

PEMANTAUAN KONSUMSI ENERGI LISTRIK PADA PROSES END MILLING BERBASIS STEP-NC MENGGUNAKAN AKUISISI ARUS LISTRIK DENGAN MEMPERTIMBANGKAN FILTER BATAS ATAS DAN BAWAH ARUS LISTRIK

Aldi Ramadhan^{1*}, Mohammad Mi'radj Isnaini²

^{1,2}Institut Teknologi Bandung; Jl. Ganesha No. 10, Bandung, 40132, Indonesia; +62222500935,

Keywords:

STEP-NC; pemantauan konsumsi energi listrik; CNC milling; akuisisi arus listrik; filter IQR.

Correspondent Email:

23424012@mahasiswa.itb.ac.id

Abstrak. Peningkatan efisiensi energi pada proses pemesinan merupakan salah satu tantangan dalam implementasi manufaktur cerdas berbasis Industri 4.0. Sebagian besar mesin CNC konvensional belum menyediakan informasi konsumsi energi listrik secara *real-time* yang terintegrasi dengan data proses pemesinan. Penelitian ini mengembangkan sistem pemantauan konsumsi energi listrik pada proses *end milling* berbasis STEP-NC menggunakan akuisisi arus listrik secara *non-intrusive* dengan mempertimbangkan *filter* batas atas dan batas bawah arus listrik. Data eksperimen diperoleh melalui produksi aktual. Sistem dibangun menggunakan sensor arus SCT-013, ESP32, *Firestore Services*, *Google Services*, dan dokumen XML STEP-NC sebagai media integrasi informasi proses dan konsumsi energi. Penyaringan data dilakukan menggunakan metode *Interquartile Range* (IQR) per *Run_ID* dengan batas bawah 2 A dan batas atas 33 A untuk menghilangkan data *idle* dan lonjakan arus yang tidak merepresentasikan proses pemotongan. Hasil implementasi menunjukkan bahwa sistem mampu menghasilkan informasi konsumsi arus listrik motor *spindle* yang lebih representatif dan terintegrasi dengan laporan produksi serta *dashboard* pemantauan. Evaluasi sistem menghasilkan nilai arus listrik yang sesuai dengan spesifikasi motor *spindle*, sehingga sistem layak digunakan untuk pemantauan konsumsi energi listrik pada proses CNC *milling* berbasis STEP-NC.



Copyright © 2026 The Author(s), Published by Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0).

Abstract. Improving energy efficiency in machining processes is a key challenge in Industry 4.0-based smart manufacturing. Most conventional CNC machines do not provide real-time electrical energy consumption information integrated with machining process data. This study develops a STEP-NC-based electrical energy consumption monitoring system for end milling using non-intrusive current acquisition with upper and lower current limit filtering. Experimental data were collected from actual production processes. The proposed system integrates an SCT-013 current sensor, ESP32, *Firestore Services*, *Google Services*, and STEP-NC XML documents to connect machining process information with electrical energy consumption data. Current signals were filtered using the *Interquartile Range* (IQR) method for each *Run_ID* with thresholds of 2 A and 33 A to remove idle conditions and abnormal current spikes that do not represent the cutting process. The implementation results show that the system provides more representative spindle motor current consumption information integrated with production reports and monitoring dashboards. The measured current values are consistent with the spindle motor specifications, indicating that the proposed

system is suitable for real-time electrical energy consumption monitoring in STEP-NC-based CNC milling processes.

1. PENDAHULUAN

Energi listrik merupakan elemen penting dalam kehidupan masyarakat modern, terutama menjadi elemen yang mendukung keberlangsungan aktivitas di sektor manufaktur [1]. Kemampuan untuk mengetahui konsumsi energi listrik secara rinci pada proses pemesinan menjadi peran penting pada industri manufaktur, terutama pada skema produksi job-shop dengan lot-size satu pada IKM (Industri Kecil Menengah) [2]. IKM yang bergerak di bidang pengolahan barang manufaktur berkontribusi sekitar 5,85% dari total IKM nasional [3]. Berdasarkan data IKM tersebut upaya untuk meningkatkan kebaruan teknologi pada konsumsi energi listrik di IKM *job-shop*, dengan cara menyediakan perangkat atau metode untuk mengetahui energi listrik per produk secara *real-time*. Pemanfaatan sensor *non-intrusive* dan *microcontroller* untuk mengetahui konsumsi energi listrik secara *real-time* melalui arus listrik pada mesin *Computer*

Numerical Control (CNC) dengan biaya yang terjangkau [4].

Revolusi Industri 4.0 menciptakan integrasi antara proses fisik dan digital pada suatu sistem, integrasi tersebut bersifat horizontal, vertikal, dan transformasi teknologi sepanjang value chain perusahaan [5]. Pada revolusi industri 4.0 terdapat *enabler* yang merupakan elemen yang memungkinkan untuk transformasi digital dan otomatisasi proses industri atau lebih umum disebut juga *Internet of Things* (IoT) dan *dashboard real-time* [6][7]. Hasil pengumpulan data yang berada di *database* dapat diolah dengan *platform* pendukung yang lain [4]. Terdapat standar pada mesin CNC dengan sistem informasi komputer yang saling terintegrasi untuk bertukar informasi dengan bahasa *express* yang dapat dipahami, yaitu *Standard for the Exchange of Product model data for Numerical Control* (STEP-NC) [8]. Pada Tabel I merupakan *State of The Art* (SoTA) penelitian.

Tabel 1. *State of The Art* (SoTA) Penelitian

No	Penulis	Tahun	Energi listrik berdasarkan arus listrik pada motor CNC	Parameter fisik Proses Pemesinan	STEP-NC	Fitur pemesinan	<i>Non-intrusive sensor</i>	<i>Filter</i> arus listrik
1	Romero-Troncoso dkk.	2003	✓	✓			✓	✓
2	Li dkk.	2020	✓				✓	✓
3	Jamshidi dkk.	2022	✓				✓	✓
4	Cheng dkk.	2022		✓	✓	✓		
5	Pantazis dkk.	2023	✓	✓		✓		
6	Sulistyo dkk.	2023	✓				✓	
7	Zhang dkk.	2025		✓	✓	✓		
8	Augustine dkk.	2026	✓	✓			✓	✓
9	Aldi R.	2026	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Penelitian terkait konsumsi energi pada proses pemesinan CNC telah berkembang dalam beberapa arah utama. Peneliti terkait pemantauan arus listrik menunjukkan adanya hubungan konsumsi energi listrik yang lebih mendasar pada motor *spindle* dan ketiga motor sumbu dengan proses pemesinan, penelitian tersebut mengiterintegrasi konsumsi energi listrik melalui arus listrik pada motor mesin CNC dengan IoT [4]. Penelitian lainnya mengembangkan pendekatan berbasis STEP-NC dan fitur pemesinan, tetapi tidak

mengaitkannya dengan konsumsi energi maupun data aktual dari sensor mesin [8][9]. Di sisi lain, terdapat penelitian yang mengembangkan *virtual machining energy toolkit* berbasis *G-code* yang mampu monitoring konsumsi energi, namun masih terbatas pada pendekatan simulasi dan belum mengintegrasikan data sensor aktual secara langsung [10].

Penelitian tentang akuisisi arus listrik menunjukkan bahwa akuisisi arus listrik pada mesin CNC dapat dilakukan secara *real-time*

menggunakan pendekatan IoT, tetapi belum dikembangkan lebih lanjut untuk filtering noise arus listrik [4]. Selain itu, penelitian tentang akuisisi arus listrik yang lain menekankan pentingnya tahap *preprocessing* dan *filtering* sinyal arus listrik, seperti *signal conditioning*, segmentasi sinyal, dan analisis statistik untuk mengurangi *noise* serta memisahkan kondisi *cutting* dan *non-cutting* [11][12][13][14]. Namun, penelitian – penelitian tersebut umumnya berfokus pada *tool condition monitoring* atau deteksi anomali, bukan pada upaya untuk menghilangkan *noise* pada sensor *non-intrusive clamp* arus listrik.

Pendekatan *non-intrusive* sensor pada pemantauan arus listrik mesin CNC lebih cocok untuk implementasi lapangan karena sensor dapat dipasang pada kabel fasa atau jalur arus tanpa mengganggu area pemotongan, seperti *clamp-type AC current sensor* [4][13]. Penelitian lainnya menunjukkan bahwa sinyal driver current memang dapat dianalisis, tetapi memerlukan proses *filtering* untuk memisahkan komponen *noise* dan efek mekanis yang tidak diinginkan [12]. Pendekatan yang lebih instrumentatif, seperti model energi berbasis G-code dan validasi pengukuran pada V_MET, lebih menuntut representasi proses dan pengukuran yang lengkap dibanding sensor arus *clamp* sederhana [10]. Kebutuhan IKM sesuai dengan sensor *non-intrusive* berbasis Arduino secara *Doing It Yourself* (DIY) menjadi pilihan yang menarik dengan biaya yang relatif terjangkau, instalasi sensor yang mudah dipasang, dan layak untuk monitoring status arus listrik secara *real-time* melalui kombinasi Arduino Nano, Wemos D1, dan sensor arus murah seperti SCT-013 [4][13][14]. Berdasarkan penjelasan artikel pada paragraf sebelumnya dapat disimpulkan bahwa belum terdapat penelitian yang secara terintegrasi menggabungkan akuisisi arus listrik secara *real-time* menggunakan sensor *non-intrusive* yang terjangkau untuk IKM, representasi fitur berbasis STEP-NC, dan proses filtering sinyal untuk meningkatkan kualitas data.

PT ABC merupakan perusahaan dengan sistem produksi *Job Shop* (JS) yang memproduksi *spare parts* pemesinan untuk membantu memenuhi permintaan kebutuhan *spare parts* pada industri, salah satu industri tersebut adalah industri otomotif. PT ABC memiliki kendala dalam mengelola konsumsi

energi listrik pada mesin *Computer Numerical Control* (CNC) setiap proses produksi *spare parts*, kendala tersebut adalah PT ABC tidak terdapat teknologi yang mampu mengetahui konsumsi energi listrik (arus) selama proses pemesinan. Pemantauan konsumsi energi listrik pada motor mesin CNC secara *real-time* memberikan celah penelitian untuk membuat standar STEP-NC integrasi arus listrik pada motor spindle dan motor axis X, Y, Z [4].

STEP-NC merupakan data pemesinan yang disimpan secara informatif, terstruktur, dan mudah dipertukarkan dengan integrasi komputer (*data exchange*) dengan bahasa express atau bahasa express graph [15]. STEP-NC dapat membantu terhadap keputusan manajemen berdasarkan proses produksi yang dijalankan [16]. STEP-NC adalah standar internasional (ISO 14649 & ISO 10303-238) bentuk informasi proses pemesinan yang universal, serta STEP-NC dapat bersifat extension untuk mengembangkan dari standar yang sudah ada (misal: ISO 14649 atau ISO 10303-238 (AP238) [8]. Pendekatan extension dapat dipilih karena tidak merubah struktur dari standar yang sudah dibuat, serta memudahkan untuk melakukan pengembangan STEP-NC tanpa harus mengubah standar yang sudah dibuat [8].

Berdasarkan analisis kesenjangan dari penelitian sebelumnya, dapat diketahui bahwa konsumsi energi listrik pada proses pemesinan CNC telah dapat dipantau secara *real-time*. Selain itu, penggunaan sensor *non-intrusive* seperti sensor arus SCT-013 dan mikrokontroler menunjukkan bahwa pemantauan arus listrik dapat diimplementasikan secara lebih terjangkau pada IKM. Kebutuhan industri seperti PT ABC menuntut adanya sistem mampu memantau konsumsi energi dengan akuisisi arus listrik, *filtering noise* arus listrik, dan mampu mengekstraksi informasi proses pemesinan secara langsung dan terstruktur. Keberadaan standar STEP-NC AP-238 pada PT ABC membuka peluang untuk menghubungkan data proses dan konsumsi energi dengan akuisisi arus listrik dalam format yang lebih interoperabel, termasuk melalui dokumentasi berbasis *Extensible Markup Language* (XML).

2. TINJAUAN PUSTAKA

Bagian ini menjelaskan menjelaskan teori dan konsep yang berkaitan dengan penelitian ini.

2.1. *Akuisisi Data Arus Listrik pada Motor 3 Fasa*

Pengukuran arus listrik merupakan metode yang efektif untuk memantau konsumsi energi mesin. Sensor arus *non-intrusive* seperti *current transformer* memungkinkan pengukuran tanpa memutus rangkaian Listrik [4][15]. Pada sistem tenaga tiga fasa (U, V, dan W) yang beroperasi dalam kondisi beban seimbang, arus pada setiap fasa memiliki besar yang relatif sama dengan perbedaan sudut fasa sebesar 120° [17]. Pengukuran arus listrik pada salah satu fasa dapat digunakan sebagai representasi kondisi operasi sistem secara keseluruhan selama tidak terjadi ketidakseimbangan beban [18]. Penerapan pemantauan kondisi mesin CNC menggunakan sensor arus *non-intrusive* yang dipasang pada salah satu konduktor fasa untuk memperoleh karakteristik beban motor *spindle* [13]. Metode sensor arus *non-intrusive* memiliki keunggulan berupa biaya rendah, kemudahan implementasi, serta tidak mengganggu operasi mesin. Namun, metode ini memiliki keterbatasan dalam kondisi beban tidak seimbang, sehingga perlu diperhatikan dalam analisis.

2.2. *Filter Arus Listrik*

2.2.1. *Pra-pemrosesan Data Arus Listrik Menggunakan IQR*

Pada tahap awal pengolahan data, sinyal arus listrik perlu dilakukan pra-pemrosesan untuk mengurangi pengaruh noise dan nilai yang tidak representatif. Salah satu metode yang umum digunakan untuk pra-pemrosesan data adalah *Interquartile Range* (IQR) atau jangkauan antar kuartil, dimana nilai di luar batas ($Q3 + 1.5 \times IQR$) dikategorikan sebagai outlier potensial [19]. Metode IQR banyak digunakan karena tidak sensitif terhadap distribusi data yang ekstrem [19]. Sinyal arus listrik menunjukkan bahwa sinyal arus listrik cenderung mengandung fluktuasi dan *noise* akibat dinamika proses pemotongan [14].

2.2.2. *Penetapan Ambang Batas Bawah Arus Listrik Sebesar 2 A*

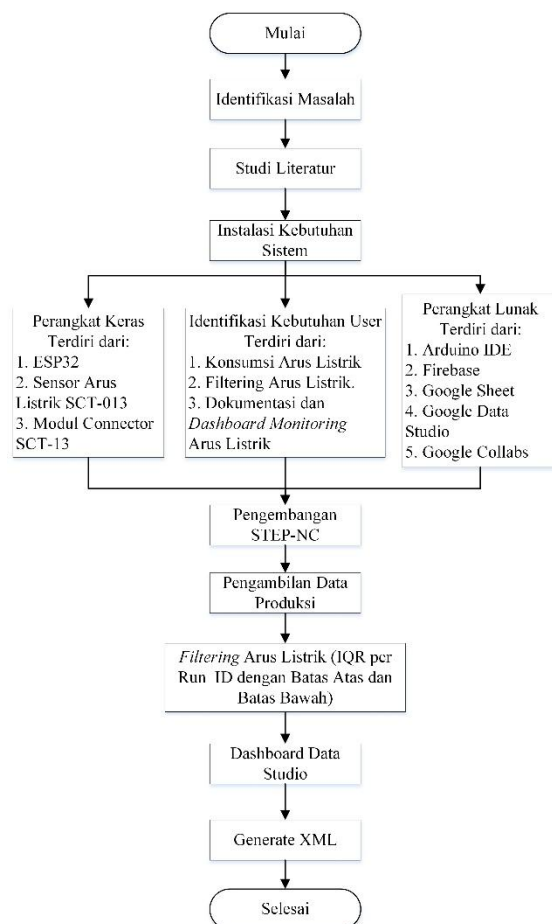
Nilai ambang arus sebesar 2 A sebagai batas awal untuk memisahkan kondisi non-pemotongan (*idle* atau transisi) dengan kondisi pemotongan [14]. Penetapan ambang ini bersifat empiris berdasarkan karakteristik data dan mesin yang digunakan, serta didukung oleh penelitian yang menunjukkan bahwa sinyal arus *spindle* mampu merepresentasikan perubahan kondisi proses pemesinan secara *real-time*. Dengan demikian, kombinasi metode IQR dan threshold 2 A untuk batas bawah arus listrik kondisi mesin proses cutting digunakan untuk menghasilkan data arus yang lebih stabil dan representatif sebelum dilakukan pemodelan konsumsi energi.

2.3. *STEP-NC Sebagai Standar Data Proses Pemesinan Manufaktur*

STEP-NC merupakan standar yang dikembangkan untuk menggantikan G-code tradisional dengan pendekatan berbasis objek dan fitur (*feature-based manufacturing*) [16]. STEP-NC memungkinkan representasi informasi yang lebih kaya, seperti geometri produk, fitur machining, strategi pemesinan, serta parameter proses [16]. STEP-NC memungkinkan integrasi yang lebih baik antara CAD, CAM, dan mesin CNC *milling*, sehingga mendukung pengembangan sistem manufaktur cerdas [16]. Pada penelitian ini, STEP-NC menjadi penting karena menyediakan informasi fitur *machining* yang lebih detail, memungkinkan pengaitan antara fitur dengan konsumsi energi, serta mendukung pengembangan model prediksi berbasis proses.

3. METODE PENELITIAN

Metodologi penelitian menjelaskan tahapan yang dilakukan untuk memperoleh data arus listrik yang representatif dan siap dianalisis. Tahapan penelitian dimulai dari identifikasi masalah, studi literatur, perancangan kebutuhan sistem, pengembangan sistem akuisisi data, hingga proses penyaringan (*filtering*) data arus listrik. Alur metodologi penelitian ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Kerangka Penelitian

Setelah dilakukan identifikasi kebutuhan sistem, penelitian menggunakan perangkat keras berupa mikrokontroler ESP32, sensor arus SCT-013, dan modul konektor sebagai sistem akuisisi data arus listrik motor *spindle*. Data hasil pengukuran dikirim dan disimpan menggunakan Arduino IDE, Firebase, Google Spreadsheets, dan Google Collabs sebagai media pemrosesan data. Selanjutnya dilakukan proses *filtering* terhadap data arus listrik untuk mengurangi pengaruh *noise* dan nilai pencilan (*outlier*) yang muncul selama proses pemesinan.

Proses *filtering* dilakukan menggunakan metode *Interquartile Range* (IQR) pada setiap Run_ID, sehingga batas atas (*upper bound*) dan batas bawah (*lower bound*) dihitung secara independen untuk setiap percobaan. Pendekatan ini memungkinkan nilai arus yang berada di luar

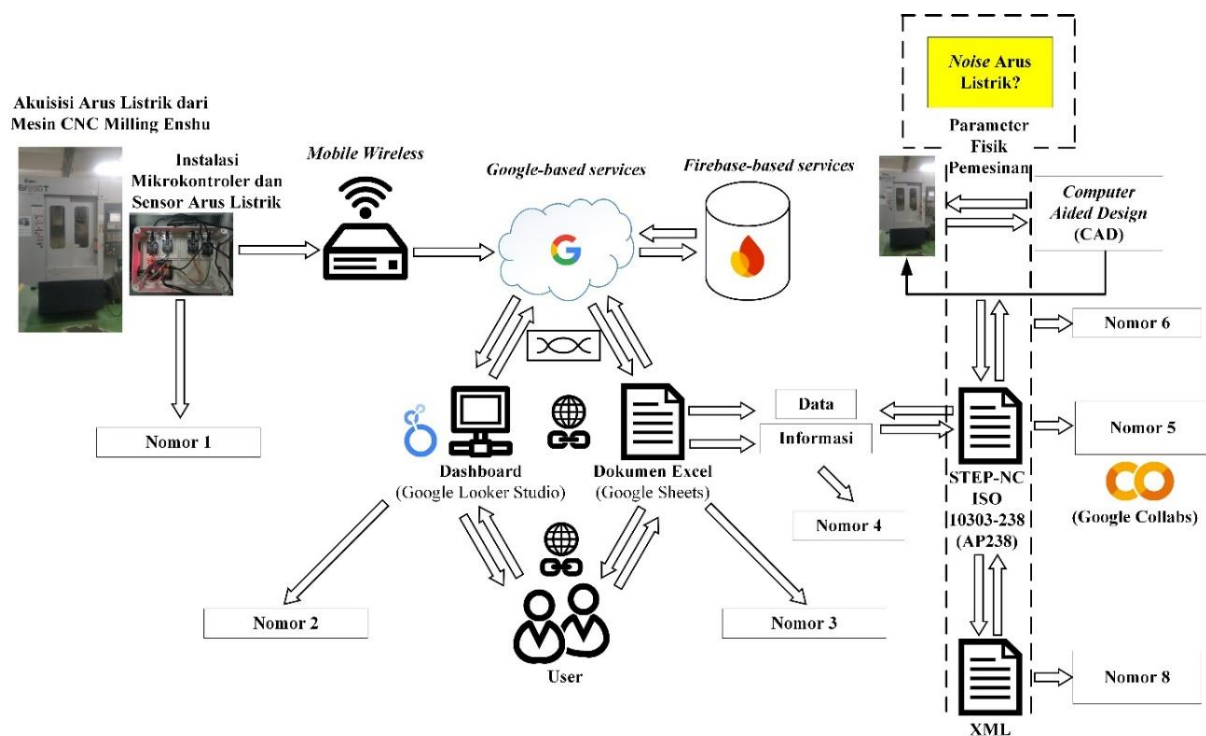
rentang IQR diidentifikasi sebagai *outlier* dan dihilangkan tanpa memengaruhi karakteristik data pada percobaan lainnya. Hasil data yang telah difilter kemudian digunakan sebagai data akhir untuk analisis konsumsi arus listrik dan visualisasi pada *dashboard*.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Bagian hasil dan pembahasan diawali dengan penyajian topologi penelitian yang menggambarkan alur pengembangan sistem, mulai dari identifikasi kebutuhan hingga implementasi metode *filtering*. Selanjutnya dijelaskan proses instalasi perangkat keras yang terdiri atas sensor arus SCT-013 dan mikrokontroler ESP32, serta instalasi perangkat lunak yang meliputi Arduino IDE, Firebase, Google Spreadsheets, Google Collabs, dan Google Looker Studio sebagai media akuisisi, penyimpanan, dan visualisasi data. Penelitian kemudian mengembangkan representasi data berbasis STEP-NC dengan menambahkan informasi konsumsi arus listrik hasil pemantauan. Tahap berikutnya membahas algoritma *filtering* arus motor spindle menggunakan metode *Interquartile Range* (IQR) per Run_ID untuk menghilangkan nilai pencilan (*outlier*) pada setiap proses pemesinan. Hasil *filtering* dianalisis melalui perbandingan data sebelum dan sesudah *filtering*, kemudian divisualisasikan dalam dashboard pemantauan, serta didokumentasikan dalam format XML yang memuat informasi parameter pemesinan, statistik arus listrik, dan data hasil *filtering* sebagai representasi terintegrasi proses pemesinan berbasis STEP-NC.

4.1. Topologi Penelitian

Topologi penelitian pada Gambar 2 menggambarkan arsitektur sistem pemantauan arus listrik pada proses CNC *milling* yang terintegrasi dengan pengembangan STEP-NC. Sistem ini dirancang untuk mengakuisisi data arus listrik secara *real-time*, menyimpan dan mengolah data berbasis cloud, memvisualisasikan hasil pemantauan melalui dashboard, serta mendokumentasikan informasi proses pemesinan ke dalam format XML.



Gambar 2. Topologi Penelitian

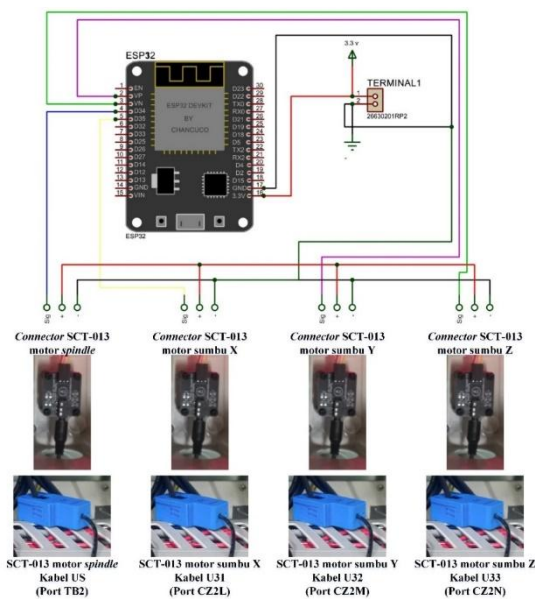
Tahapan penelitian diawali dengan (1) proses akuisisi arus listrik dari mesin CNC milling menggunakan sensor arus SCT-013 yang terhubung dengan mikrokontroler ESP32 sebagai perangkat pengumpul data. Selanjutnya data hasil pengukuran dikirim melalui jaringan nirkabel menuju layanan *cloud* untuk penyimpanan dan sinkronisasi data. Data yang tersimpan kemudian dimanfaatkan untuk (2) menampilkan informasi konsumsi arus listrik secara *real-time* melalui *dashboard* berbasis Google Looker Studio sehingga memudahkan pengguna dalam melakukan pemantauan proses pemesinan. Selain itu, data juga disimpan pada (3) Google Spreadsheets sebagai media dokumentasi dan pengolahan data. Seluruh data tersebut kemudian diproses menjadi (4) informasi yang siap digunakan sebagai masukan dalam pengembangan STEP-NC.

Tahapan berikutnya meliputi (5) pengolahan data menggunakan Google Collabs untuk menerapkan algoritma *filtering* arus motor *spindle* berbasis *Interquartile Range* (IQR) per

Run_ID sehingga nilai pencilan (*outlier*) dapat dihilangkan. Hasil *filtering* kemudian diintegrasikan ke dalam (6) model STEP-NC (ISO 10303-238/AP238) bersama informasi parameter fisik pemesinan yang berasal dari sistem CAD dan kondisi proses pemesinan. Struktur STEP-NC yang telah diperbarui selanjutnya menghasilkan (7) dokumen XML yang memuat informasi parameter pemesinan, statistik konsumsi arus listrik, serta data hasil *filtering*.

4.2. Instalasi Perangkat Keras

Gambar 3 menunjukkan instalasi perangkat keras yang digunakan untuk mengakuisisi data arus listrik pada mesin CNC milling. Sistem akuisisi dirancang menggunakan mikrokontroler ESP32 sebagai unit pemrosesan utama dan empat sensor arus SCT-013 yang dipasang secara non-intrusive pada kabel suplai motor spindle serta motor sumbu X, Y, dan Z.



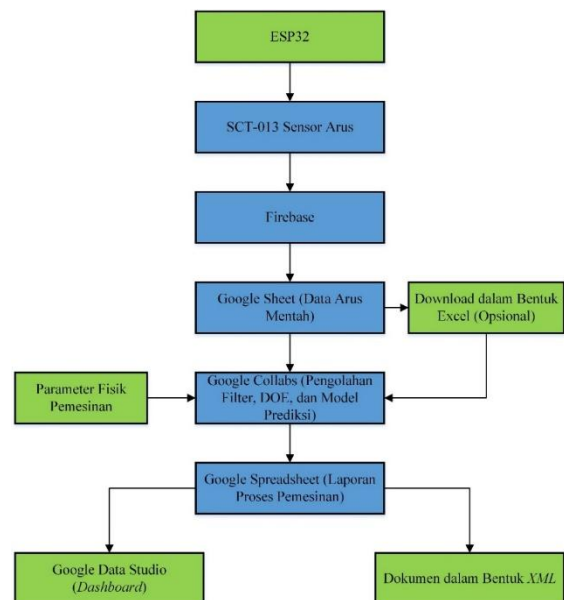
Gambar 3. Instalasi Perangkat Keras

ESP32 berfungsi sebagai pengendali utama yang membaca sinyal analog dari setiap sensor SCT-013 melalui pin analog yang telah ditentukan. Sensor arus motor *spindle* dihubungkan ke port USB TB2, sedangkan sensor motor sumbu X, Y, dan Z masing-masing dipasang pada kabel U31 (Port CZ2L), U32 (Port CZ2M), dan U33 (Port CZ2N). Setiap sensor dihubungkan menggunakan konektor SCT-013 untuk memudahkan proses pemasangan dan pelepasan tanpa memutus kabel daya motor. Selain itu, rangkaian dilengkapi terminal catu daya 3,3 V sebagai sumber tegangan referensi yang digunakan dalam proses pembacaan sinyal sensor oleh ESP32.

Selama proses pemesinan berlangsung, sensor SCT-013 mendeteksi perubahan medan magnet akibat aliran arus listrik pada masing-masing motor dan mengubahnya menjadi sinyal analog yang dapat diproses oleh ESP32. Data arus listrik yang diperoleh kemudian dikirim melalui jaringan nirkabel untuk proses penyimpanan, visualisasi, dan analisis lebih lanjut. Pada penelitian ini, fokus analisis diarahkan pada arus motor spindle karena motor tersebut merupakan komponen utama yang berkontribusi terhadap konsumsi energi selama proses pemotongan, sedangkan data arus motor sumbu X, Y, dan Z digunakan sebagai data pendukung untuk merekam kondisi operasi mesin secara menyeluruh.

4.3. Instalasi Perangkat Lunak

Gambar 4 menunjukkan alur instalasi perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian untuk mendukung proses akuisisi, penyimpanan, pengolahan, visualisasi, dan dokumentasi data arus listrik pada mesin CNC milling. Seluruh komponen perangkat lunak diintegrasikan dalam satu alur kerja sehingga data yang diperoleh dari sensor arus dapat diproses secara berkelanjutan mulai dari pengambilan data hingga menghasilkan informasi yang siap digunakan untuk analisis dan dokumentasi berbasis STEP-NC.



Gambar 4. Instalasi Perangkat Lunak

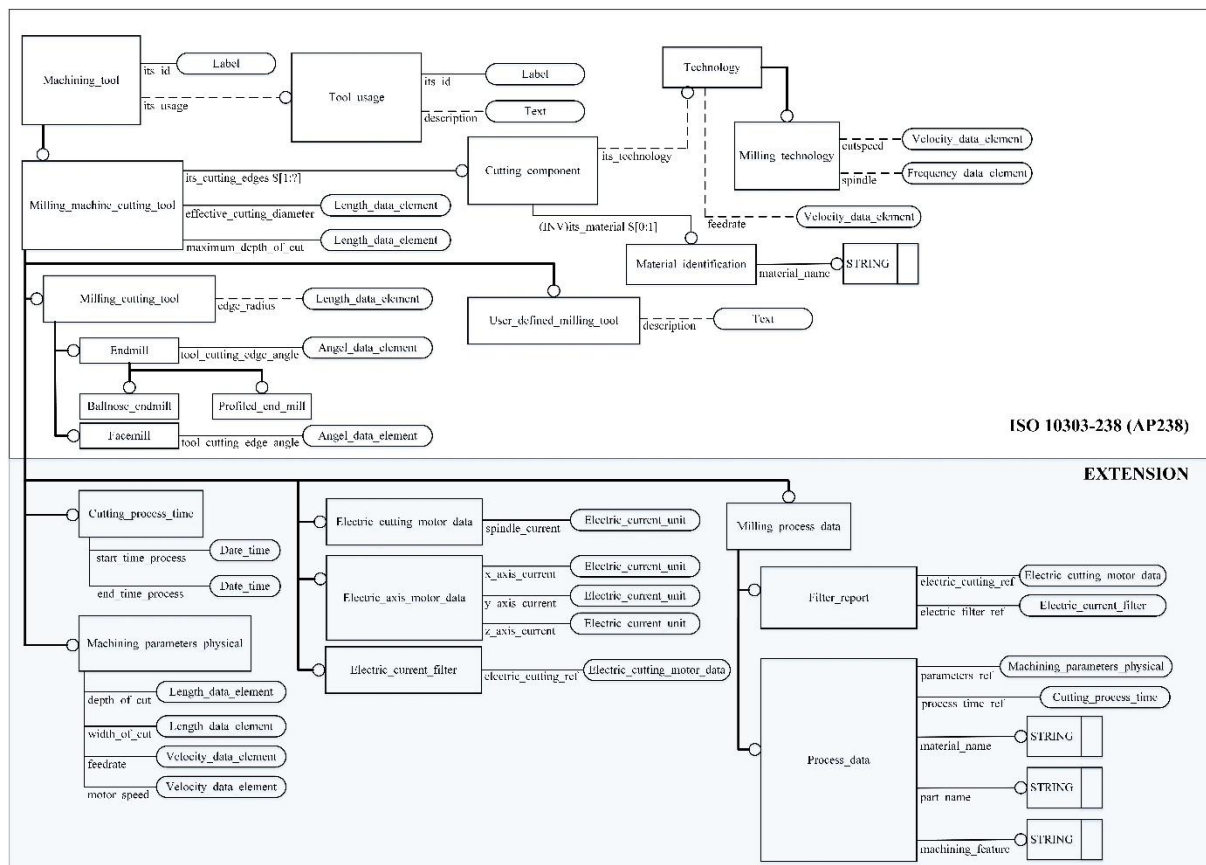
Proses diawali dengan mikrokontroler ESP32 yang membaca sinyal dari sensor arus SCT-013, kemudian mengirimkan data arus listrik secara *real-time* ke Firebase sebagai media penyimpanan berbasis *cloud*. Selanjutnya, data pada Firebase disinkronkan ke Google Spreadsheets sebagai penyimpanan data mentah (*raw data*) yang dapat diunduh dalam format Microsoft Excel apabila diperlukan untuk keperluan pencadangan atau analisis lanjutan. Data arus listrik tersebut kemudian dipadukan dengan parameter fisik pemesinan, seperti material, kecepatan putar motor spindle (*Revolutions Per Minute (RPM)*), *feed rate*, lebar pemotongan (*width of cut*), dan kedalaman pemotongan (*depth of cut*) diproses menggunakan Google Collabs untuk melakukan *filtering data*.

Hasil pengolahan data selanjutnya disusun dalam Google Spreadsheet sebagai laporan proses pemesinan yang memuat informasi parameter proses dan hasil analisis. Data tersebut kemudian dimanfaatkan untuk dua tujuan utama, yaitu visualisasi konsumsi arus listrik melalui *dashboard* Google Looker Studio serta pembentukan dokumen XML yang mengintegrasikan informasi parameter pemesinan dan hasil *filtering* arus listrik.

4.4. Pengembangan STEP-NC

Gambar 5 menunjukkan pengembangan model STEP-NC yang digunakan dalam

penelitian ini. Model tersebut terdiri atas dua bagian utama, yaitu struktur STEP-NC eksisting berdasarkan standar ISO 10303-238 (AP238) dan extension yang dikembangkan untuk mengakomodasi informasi konsumsi arus listrik selama proses pemesinan CNC milling. Pengembangan ini bertujuan untuk memperluas cakupan informasi pada STEP-NC sehingga tidak hanya merepresentasikan parameter proses pemesinan, tetapi juga menyimpan data pemantauan arus listrik dan hasil filtering sebagai bagian dari dokumentasi proses manufaktur digital.



Gambar 5. Pengembangan STEP-NC

Bagian STEP-NC eksisting mengacu pada standar ISO 10303-238 (AP238) yang menyediakan struktur informasi mengenai proses pemesinan berbasis fitur (*feature-based manufacturing*). Struktur tersebut memuat berbagai entitas, seperti *machining tool*, *milling cutting tool*, *cutting component*, *material identification*, dan *milling technology* yang digunakan untuk mendefinisikan karakteristik parameter fisik pemesinan. Informasi tersebut

menjadi dasar pertukaran data antara sistem CAD, CAM, dan CNC sehingga memungkinkan proses pemesinan dilakukan secara lebih terintegrasi dan konsisten sesuai standar STEP-NC.

Pada penelitian ini dilakukan *extension* terhadap STEP-NC dengan menambahkan beberapa entitas baru yang berkaitan dengan pemantauan konsumsi arus listrik selama proses pemesinan. *Extension* tersebut meliputi entitas:

1. Cutting_process_time.
2. Machining_parameters_physical.
3. Electric_cutting_motor_data.
4. Electric_axis_motor_data.
5. Electric_current_filter.
6. Filter_report.
7. Milling_process_data.
8. process_data

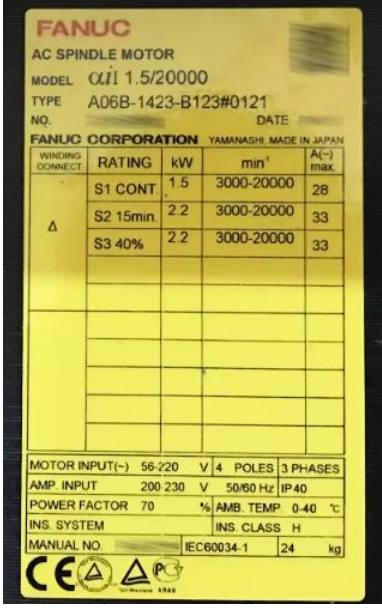
Entitas tersebut berfungsi untuk menyimpan waktu proses aktual, parameter fisik pemesian, data arus motor *spindle* dan motor sumbu, serta hasil filtering menggunakan metode IQR per Run_ID. Seluruh informasi tersebut kemudian diintegrasikan ke dalam dokumen XML sehingga STEP-NC tidak hanya berfungsi sebagai media pertukaran data manufaktur, tetapi juga sebagai representasi digital yang mendukung pemantauan konsumsi energi dan analisis proses pemesian dalam lingkungan manufaktur cerdas.

4.5. Algoritma Filtering Motor Spindle IQR per Run_ID

Gambar 6 menunjukkan spesifikasi motor *spindle* [20]. Gambar 7 menunjukkan algoritma filtering arus motor spindle menggunakan metode Interquartile Range (IQR) yang diterapkan pada setiap Run_ID. Pendekatan ini bertujuan untuk menghilangkan nilai pencilan (*outlier*) tanpa mengubah karakteristik distribusi data pada masing – masing proses pemesian. *Filtering* berdasarkan Run_ID, setiap operasi pemesian memiliki batas *outlier* yang dihitung secara independen sehingga lebih mampu merepresentasikan variasi kondisi pemotongan dibandingkan apabila seluruh data diproses secara bersamaan.

Proses penyaringan (*filtering*) dilakukan berdasarkan Run_ID karena setiap Run_ID merepresentasikan satu siklus proses end milling yang memiliki kombinasi part, fitur pemesian, parameter fisik pemesian, dan urutan operasi yang spesifik. Pendekatan ini dipilih agar distribusi data arus berasal dari kondisi pemotongan yang homogen, sehingga perhitungan *Interquartile Range* (IQR) mampu mengidentifikasi nilai arus yang menyimpang tanpa dipengaruhi oleh variasi antar part maupun antar fitur. Berbeda dengan *filtering* berdasarkan part yang masih dapat mencakup beberapa fitur pemesian, *filtering* berdasarkan Run_ID menghasilkan batas *outlier* yang lebih

representatif terhadap karakteristik arus pada setiap operasi *machining*.



FANUC
AC SPINDLE MOTOR
MODEL α i 1.5/20000
TYPE A06B-1423-B123#0121
NO. DATE

FANUC CORPORATION YAMANASHI, MADE IN JAPAN

WINDING CONNECT	RATING	kW	min ⁻¹	A(-) max.
Δ	S1 CONT	1.5	3000-20000	28
	S2 15min	2.2	3000-20000	33
	S3 40%	2.2	3000-20000	33

MOTOR INPUT(-)	56-220	V	4	POLES	3	PHASES
AMP INPUT	200-230	V	50/60	Hz	IP40	
POWER FACTOR	70	%	AMB. TEMP	0-40	°C	
INS. SYSTEM			INS. CLASS	H		
MANUAL NO.			IEC60034-1	24	kg	

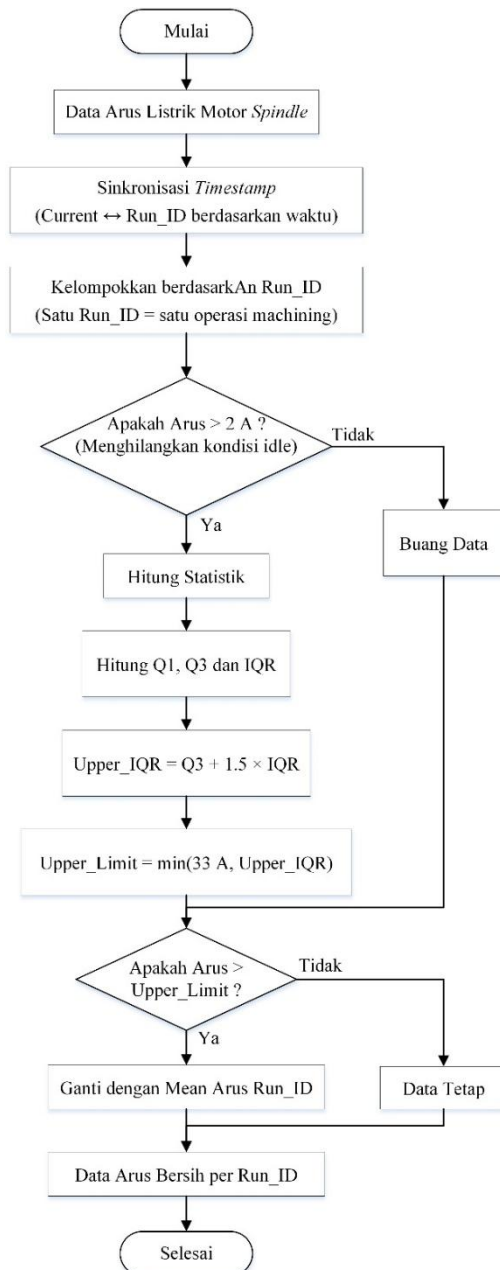
CE, A, PC, 100%

Gambar 6. Spesifikasi Motor Spindle [20]

Penelitian ini menggunakan dua batasan dalam proses *filtering* berdasarkan karakteristik motor *spindle* dan kondisi operasi mesin CNC. Batas bawah arus ditetapkan sebesar 2 A untuk menghilangkan data ketika motor *spindle* berada pada kondisi *idle* atau tidak melakukan proses pemotongan sehingga data yang dianalisis hanya merepresentasikan aktivitas pemesian. Selain itu, batas atas maksimum ditetapkan sebesar 33 A mengacu pada spesifikasi motor spindle FANUC AC Spindle Motor α i 1.5/20000 yang memiliki arus maksimum 33 A pada kondisi operasi S2 15 menit dan S3 40%, sehingga nilai arus yang melebihi batas tersebut dianggap tidak merepresentasikan kondisi operasi normal dan dikategorikan sebagai outlier.

Proses *filtering* diawali dengan pengambilan data arus listrik motor *spindle* yang kemudian disinkronkan dengan Run_ID berdasarkan timestamp sehingga setiap data arus dapat dihubungkan dengan satu operasi pemesian. Selanjutnya data dikelompokkan berdasarkan Run_ID, di mana setiap Run_ID merepresentasikan satu proses *machining*. Pada setiap kelompok data dilakukan seleksi awal dengan menghapus data yang memiliki arus kurang dari atau sama dengan 2 A, kemudian dihitung parameter statistik berupa kuartil pertama (Q1), kuartil ketiga (Q3), dan nilai

Interquartile Range (IQR). Berdasarkan nilai tersebut dihitung batas atas statistik menggunakan persamaan $\text{Upper_IQR} = Q3 + 1,5 \times \text{IQR}$, yang kemudian dibandingkan dengan batas maksimum motor spindle untuk memperoleh $\text{Upper_Limit} = \min(33 \text{ A}, \text{Upper_IQR})$.



Gambar 7. Algoritma Filtering IQR Per Run_ID

Tahap berikutnya adalah membandingkan setiap nilai arus terhadap Upper_Limit yang telah diperoleh pada masing – masing Run_ID. Apabila nilai arus melebihi batas tersebut, maka

data dianggap sebagai outlier dan digantikan menggunakan nilai rata – rata (*mean*) arus pada Run_ID yang sama untuk mempertahankan kontinuitas data tanpa menghilangkan jumlah sampel. Sebaliknya, apabila nilai arus berada di bawah atau sama dengan Upper_Limit, maka data dipertahankan sebagai data *valid*. Hasil akhir dari proses ini berupa data arus motor spindle yang telah bersih dari kondisi *idle* dan nilai pencilan, sehingga lebih representatif untuk analisis konsumsi energi, visualisasi pada dashboard, serta integrasi ke dalam dokumen XML berbasis STEP-NC.

4.6. Hasil Filtering Motor Spindle IQR per Run_ID

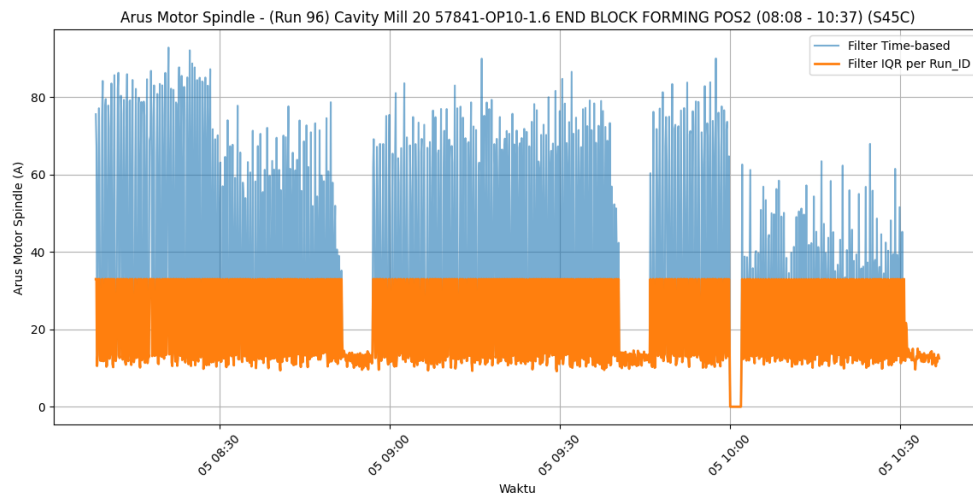
Gambar 8 dan Gambar 9 menunjukkan hasil penerapan metode *Interquartile Range* (IQR) per Run_ID pada data arus motor spindle selama proses pemesinan Run 96 dengan fitur Cavity Mill 20 pada komponen 57841-OP10-1.6 END BLOCK FORMING POS2 berbahan S45C. Proses *filtering* dilakukan untuk mengurangi pengaruh nilai pencilan (*outlier*) yang muncul akibat lonjakan arus sesaat sehingga data yang dihasilkan lebih representatif terhadap kondisi pemotongan yang sebenarnya. Gambar 8 merupakan hasil *filtering* menyajikan perbandingan nilai arus sebelum dan sesudah *filtering*, sedangkan Gambar 9 menampilkan grafik perubahan pola sinyal arus listrik sepanjang proses pemesinan.

	Timestamp	Spindle_Filtered (A)	Spindle_IQR_Run (A)
71471	2025-12-05 08:08:06	75.65	33.00
71472	2025-12-05 08:08:13	67.23	33.00
71473	2025-12-05 08:08:19	10.56	10.56
71474	2025-12-05 08:08:26	13.36	13.36
71475	2025-12-05 08:08:32	53.35	33.00
...	...	...	...
72817	2025-12-05 10:36:29	12.67	12.67
72818	2025-12-05 10:36:35	11.53	11.53
72819	2025-12-05 10:36:42	12.59	12.59
72820	2025-12-05 10:36:48	13.46	13.46
72821	2025-12-05 10:36:56	12.49	12.49

1351 rows x 3 columns

Jumlah data : 1351
Mean tanpa filter : 30.7382 A
Mean filter per Run : 28.4761 A
Selisih : 10.2541 A

Gambar 8. Hasil Filtering IQR Per Run_ID

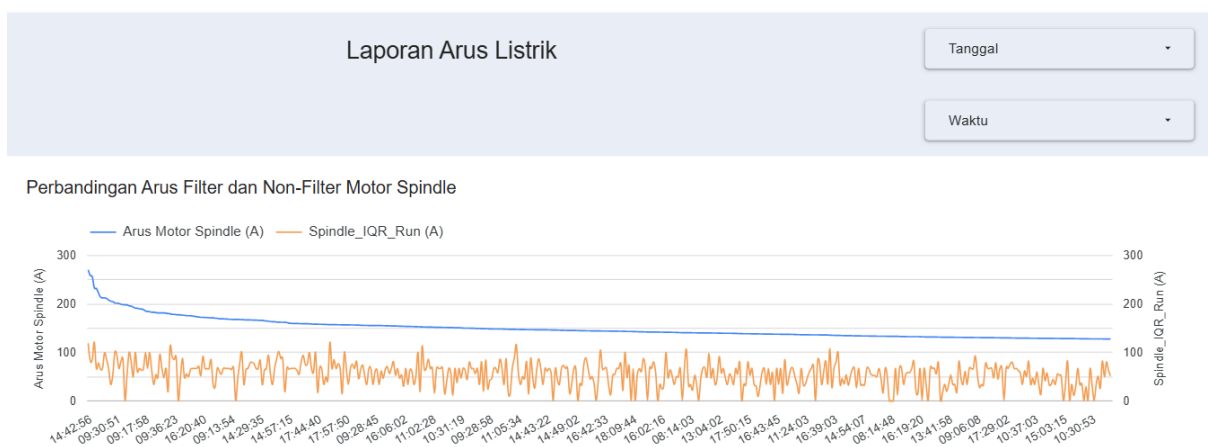
Gambar 9. Grafik Hasil *Filtering* IQR Per Run_ID

Berdasarkan hasil pengolahan data diperoleh sebanyak 1.351 data *timestamp* yang dianalisis pada rentang waktu pukul 08.08–10.37. Nilai rata – rata arus motor spindle sebelum filtering sebesar 30,7302 A, sedangkan setelah diterapkan metode IQR per Run_ID nilai rata-ratanya menjadi 20,4761 A, sehingga terjadi penurunan sebesar 10,2541 A. Penurunan tersebut menunjukkan bahwa metode IQR berhasil mengurangi pengaruh nilai arus yang melebihi batas operasi normal motor *spindle*, yaitu 33 A sesuai spesifikasi motor FANUC, dengan mengganti nilai yang melebihi batas tersebut menggunakan nilai rata-rata arus pada Run_ID yang sama tanpa menghilangkan jumlah data pengamatan. Grafik hasil filtering memperlihatkan perbedaan yang jelas antara data sebelum dan sesudah proses filtering. Data sebelum filtering

masih menunjukkan banyak lonjakan arus hingga berada pada kisaran 60–90 A, sedangkan setelah diterapkan metode IQR per Run_ID nilai arus yang melebihi batas berhasil dibatasi pada 33 A, sehingga pola sinyal menjadi lebih stabil dan konsisten mengikuti kondisi operasi pemesian.

4.7. Tampilan Dashboard

Gambar 10 menunjukkan tampilan *dashboard* yang dikembangkan menggunakan Google Looker Studio untuk memvisualisasikan data arus listrik motor *spindle* hasil akuisisi dan proses *filtering*. *Dashboard* ini dirancang sebagai media pemantauan yang memungkinkan pengguna mengamati perubahan arus listrik secara interaktif berdasarkan tanggal dan waktu proses pemesian.

Gambar 10. Tampilan *Dashboard*

Pada *dashboard* ditampilkan grafik perbandingan arus listrik motor *Spindle* (A) sebagai data sebelum *filtering* dengan *Spindle_IQR_Run* (A) sebagai data setelah *filtering*. Grafik menunjukkan bahwa data sebelum *filtering* masih mengandung fluktuasi dan lonjakan arus yang cukup tinggi akibat noise maupun nilai pencilan (*outlier*), sedangkan data setelah *filtering* memiliki pola yang lebih stabil karena nilai arus di luar batas yang ditentukan telah dikoreksi menggunakan metode IQR per *Run_ID*. *Dashboard* juga dilengkapi fitur penyaringan (*filter*) berdasarkan tanggal dan waktu sehingga pengguna dapat menampilkan data pada periode tertentu secara *real-time*.

4.8. XML

Gambar 11 menunjukkan dokumen XML yang dihasilkan sebagai representasi digital proses pemesinan setelah dilakukan akuisisi data arus listrik, *filtering* menggunakan metode *Interquartile Range* (IQR) per *Run_ID*, dan integrasi dengan informasi proses berbasis STEP-NC. Dokumen XML dirancang untuk menyimpan informasi proses pemesinan secara terstruktur sehingga dapat dibaca dan dipertukarkan oleh sistem manufaktur yang berbeda. Selain memuat parameter proses, XML juga mendokumentasikan hasil pemantauan arus listrik sehingga informasi proses dan konsumsi energi berada dalam satu *format* data yang terintegrasi.

```

<ProductionData>
  <Run id="96">
    <Run_ID>96</Run_ID>
    <PartName>57841-OP10-1.6 END BLOCK FORMING POS2</PartName>
    <Process>CAVITY_MILL_20</Process>
    <Tool>MILL20</Tool>
    <Material>S45C</Material>
    <Time>
      <Date>05-12-2025</Date>
      <Start>08:08:06</Start>
      <End>10:36:56</End>
    </Time>
    <Parameters>
      <WidthOfCut>10</WidthOfCut>
      <FeedRate>1000</FeedRate>
      <DepthOfCut>0.15</DepthOfCut>
      <RPM>2500</RPM>
    </Parameters>
    <Current>
      <Statistics>
        <TotalTimestamp>1351</TotalTimestamp>
        <SamplingPercentage>20</SamplingPercentage>
        <SamplingTimestamp>270</SamplingTimestamp>
        <MeanWithoutFilter>30.730</MeanWithoutFilter>
        <MeanIQRRun>20.476</MeanIQRRun>
      </Statistics>
      <Samples>
        <Point>
          <Timestamp>2025-12-05 08:08:06</Timestamp>
          <WithoutFilter>75.650</WithoutFilter>
          <IQRRun>33.000</IQRRun>
        </Point>
        <Point>
          <Timestamp>2025-12-05 08:08:39</Timestamp>
          <WithoutFilter>77.190</WithoutFilter>
          <IQRRun>33.000</IQRRun>
        </Point>
      </Samples>
    </Current>
  </Run id="96">
</ProductionData>

```

Gambar 11. XML

Struktur XML terdiri atas elemen utama *ProductionData* yang memuat informasi setiap proses pemesinan berdasarkan *Run_ID*. Pada setiap *Run* disimpan informasi identitas proses, meliputi *Run_ID*, nama komponen (*PartName*), fitur pemesinan (*Process*), jenis pahat (*Tool*), material benda kerja (*Material*), waktu proses (*Time*), serta parameter pemesinan (*Parameters*) yang mencakup *width of cut*, *feed rate*, *depth of cut*, dan *spindle speed* (RPM). Selain itu, elemen *Current* menyimpan statistik hasil *filtering*, seperti jumlah *timestamp*, persentase data sampel, nilai rata – rata arus sebelum dan sesudah *filtering*, serta data arus hasil sampling sebesar 20% dari keseluruhan *timestamp*. Dokumen XML tidak hanya berfungsi sebagai media dokumentasi data proses pemesinan, tetapi juga sebagai representasi digital yang mendukung integrasi informasi konsumsi arus listrik ke dalam STEP-NC untuk analisis energi dan pengembangan sistem manufaktur cerdas.

5. KESIMPULAN

- Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem pemantauan arus listrik motor *spindle* pada mesin CNC milling menggunakan sensor arus SCT-013 dan mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan Firebase, Google Spreadsheets, Google Collabs, dan Google Looker Studio. Sistem yang dikembangkan mampu mengakuisisi, menyimpan, mengolah, serta memvisualisasikan data arus listrik secara *real-time* sebagai pendukung analisis proses pemesinan.
- Metode *Interquartile Range* (IQR) per *Run_ID* berhasil diterapkan untuk mengurangi pengaruh nilai pencilan (*outlier*) pada data arus motor spindle. Proses *filtering* dilakukan dengan menghilangkan kondisi *idle* (arus ≤ 2 A), membatasi nilai arus maksimum berdasarkan spesifikasi motor *spindle* sebesar 33 A, serta mengganti nilai *outlier* menggunakan nilai rata – rata pada *Run_ID* yang sama. Hasil *filtering* menghasilkan data arus yang lebih stabil dan representatif untuk analisis konsumsi energi.
- Penelitian ini berhasil mengembangkan *extension* STEP-NC dengan menambahkan informasi waktu proses, parameter fisik pemesinan, statistik hasil *filtering*, serta data

arus listrik ke dalam dokumen XML. Integrasi tersebut menghasilkan representasi digital proses pemesinan yang tidak hanya memuat informasi manufaktur, tetapi juga mendokumentasikan konsumsi arus listrik sebagai bagian dari data proses berbasis STEP-NC.

- d. Kelebihan penelitian ini adalah penggunaan metode akuisisi arus listrik secara *non-intrusive*, penerapan *filtering* berbasis Run_ID yang mampu mempertahankan karakteristik setiap operasi pemesinan, serta integrasi data hasil pemantauan ke dalam *dashboard* dan dokumen XML. Pendekatan ini mendukung implementasi pemantauan energi pada lingkungan manufaktur cerdas tanpa memerlukan modifikasi pada sistem kendali mesin CNC.
- e. Keterbatasan penelitian ini adalah proses *filtering* hanya diterapkan pada data arus motor *spindle* dan masih menggunakan metode statistik IQR dengan batas maksimum arus berdasarkan spesifikasi motor. Selain itu, implementasi dan pengujian dilakukan pada satu jenis mesin CNC *milling* dan satu lingkungan manufaktur sehingga hasil penelitian masih memerlukan validasi pada kondisi operasi yang lebih beragam.
- f. Penelitian selanjutnya dapat dikembangkan dengan mengintegrasikan data daya dan konsumsi energi listrik secara langsung ke dalam STEP-NC, menerapkan metode *filtering* atau deteksi *outlier* berbasis *machine learning*, serta melakukan pengujian pada berbagai jenis mesin CNC, material, dan parameter pemesinan. Pengembangan tersebut diharapkan dapat meningkatkan akurasi pemantauan energi dan mendukung implementasi sistem manufaktur cerdas yang lebih adaptif sesuai konsep Industri 4.0.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S.-M. Wang, C.-Y. Lee, H. Gunawan, and C.-C. Yeh, "An Accuracy-Efficiency-Power Consumption Hybrid Optimization Method for CNC Milling Process," *Applied Sciences*, vol. 9, p. 1495, 2019, doi: 10.3390/app9071495.
- [2] Y.-F. Li, Y.-L. Wang, Y. He, Y. Wang, and S.-L. Lin, "Modeling Method for Flexible Energy Behaviors in CNC Machining Systems," *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, vol. 31, p. 6, 2018, doi: 10.1186/s10033-018-0213-x.
- [3] Statista, "Gross Value Added (GVA) from the Micro-Sized Manufacturing Industry in Indonesia in 2022, by Commodity," 2024. [Online]. Available: <https://www.statista.com/statistics/1303029/indonesia-gross-value-added-microsized-manufacturing-by-commodity/>. [Accessed: Feb. 20, 2026].
- [4] J. Sulistyono, A. T. Setiawan, and I. S. Toha, "Development of Cloud Visualization a Machining Manufacturing System Shop Floor," *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 33, p. 1005, 2024, doi: 10.11591/ijeecs.v33.i2.pp1005-1015.
- [5] M. Crnjac, I. Veža, and N. Banduka, "From Concept to the Introduction of Industry 4.0," *International Journal of Industrial Engineering and Management*, vol. 8, pp. 21–30, 2017, doi: 10.24867/IJIEM-2017-1-103.
- [6] A. Rojko, "Industry 4.0 Concept: Background and Overview," *International Journal of Interactive Mobile Technologies*, vol. 11, p. 77, 2017, doi: 10.3991/ijim.v11i5.7072.
- [7] S. M. Solihat, S. Salsabila, and Susilawati, "Sistem Pemantauan Kualitas Udara Berbasis ESP32 Menggunakan Sensor Gas MQ-135 dan MQ-2," *Jurnal Informatika dan Teknik Elektro Terapan (JITET)*, vol. 14, no. 1, pp. 1592–1599, 2026, doi: 10.23960/jitet.v14i1.5568.
- [8] K. Cheng, Y. Liu, W. Xiao, W. Wang, and G. Zhao, "STEP-NC Feature Based Cutting Tool Recommendation System," in *CAD'21 Proceedings*, CAD Solutions LLC, pp. 171–176, 2022, doi: 10.14733/cadconfP.2021.171-176.
- [9] K. Zhang, W. Xiao, X. Fan, and G. Zhao, "A Low-Code Modular CAD System Oriented Towards Machining Features for STEP-NC Compliant Manufacturing," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 80, pp. 487–502, 2025, doi: 10.1016/j.jmsy.2025.03.010.
- [10] D. Pantazis, P. Goodall, S. G. Pease, P. Conway, and A. West, "Predicting Electrical Power Consumption of End Milling Using a Virtual Machining Energy Toolkit (V_MET)," *Computers in Industry*, vol. 150, p. 103943, 2023, doi: 10.1016/j.compind.2023.103943.
- [11] G. Li, Y. Fu, D. Chen, L. Shi, and J. Zhou, "Deep Anomaly Detection for CNC Machine Cutting Tool Using Spindle Current Signals," *Sensors*, vol. 20, p. 4896, 2020, doi: 10.3390/s20174896.
- [12] R. De Jesús, G. Hernández, I. Téllez, and J. C. Jáuregui, "Driver Current Analysis for Sensorless Tool Breakage Monitoring of CNC

- Milling Machines," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, vol. 43, pp. 1529–1534, 2003, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2003.08.004.
- [13] L. J. Augustine, W. J. Morgan, H.-Y. Chu, S.-J. Hwang, and H.-S. Peng, "Classification of Tool Wear Condition During CNC Cutting Process from Spindle Motor Current Signal Monitoring," *Lubricants*, vol. 14, p. 227, 2026, doi: 10.3390/lubricants14060227.
- [14] M. Jamshidi, J.-F. Chatelain, X. Rimpault, and M. Balazinski, "Tool Condition Monitoring Using Machine Tool Spindle Electric Current and Multiscale Analysis while Milling Steel Alloy," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 6, p. 115, 2022, doi: 10.3390/jmmp6050115.
- [15] B. M. Li, S. Q. Xie, and Z. Q. Sang, "STEP-Based Data Sharing and Exchange in One-of-a-Kind Product Collaborative Design for Cloud Manufacturing," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 5, p. 135291, 2013, doi: 10.1155/2013/135291.
- [16] O. Meski, F. Belkadi, F. Laroche, M. Ritou, and B. Furet, "A Generic Knowledge Management Approach Towards the Development of a Decision Support System," *International Journal of Production Research*, vol. 59, pp. 6659–6676, 2021, doi: 10.1080/00207543.2020.1821930.
- [17] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. D. Umans, *Electric Machinery*, 6th ed. Boston, MA, USA: McGraw-Hill, 2009.
- [18] S. J. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2012.
- [19] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin, and R. E. Anderson, *Multivariate Data Analysis*, 8th ed. Andover, UK: Cengage, 2019.
- [20] Alibaba, "A06B-1423-B123#0121 New Fanuc AC Spindle Motor." [Online]. Available: <https://indonesian.alibaba.com/product-detail/A06B-1423-B123-0121-New-Fanuc-1601822327712.html>. [Accessed: Jul. 12, 2026].