

Optimasi Efisiensi Perawatan *Air Conditioning* Tipe Split dengan Penerapan Pembersih *Filter* Otomatis Berbasis *Condition-Base Maintenance*

Bemly Hartman^{1*}, Dianta Mustofa Kamal², Fuad Zainuri³

^{1,2,3}Program Studi Rekayasa Teknologi Manufaktur, Politeknik Negeri Jakarta

^{1,2,3}Jln. Prof. DR. G.A. Siwabessy, Kukusan, Beji, Depok City, Jawa Barat, 16425, Indonesia

E-mail: bemlyhartman@gmail.com¹, dianta.mustofakamal@mesin.pnj.ac.id², fuad.zainuri@mesin.pnj.ac.id³

Info Naskah:

Naskah masuk: 12 November 2024

Direvisi: 10 Desember 2024

Diterima: 23 Desember 2024

Abstrak

Peningkatan penggunaan AC split di berbagai sektor memerlukan solusi perawatan yang lebih efisien untuk menjaga kinerja optimal dan meningkatkan efisiensi energi. Metode perawatan berbasis waktu, atau *time-based maintenance* (TBM), yang umum diterapkan sering kali menyebabkan perawatan dilakukan terlalu dini atau terlambat, sehingga mengurangi efisiensi dan meningkatkan biaya operasional. Penelitian sebelumnya belum sepenuhnya mengeksplorasi penerapan perawatan berbasis kondisi, atau *condition-based maintenance* (CBM), dalam perawatan filter AC, khususnya dalam hal pengembangan sistem otomatis. Kesenjangan penelitian terletak pada minimnya solusi berbasis waktu nyata (*real-time*) yang dapat mendeteksi kondisi filter AC secara akurat dan memungkinkan perawatan dilakukan tanpa intervensi manual. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan prototipe pembersih filter AC otomatis berbasis CBM yang mengintegrasikan sensor, mikrokontroler, dan aktuator. Berdasarkan hasil penelitian, sistem ini mampu mengurangi konsumsi energi hingga 58%, mempercepat waktu pembersihan sebesar 75%, serta menghilangkan penggunaan air dalam proses perawatan. Kesimpulannya, prototipe ini menawarkan solusi inovatif untuk meningkatkan efisiensi operasional secara signifikan.

Keywords:

condition-based maintenance;
automatic filter cleaner;
air conditioning split;
design optimization;
self cleaning filter

Abstract

The increasing use of split air conditioners (AC) in various sectors demands efficient maintenance solutions to ensure optimal performance and improve energy efficiency. Time-based maintenance (TBM), the commonly used method, often leads to premature or delayed maintenance, reducing system efficiency and increasing operational costs. Previous studies have not fully explored the application of condition-based maintenance (CBM) for AC filter maintenance, especially in developing automated systems. A significant research gap exists due to the lack of real-time solutions for accurately detecting filter conditions and enabling maintenance without manual intervention. This study aims to develop an automated AC filter cleaner prototype based on CBM by integrating sensors, microcontrollers, and actuators. The results show the system reduces energy consumption by up to 58%, shortens cleaning time by 75%, and eliminates water use. In conclusion, the proposed prototype offers an innovative and efficient solution for enhancing operational performance and reducing costs.

*Penulis korespondensi:

Bemly Hartman

E-mail: bemlyhartman@gmail.com

1. Pendahuluan

Penggunaan *Air Conditioning* (AC) tipe split telah menjadi kebutuhan esensial untuk menjaga kenyamanan termal pada lingkungan perumahan, komersial, maupun industri [1]. Salah satu komponen dalam sistem AC tipe split adalah filter udara, yang memiliki peran krusial dalam mempertahankan kualitas udara [2]-[4], dan kinerja sistem secara keseluruhan [5]. Namun, filter udara yang kotor dapat menimbulkan berbagai permasalahan seperti penurunan efisiensi pendinginan, peningkatan konsumsi energi [6], serta penurunan umur komponen [7]. Oleh karena itu, pemeliharaan komponen filter secara rutin sangat diperlukan untuk memastikan performa optimal sistem AC [8]. Saat ini, perawatan komponen filter AC umumnya dilakukan dengan metode *time-based maintenance* (TBM), yaitu perawatan yang didasarkan pada jadwal waktu tertentu tanpa memperhatikan kondisi aktual filter [9], [10].

Pendekatan metode *time-based maintenance* (TBM) sering kali dianggap kurang efisien. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa biaya perawatan berbasis metode TBM dapat mencapai hingga 75% dari total biaya perawatan selama siklus hidup sistem, yang menyebabkan pemborosan pengeluaran [11]. Selain itu, penelitian lain mengungkapkan bahwa jadwal perawatan AC yang tidak didasarkan pada kondisi aktual filter sering kali mengakibatkan perawatan yang terlambat atau terlalu dini. Perawatan yang terlambat dapat menyebabkan peningkatan konsumsi energi secara signifikan, sedangkan perawatan yang dilakukan terlalu dini dapat berdampak pada kenaikan biaya perawatan secara keseluruhan [12].

Penelitian lebih lanjut menunjukkan bahwa akumulasi kotoran pada filter udara AC berpotensi meningkatkan konsumsi energi hingga lebih dari 20% dibandingkan dengan filter yang dalam kondisi bersih. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan perawatan yang didasarkan pada kondisi aktual filter untuk meningkatkan efisiensi dan mengurangi pemborosan [13].

Kesenjangan penelitian teridentifikasi dalam pemeliharaan filter udara pada AC tipe split berbasis *condition-based maintenance* (CBM), yang hingga kini masih jarang dibahas dalam berbagai studi. Penelitian [14] mengeksplorasi penggunaan teknologi berbasis cloud dan kecerdasan buatan untuk memantau kinerja AC secara *real-time*. Namun, penelitian ini terbatas pada analisis efisiensi energi tanpa mencakup pengembangan sistem otomatisasi untuk proses pembersihan filter.

Sementara itu, penelitian lain [15] mengembangkan sistem pembersihan AC otomatis berbasis metode *time-based maintenance* (TBM). Meski menawarkan solusi parsial, metode TBM memiliki kelemahan utama, yakni pembersihan dilakukan berdasarkan jadwal tetap tanpa mempertimbangkan kondisi aktual filter udara.

Penelitian sebelumnya belum sepenuhnya mengintegrasikan sistem yang memanfaatkan sensor, mikrokontroler, dan aktuator untuk proses pembersihan filter secara otomatis dan *real-time*. Kondisi ini menciptakan kesenjangan yang signifikan dalam pengembangan solusi holistik yang mampu mengurangi konsumsi energi, mempersingkat waktu pembersihan, serta mengoptimalkan

penggunaan sumber daya, seperti air, secara lebih efisien dan ramah lingkungan.

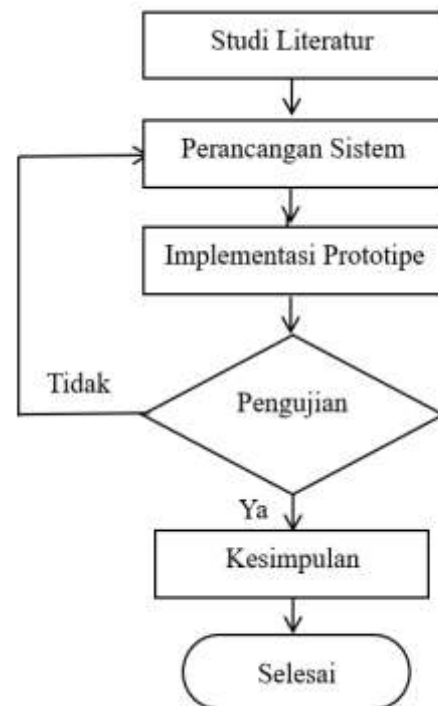
Penelitian ini bertujuan untuk mengisi kesenjangan yang telah diidentifikasi dengan merancang, mengembangkan dan menguji prototipe sistem pembersih filter AC split berbasis *condition-based maintenance* (CBM) yang mampu beroperasi secara otomatis dan *real-time*. Sistem ini mengintegrasikan berbagai komponen, seperti sensor, mikrokontroler, dan aktuator untuk, mendeteksi tingkat kotoran pada filter secara *real-time* serta melaksanakan proses pembersihan secara otomatis.

Selain itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis efisiensi energi melalui perbandingan konsumsi energi antara metode perawatan berbasis waktu (TBM) dan sistem otomatis berbasis CBM. Efektivitas waktu pembersihan juga menjadi perhatian utama dengan mengukur pengurangan durasi aktivitas pembersihan filter pada metode otomatis dibandingkan dengan metode manual.

Penelitian ini juga berupaya menghilangkan penggunaan air dalam proses pembersihan filter guna menciptakan sistem yang lebih ramah lingkungan. Terakhir, *platform internet of things* (IoT) diintegrasikan untuk memungkinkan pemantauan dan pengendalian jarak jauh, sehingga meningkatkan fleksibilitas dan kemudahan operasional. Dengan mencapai tujuan-tujuan tersebut, penelitian ini diharapkan dapat mampu memberikan solusi inovatif yang meningkatkan efisiensi, efektivitas, dan keberlanjutan dalam pemeliharaan filter AC.

2. Metode

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental yang terdiri dari beberapa tahapan utama. Tahapan tahapan tersebut disajikan secara terperinci pada Gambar 1.



Gambar 1. Alur tahapan penelitian.

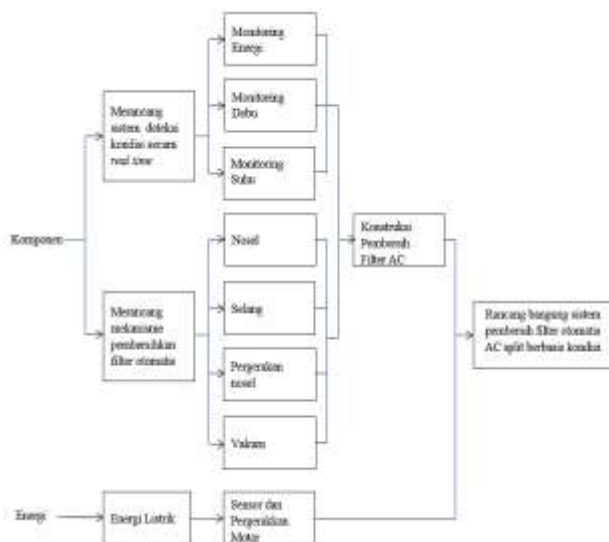
2.1. Studi Literatur

Tahap pertama dalam penelitian ini adalah melakukan kajian literatur. Beberapa teori yang dijadikan landasan penelitian ini meliputi:

- *Air Conditioning* tipe split: AC tipe split bekerja dengan menyerap panas udara di dalam ruangan melalui unit *indoor* dan melepaskannya ke luar melalui unit *outdoor* [16].
- *Condition-Based Maintenance* (CBM): CBM adalah metode pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan kondisi aktual suatu komponen atau sistem, yang dapat diukur melalui parameter fisik seperti getaran atau tekanan [17].
- Sensor: Prinsip kerja sensor adalah mendeteksi perubahan fisik atau lingkungan dan mengubahnya menjadi sinyal listrik yang dapat diukur atau diproses lebih lanjut oleh sistem elektronik atau komputer untuk menghasilkan informasi yang berguna [18].
- Mikrokontroler: Mikrokontroler berfungsi sebagai inti dari sistem elektronik dengan menjalankan instruksi yang tersimpan dalam memori, mengolah data dari perangkat *input*, dan memberikan respon melalui perangkat *output* [19].
- Driver atau modul relay: Driver atau modul relay berfungsi sebagai saklar listrik yang dioperasikan oleh sinyal dari mikrokontroler untuk mengendalikan perangkat berdaya tinggi. Modul ini bekerja dengan mengaktifkan elektromagnet untuk membuka atau menutup kontak, sehingga memungkinkan arus listrik dari sumber daya utama mengalir ke perangkat yang dikendalikan [20].
- Aktuator: Aktuator berfungsi mengubah energi, baik listrik, hidrolis, maupun pneumatik, menjadi gerakan mekanis untuk menggerakkan atau mengontrol bagian tertentu dari sistem [21].

2.2. Perancangan Sistem

Prototipe dirancang dengan mengintegrasikan berbagai komponen elektrik dan mekanik untuk menciptakan sistem yang berfungsi secara sinergis dan efisien.



Gambar 2. Diagram blok perancangan sistem

Diagram blok sistem pada Gambar 2 menunjukkan perancangan sistem pembersih filter AC split otomatis berbasis kondisi. Sistem terdiri dari dua komponen utama, yaitu sistem deteksi kondisi secara *real-time* dan mekanisme pembersihan filter otomatis. Komponen sistem deteksi bertugas memantau parameter energi, debu, dan suhu untuk menentukan waktu yang tepat bagi filter untuk dibersihkan. Energi listrik digunakan untuk mengoperasikan sensor serta mendukung pergerakan motor yang berperan dalam mekanisme pembersihan.

Mekanisme pembersihan melibatkan komponen seperti nosel, selang, sistem pergerakan nosel, dan vakum, yang dirancang agar untuk membersihkan filter secara otomatis. Semua elemen ini mendukung konstruksi sistem yang dirancang agar mampu bekerja secara otomatis berdasarkan kondisi aktual filter AC secara *real-time*.

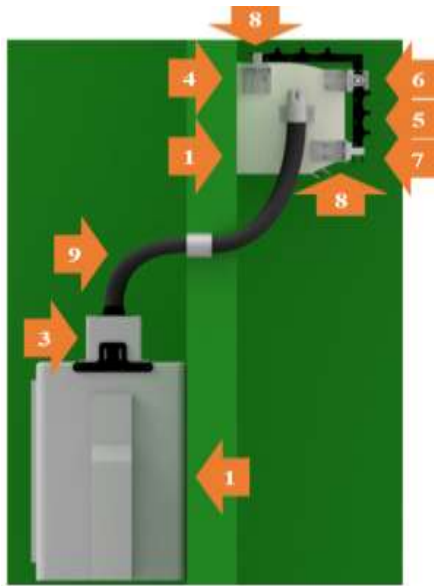
2.3. Implementasi Prototipe

Komponen elektrik dan mekanik dirakit untuk membentuk prototipe sistem pembersih filter otomatis berdasarkan rancangan yang telah dibuat. Gambar 3, Gambar 4 dan Gambar 5 memperlihatkan rancangan perakitan komponen mekanik, yang terdiri dari :

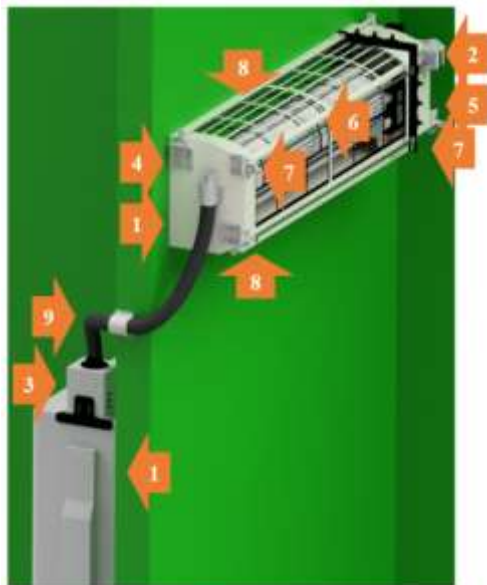
- Unit AC tipe split : Digunakan sebagai objek utama penelitian untuk pembersihan komponen filter udara.
- Motor *stepper* Nema 17: Berfungsi menggerakkan dan mengontrol pergerakan presisi tinggi, khususnya untuk menggerakkan mekanisme pembersih filter otomatis [22].
- Motor vakum: Berfungsi untuk menyedot debu pada filter AC.
- Bracket L: Digunakan sebagai penopang atau penahan berbagai komponen mekanik.
- Nosel: Berfungsi menyedot debu pada filter AC tipe split.
- *Lead screw*: Digunakan untuk menggerakkan nosel secara linier.
- *Bearing*: Berfungsi sebagai penahan *lead screw* dan nosel selama proses pergerakan.
- *Linear Shaft* dan *support*: Digunakan untuk memastikan pergerakan nosel tetap terarah dan stabil.
- Selang: Berfungsi sebagai penghubung antara nosel dan motor vakum.



Gambar 3. Rancangan komponen mekanik tampak depan



Gambar 4. Rancangan komponen mekanik tampak samping



Gambar 5. Rancangan komponen mekanik tampak isometrik

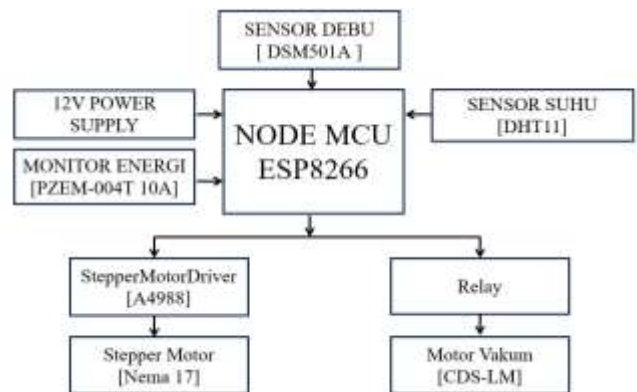
Rancangan komponen elektrik dimulai dengan merancang diagram blok sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 6. Setelah itu, proses dilanjutkan dengan merancang skema rangkaian elektronik yang ditampilkan menggunakan simbol-simbol elektronik, seperti diperlihatkan pada Gambar 7. Skema rangkaian ini menggambarkan cara komponen-komponen tersebut saling dihubungkan melalui garis yang merepresentasikan koneksi listrik.

Adapun komponen elektrik yang digunakan adalah sebagai berikut:

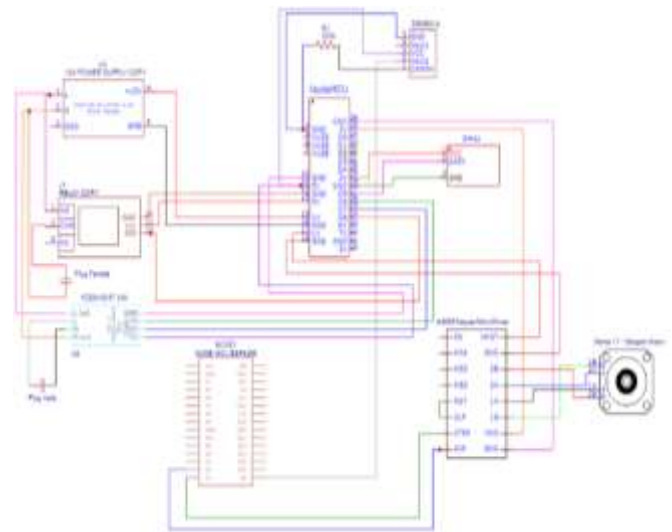
- Sensor debu DSM501A: Berfungsi untuk mendeteksi tingkat kotoran pada filter udara [23].
- Sensor suhu DHT11: Digunakan untuk mengukur temperatur atau suhu serta kelembaban di sekitar area komponen filter [24],[25].
- Sensor parameter listrik PZEM004T: Berfungsi untuk mengukur berbagai parameter listrik,

termasuk tegangan, arus, daya, energi dan frekuensi dari sistem listrik AC [26].

- Microcontroller ESP8266: Digunakan untuk menghubungkan perangkat ke internet, sehingga memungkinkan pemantauan, pengendalian jarak jauh, dan komunikasi data dalam aplikasi *Internet of Things* (IoT) [27],[28].
- Driver stepper A4988: Berfungsi untuk mengendalikan motor stepper bipolar dalam berbagai aplikasi yang memerlukan kontrol gerakan yang presisi [29].
- Modul Relay 5V: Digunakan untuk menghubungkan dan memutus aliran listrik ke motor vakum [30].



Gambar 6. Diagram blok komponen elektrik



Gambar 7. Skema rangkaian elektronik

2.4. Pengujian Prototipe

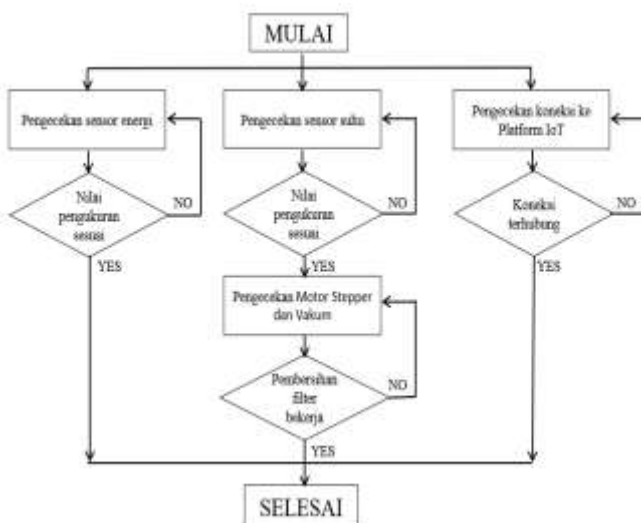
Alur pengujian prototipe yang ditunjukkan pada Gambar 8 memperlihatkan tahapan pengujian sistem pembersih filter udara pada AC split berbasis *condition-based maintenance* (CBM). Proses pengujian ini dilakukan secara sistematis dengan tujuan memastikan setiap komponen sistem berfungsi secara optimal sebelum diterapkan secara penuh. Adapun tahapan pengujian dimulai dari :

1. Pengecekan sensor energi.
Pada tahap ini, sensor energi (PZEM004T) diuji untuk memastikan kemampuan dalam mengukur parameter listrik, seperti tegangan, arus, daya dan energi, secara akurat. Apabila hasil pengukuran tidak sesuai dengan standar yang diharapkan, proses dihentikan untuk melakukan kalibrasi atau perbaikan. Sebaiknya, jika hasil pengukuran sesuai, sistem akan melanjutkan ke tahap berikutnya.
2. Pengecekan sensor suhu.
Sensor suhu (DHT11) diperiksa untuk memastikan kemampuan dalam mendeteksi suhu dan kelembapan lingkungan dengan tepat. Jika nilai pengukuran tidak sesuai, sistem memerlukan kalibrasi atau penggantian perangkat. Namun, jika pengukuran sesuai, proses dilanjutkan ke tahapan berikutnya.
3. Pengecekan koneksi ke platform IoT
Tahapan ini bertujuan memverifikasi konektivitas sistem ke *platform Internet of Things (IoT)* melalui modul ESP8266. Jika koneksi gagal, konfigurasi jaringan diperbaiki hingga berhasil. Koneksi yang berhasil memungkinkan sistem melanjutkan ke tahap pengujian komponen mekanis.

Setelah ketiga langkah awal selesai, proses dilanjutkan ke tahap pengujian komponen mekanik, yang meliputi:

1. Pengecekan motor stepper dan motor vakum: Motor stepper (NEMA 17) dan motor vakum diuji untuk memastikan mekanisme pembersihan filter dapat berjalan dengan lancar. Apabila terjadi kegagalan pada salah satu komponen, pengujian dihentikan untuk melakukan perbaikan atau pengganti komponen yang bermasalah.
2. Simulasi mekanisme pembersihan filter
Sistem melakukan simulasi mekanisme pembersihan filter guna memastikan keseluruhan proses berfungsi sesuai dengan desain yang dirancang.

Proses pengujian ini bertujuan untuk meminimalkan risiko kegagalan operasional serta memastikan keandalan sistem dalam membersihkan filter AC secara otomatis.



Gambar 8. Alur pengujian prototipe

3. Hasil dan Pembahasan

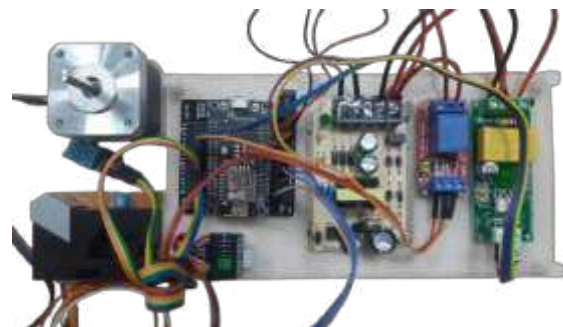
Hasil rancang bangun prototipe sistem pembersih AC split berbasis kondisi. Pada Gambar 9 dan Gambar 10, diperlihatkan hasil perakitan komponen-komponen mekanik, sedangkan pada Gambar 11 ditampilkan hasil perakitan komponen-komponen elektrik.



Gambar 9. Hasil perakitan bagian mekanik tampak depan



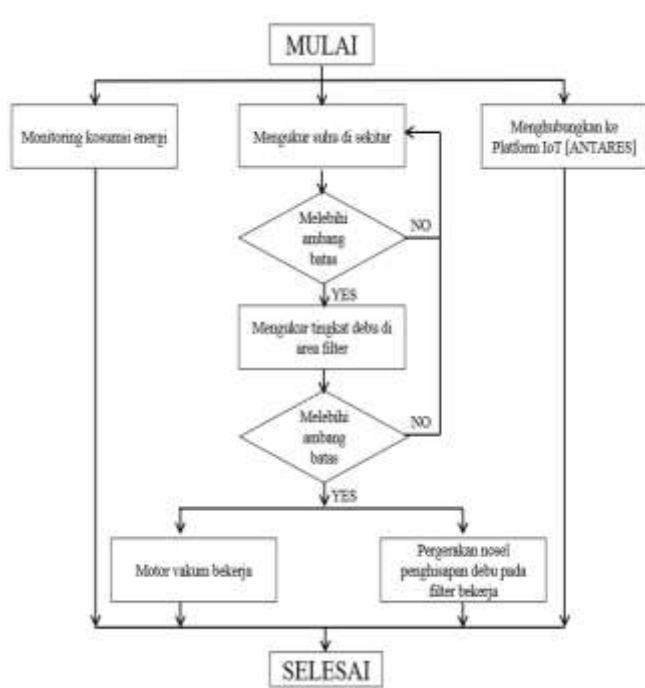
Gambar 10. Hasil perakitan mekanik tampak samping



Gambar 11. Hasil perakitan komponen elektrik

Proses kerja hasil dari perakitan komponen mekanik dan elektrik dapat dilihat pada Gambar 12. Proses ini diawali dengan memonitor konsumsi energi sistem untuk mendeteksi adanya anomali yang dapat mengindikasikan peningkatan beban akibat filter yang kotor. Secara paralel, sistem juga melakukan pengukuran suhu di sekitar area filter menggunakan sensor suhu. Apabila suhu melebihi ambang batas yang telah ditentukan, sistem melanjutkan proses dengan mengukur tingkat debu pada area filter menggunakan sensor debu.

Jika tingkat debu melebihi ambang batas yang telah ditetapkan, sistem secara otomatis mengaktifkan motor vakum untuk menyedot debu yang menumpuk pada filter. Bersamaan dengan itu, mekanisme pergerakan nosel pembersih diaktifkan untuk memastikan seluruh permukaan filter dibersihkan secara merata. Seluruh data yang diperoleh selama proses ini dikirimkan ke *platform internet of things* (IoT) melalui koneksi internet, sehingga memungkinkan pemantauan dan kontrol jarak jauh. Setelah proses pembersihan selesai, sistem kembali ke kondisi awal dan terus memantau parameter untuk menjalankan siklus berikutnya jika diperlukan.



Gambar 12. Alur kerja prototipe sistem pembersih filter

3.1. Pengukuran Konsumsi Energi

Salah satu tujuan utama dari penelitian ini adalah meningkatkan efisiensi energi dalam perawatan AC tipe split melalui penerapan sistem pembersih filter berbasis *condition-based maintenance* (CBM).

Tabel 1. Konsumsi energi untuk satu kali pembersihan

Metode Pembersihan	Konsumsi Energi (kWh)
Metode manual TBM	0,06
Metode otomatis CBM	0,025

Berdasarkan pengukuran konsumsi energi yang ditampilkan pada Tabel 1, sistem otomatis berbasis CBM memiliki efisiensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan metode manual berbasis TBM. Konsumsi energi untuk satu kali aktivitas pembersihan pada metode otomatis berbasis CBM adalah sebesar 0,025 kWh, sedangkan pada metode manual berbasis TBM adalah sebesar 0,06 kWh. Dengan demikian, implementasi metode otomatis CBM mampu mengurangi konsumsi energi hingga 58%.

Efisiensi energi yang signifikan pada metode otomatis CBM disebabkan oleh kemampuan sistem mendeteksi kondisi aktual filter, sehingga pembersihan hanya dilakukan ketika diperlukan. Hal ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa pendekatan berbasis otomatis dapat mengurangi konsumsi energi hingga 50% melalui penerapan teknologi berbasis kondisi. Pada prototipe yang dikembangkan, sistem dalam mode siaga mengonsumsi daya sebesar 0,77 Wh, sedangkan konsumsi daya selama operasional aktif mencapai 1,02 Wh. Nilai ini tetap berada dalam batas efisiensi untuk sistem berbasis *internet of things* (IoT) .

3.2. Durasi Aktifitas Pembersihan

Berdasarkan hasil analisa yang ditunjukkan pada Tabel 2, diketahui bahwa metode manual berbasis TBM memerlukan durasi yang lama. Selain waktu yang dibutuhkan untuk melakukan pembersihan filter, tambahan waktu juga diperlukan untuk menyiapkan peralatan pendukung. Durasi aktivitas ini akan semakin panjang apabila kondisi filter telah mencapai tingkat kotoran yang signifikan.

Tabel 2. Durasi aktifitas untuk satu kali pembersihan

Metode Pembersihan	Aktifitas (minute)
Metode manual TBM	15
Metode otomatis CBM	2.5

Durasi aktivitas pembersihan pada metode otomatis CBM hanya memerlukan waktu 2,5 menit per siklus pembersihan. Hal ini jauh lebih cepat dibandingkan dengan metode manual berbasis TBM yang memerlukan waktu hingga 15 menit. Dengan demikian, sistem otomatis CBM mampu mengurangi durasi pembersihan hingga 75%. Kecepatan pembersihan pada metode otomatis CBM dicapai melalui eliminasi langkah-langkah manual, seperti persiapan alat pembersih dan pemindahan komponen filter. Sistem otomatis ini meningkatkan responsivitas dengan memanfaatkan sensor debu yang mendeteksi tingkat kotoran secara *real-time*, sehingga dapat langsung mengaktifkan aktuator dan motor vakum untuk membersihkan debu dari filter. Penelitian sebelumnya mendukung temuan ini dengan menunjukkan bahwa pendekatan otomatis lebih efisien dibandingkan metode manual. Hasil penelitian mereka juga mengungkapkan pengurangan signifikan dalam durasi operasional manual, yang memperluas dampak efisiensi dari sistem otomatis.

3.3. Penggunaan Media Air

Pembersihan sebelumnya menggunakan air sebagai media untuk membersihkan komponen filter pada metode manual TBM. Dengan penerapan sistem pembersihan filter AC split berbasis kondisi yang menggunakan proses vakum untuk menghilangkan debu, penggunaan air dapat diminimalkan. Informasi terkait pengurangan penggunaan air ditunjukkan pada Table 3.

Tabel 3. Penggunaan media air untuk satu kali pembersihan

Metode Pembersihan	Media Air (liter)
Metode manual TBM	6
Metode otomatis CBM	0

Metode otomatis CBM berbasis vakum tidak memerlukan penggunaan air sama sekali, sementara metode manual TBM sebelumnya membutuhkan 6 liter air untuk satu kali pembersihan filter. Dengan demikian, metode otomatis CBM menghemat penggunaan air hingga 100%.

Penghapusan media air dalam proses pembersihan merupakan salah satu keunggulan utama dari rancangan prototipe sistem berbasis CBM ini. Vakum otomatis menggantikan air sebagai media pembersih, yang membuat sistem ini lebih hemat sumber daya dan ramah lingkungan. Hasil ini mendukung keberlanjutan dengan mengurangi ketergantungan pada air sebagai sumber daya.

4. Kesimpulan

Kesimpulan dari penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan sistem pembersih filter otomatis berbasis *condition-based maintenance* (CBM) pada AC tipe split berhasil meningkatkan efisiensi energi, mengurangi durasi proses pembersihan, serta menghilangkan kebutuhan penggunaan air sebagai media pembersih. Hal ini terbukti dari hasil yang menyatakan bahwa sistem ini mampu mengurangi konsumsi energi hingga 58% dan waktu pembersihan sebesar 75%. Selain itu, sistem ini juga menawarkan solusi yang ramah lingkungan dengan menghilangkan penggunaan air secara total. Integrasi teknologi *internet of things* (IoT) dalam sistem ini memberikan kemampuan pemantauan dan pengendalian jarak jauh, sehingga meningkatkan fleksibilitas dan skalabilitas sistem. Dengan demikian, sistem ini mampu mengurangi ketergantungan pada tenaga kerja manusia, menjadikannya solusi inovatif dalam mengatasi keterbatasan metode *time-based maintenance* (TBM).

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar prototipe diuji pada berbagai kondisi lingkungan yang lebih ekstrem. Selain itu, integrasi dengan sistem CBM berbasis kecerdasan buatan (*artificial intelligence*) diharapkan dapat meningkatkan akurasi dan efektivitas dalam memprediksi kebutuhan pembersihan filter di masa depan.

Daftar Pustaka

- [1] A. D. Soewono, N. Viriya, L. Andreas, H. Gunawan, and M. Darmawan, "Rancang Bangun Sistem Pendingin Evaporatif Berbasis Penyemprotan Air Untuk

Meningkatkan Performa Air Conditioner," *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 7, no. 3, 2023, doi: 10.33379/gtech.v7i3.2673.

- [2] P. Palulun, Y. D. Rasita, N. Massi, R. Sjahril, S. Katu, and I. Pattelongi, "Identification of Airborne Aerobic Bacteria in the Intensive Care Room Using Maldi-Tof Ms," *Jurnal Kesehatan Lingkungan*, vol. 16, no. 1, pp. 68–75, 2024, doi: 10.20473/jkl.v16i1.2024.68-75.
- [3] Z. Liu, Y. Deng, S. Ma, B. J. He, and G. Cao, "Dust accumulated fungi in air-conditioning system: Findings based on field and laboratory experiments," *Build Simul*, vol. 14, no. 3, pp. 793–811, 2021, doi: 10.1007/s12273-020-0693-3.
- [4] I. P. Widiarta, M. Suarda, M. Sucipta, and I. G. K. Sukadana, "Simulasi CFD Pertukaran Udara di Ruang Tindakan Klinik Kesehatan," *Jurnal METTEK*, vol. 8, no. 2, p. 83, 2022, doi: 10.24843/mettek.2022.v08.i02.p03.
- [5] S. Arief, "Analisa Kerusakan dan Pengaruh Variasi Massa Refrigerant Terhadap Koefisien Prestasi (COP) Sistem Pengkondisian Udara AC Praktikum Lab Mesin," *Mechonversio: Mechanical Engineering Journal*, vol. 3, no. 1, p. 29, 2020, doi: 10.51804/mmej.v3i1.837.
- [6] M. A. Rozaq, B. Sukoco, and D. Nugroho, "Analisa Pengaruh Setting Suhu Air Conditioner Terhadap Konsumsi Energi Listrik Pada Air Conditioner Kapasitas 5 Pk Type PSF 5001," *Konferensi Ilmiah Mahasiswa UNISSULA*, pp. 354–369, 2019, [Online]. Available: <http://lppm-unissula.com/jurnal.unissula.ac.id/index.php/kimueng/article/download/8603/3964>
- [7] S. Nasional, U. M. Sidoarjo, and I. B. Utomo, "Examination of the Air Conditioning System of Toyota Avanza Car at CV . Cipta Artha Berlian Pasuruan Pemeriksaan Sistem AC Mobil Toyota Avanza di CV . Cipta Artha Berlian Pasuruan," vol. 7, pp. 549–554, 2024.
- [8] R. Bachrul Ulum, Tarman, H. Firmansyah, and R. F. Ramdhani, "RELIABILITY CENTERED MAINTENANCE (RCM) DALAM MENGANALISIS PADA PRECISION AIR CONDITIONING (PAC) DI PT XYZ," *Jurnal Teknologika*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: 10.51132/teknologika.v13i1.239.
- [9] F. Amri and I. Fitriyanto, "Pelatihan Perawatan (Maintenance) AC Split Wall di SMA Negeri 1 Sliyeg, Kabupaten Indramayu," *Jurnal Pengabdian Pada Masyarakat Indonesia*, vol. 1, no. 6, 2022, doi: 10.55542/jppmi.v1i6.377.
- [10] D. Suryanto, "Analisis Perawatan Ac (Air Conditioner) Unit Split Duct Menggunakan Metode Failure Mode and Effect Analysis Fmea Di Hotel Harris Yello," *JITMI (Jurnal Ilmiah Teknik dan Manajemen Industri)*, vol. 3, no. 1, p. 67, 2020, doi: 10.32493/jitmi.v3i1.y2020.p67-75.
- [11] N. Es-sakali, M. Cherkaoui, M. O. Mghazli, and Z. Naimi, "Review of predictive maintenance algorithms applied to HVAC systems," *Energy Reports*, vol. 8, no. November, pp. 1003–1012, 2022, doi: 10.1016/j.egyr.2022.07.130.
- [12] H. T. Alassafi, K. S. Al-Gahtani, A. S. Almohsen, and A. M. Alsugair, "HVAC maintainability risks in healthcare facilities: a design optimization perspective," *Facilities*,

- vol. 42, no. 15–16, pp. 30–52, 2024, doi: 10.1108/F-09-2022-0121.
- [13] T. Lin, O. A. Zargar, Z. Q. Wang, S. C. Hu, Y. C. Shih, and G. Leggett, “Energy saving for an air conditioning system applied in a thin-film-transistor liquid-crystal display (TFT LCD) high-tech fabrication plant (Fab),” *International Journal of Thermofluids*, vol. 16, 2022, doi: 10.1016/j.ijft.2022.100210.
- [14] D. Lee and F. P. Tsai, “Air conditioning energy saving from cloud-based artificial intelligence: Case study of a split-type air conditioner,” *Energies (Basel)*, vol. 13, no. 8, 2020, doi: 10.3390/en13082001.
- [15] L. Lloren *et al.*, “Design and Prototype Development of a Self-Cleaning Portable Air Conditioning Device and System I.” [Online]. Available: www.ijisrt.com
- [16] A. Zayadi, K. Yoga Utomo, A. Sugiaharto, W. S. C. HP, and A. R. Madaskala, “Analisis Sebelum dan Sesudah Dilakukan Proses Pembersihan Terhadap Performa AC Tipe Split Wall Kapasitas 1 1/2 PK,” *Jurnal Teknologi Kedirgantaraan*, vol. 6, no. 1, 2021, doi: 10.35894/jtk.v6i1.19.
- [17] J. H. Shin and H. B. Jun, “On condition based maintenance policy,” *J Comput Des Eng*, vol. 2, no. 2, pp. 119–127, 2015, doi: 10.1016/j.jcde.2014.12.006.
- [18] M. Javaid, A. Haleem, S. Rab, R. Pratap Singh, and R. Suman, “Sensors for daily life: A review,” 2021. doi: 10.1016/j.sintl.2021.100121.
- [19] U. Chaurasia and S. G. Desai, “Industrial Automation using Microcontroller,” *INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATIVE RESEARCH IN TECHNOLOGY*, vol. 7, no. 8, 2021.
- [20] T. Zaman, A. Adhikary, and Md. Ashikur, “Microcontroller based Industrial Automation System using Temperature Sensor and Output Logic Control,” *Int J Comput Appl*, vol. 178, no. 43, 2019, doi: 10.5120/ijca2019919326.
- [21] F. A. C. Alegria, *Sensors and Actuators*. 2021. doi: 10.1142/12426.
- [22] E. M. Sitorus, I. M. A. D. Suarjaya, and I. P. A. Bayupati, “Design and Development of an Internet of Things Based Package Reception Box System,” *Jurnal Ilmiah Merpati (Menara Penelitian Akademika Teknologi Informasi)*, vol. 11, no. 2, 2023, doi: 10.24843/jim.2023.v11.i02.p02.
- [23] A. Y. P. Wardoyo, C. K. Pratama, H. A. Dharmawan, M. Nurhuda, and E. T. P. Adi, “A design of short distance PM2.5 monitoring system using a bluetooth module,” *J Phys Conf Ser*, vol. 1825, no. 1, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1825/1/012028.
- [24] M. Haller, “DHT11 Sensor: A Comprehensive Study on Temperature and Humidity Sensor,” *Interantional Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, vol. 08, no. 03, pp. 1–11, 2024, doi: 10.55041/ijsem29310.
- [25] Rizki juli syahputra, “Monitoring The Temperature And Humidity Air In The Room Using A Sensor IOT-Based DHT-11,” *Journal of Artificial Intelligence and Engineering Applications (JAIEA)*, vol. 3, no. 1, pp. 363–367, 2023, doi: 10.59934/jaiea.v3i1.329.
- [26] I. Surya *et al.*, “Sistem monitoring beban listrik dan perbaikan faktor daya menggunakan PZEM004T dan dashboard Adafruit berbasis IoT,” *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)*, vol. 3, no. 3, pp. 235–246, 2023, doi: 10.35313/jitel.v3.i3.2023.235-246.
- [27] A. Arafat, “SISTEM PENGAMANAN PINTU RUMAH BERBASIS Internet Of Things (IoT) Dengan ESP8266,” *Technologia : Jurnal Ilmiah*, vol. 7, no. 4, pp. 262–268, 2016, doi: 10.31602/tji.v7i4.661.
- [28] A. P. Pradana, N. Aminudin, F. Rizki, and D. Feriyanto, “Design and Building of an Automatic Water Filling System on Water Container Media Based on Arduino Esp8266,” *IJOEM Indonesian Journal of E-learning and Multimedia*, vol. 3, no. 1, pp. 14–21, 2024, doi: 10.58723/ijoem.v3i1.233.
- [29] I. Pratama and R. Pangestu, “Rancang bangun alat cutting stiker berbasis arduino nano,” *Jurnal Teknik Elektro*, vol. 6, no. 2, 2022, doi: 10.31000/jte.v6i2.9781.
- [30] D. M. Sepudin and S. Abdullah, “Sistem Keamanan Pintu Rumah Berbasis Internet of Things Berbasis NodeMCU ESP32 dan Telegram,” *Jurnal RESTIKOM: Riset Teknik Informatika dan Komputer*, vol. 4, no. 3, 2023, doi: 10.52005/restikom.v4i3.99.