata sebagai fasilitas operasional bandara.

Berdasarkan tabel tersebut, terlihat bahwa penelitian sebelumnya telah memberikan dasar yang cukup kuat pada tiga sisi. Sisi pertama adalah monitoring garbarata atau *aviobridge*, terutama pada penelitian Kurniasari et al. yang menunjukkan bahwa pemantauan panel *aviobridge* dapat dilakukan melalui web. Sisi kedua adalah pengukuran parameter listrik menggunakan ESP32 dan PZEM 004T, sebagaimana terlihat pada penelitian Prabowo et al., Andrianto et al., dan Suwarno. Sisi ketiga adalah pemeliharaan berbasis data, yang tampak pada penelitian Apriliya et al. dan Sutani.

Namun, masing masing penelitian tersebut masih memiliki ruang yang belum sepenuhnya menjawab kebutuhan penelitian ini. Penelitian pada *aviobridge* masih lebih banyak menekankan monitoring tegangan, arus, dan stabilizer. Penelitian energy meter lebih banyak membahas konsumsi energi pada rumah tangga, gedung, atau perangkat umum. Penelitian *maintenance* berbasis IoT lebih sering diterapkan pada *generator set*, turnout system, atau peralatan industri lain. Belum banyak penelitian yang secara khusus menyatukan pencatatan jam penggunaan garbarata, estimasi tarif penggunaan, dan data operasional untuk mendukung *preventive maintenance*.

Posisi penelitian ini berada pada ruang kosong tersebut. *Prototype* yang dikembangkan tidak hanya membaca parameter kelistrikan, tetapi juga mencatat durasi pemakaian garbarata. Durasi tersebut digunakan untuk menghitung jam penggunaan dan estimasi tarif, sedangkan parameter listrik digunakan untuk memberi gambaran kondisi kerja peralatan. Dengan cara ini, sistem yang dirancang tidak hanya berperan sebagai alat ukur, tetapi juga sebagai sistem pencatatan operasional yang dapat membantu pengelola membaca intensitas pemakaian garbarata secara lebih objektif.

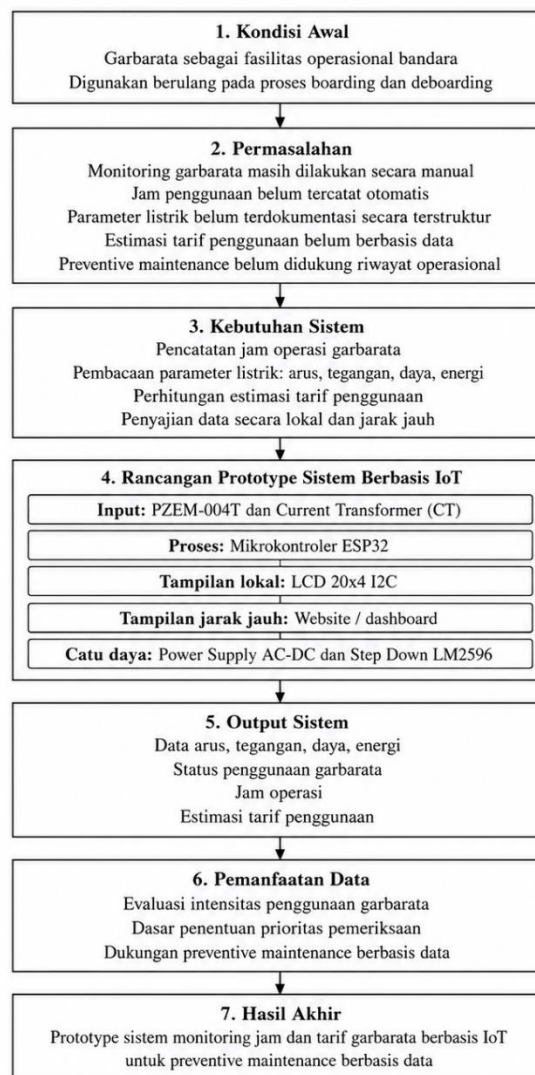
Perbedaan lain dari penelitian ini terletak pada objek dan orientasi datanya. Objek yang dipilih adalah garbarata, yaitu fasilitas bandara yang memiliki hubungan langsung dengan pelayanan penumpang dan jadwal operasi pesawat. Orientasi datanya juga tidak hanya teknis, tetapi menghubungkan data teknis dengan aspek operasional berupa jam pemakaian dan tarif. Hal ini membuat sistem *monitoring* memiliki fungsi ganda, yaitu membantu pencatatan

penggunaan layanan dan memberikan dasar awal untuk *preventive maintenance*.

Dengan demikian, penelitian ini melanjutkan beberapa hasil penelitian sebelumnya, tetapi tidak mengulanginya secara langsung. Penelitian ini mengambil dasar dari *monitoring aviobridge*, *energy meter* berbasis IoT, akurasi PZEM 004T, pencatatan waktu aktif, dan maintenance berbasis data. Kebaruan penelitian terletak pada penggabungan unsur unsur tersebut ke dalam *prototype* sistem *monitoring* jam dan tarif garbarata berbasis IoT untuk mendukung *preventive maintenance* berbasis data.

Q. Kerangka Bepikir

Kerangka pemikiran dalam penelitian ini disusun untuk menjelaskan alur hubungan antara permasalahan operasional garbarata, kebutuhan sistem monitoring, rancangan *prototype* berbasis IoT, serta pemanfaatan data untuk *preventive maintenance*.



Gambar II. 12 Diagram Kerangka Berpikir
(Sumber : Penulis, 2026)

Berdasarkan Gambar 2 penelitian ini dimulai dari kondisi awal garbarata sebagai fasilitas operasional bandara yang bekerja secara berulang. Permasalahan utama yang muncul adalah *monitoring* yang masih manual, pencatatan jam penggunaan yang belum otomatis, serta estimasi tarif dan *preventive maintenance* yang belum sepenuhnya berbasis data. Oleh karena itu, penelitian ini merancang *prototype* sistem *monitoring* berbasis IoT dengan memanfaatkan PZEM 004T dan *Current Transformer* sebagai input, ESP32 sebagai pemroses data, LCD 20x4 I2C sebagai tampilan lokal, *website* sebagai tampilan jarak jauh, serta *power supply* dan LM2596 sebagai pendukung catu daya. Output sistem berupa data parameter listrik, status penggunaan, jam

operasi, dan estimasi tarif. Data tersebut kemudian dimanfaatkan untuk mengevaluasi intensitas penggunaan garbarata, menentukan prioritas pemeriksaan, dan mendukung *preventive maintenance* berbasis data.