

# Pengembangan sistem pemantauan fase proses pemesinan dengan metode *pseudo sensor* untuk mendukung implementasi paradigma industri 4.0

Maulana Yusuf<sup>1</sup>, Sri Raharno<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara, Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Bandung  
Jl. E ITB Jl. Ganesa No.10, Lb. Siliwangi, Kecamatan Coblong, Kota Bandung, Jawa Barat 40132  
Email korespondensi: heradeya96@gmail.com

## Abstrak

Industri di Indonesia sangat jamak bertipe *job-shop* yang mempunyai karakteristik memproduksi produk dengan varietas yang sangat banyak dengan jumlah yang sangat sedikit. Hal ini menyebabkan timbulnya beban produksi dengan pembebanan dinamis. Kondisi ini akan berimbas langsung pada menentukan durasi penggunaan komponen dalam rangka menentukan jadwal perawatan mesin. Agar mesin konvensional tetap dapat digunakan pada implementasi paradigma Industri 4.0, mesin tersebut perlu ditambahkan kecerdasan dalam hal ini kemampuan untuk memantau fase-fase proses pemesinan. Pada tiap fase operasi, komponen yang terlibat umumnya selalu berubah sehingga akan sangat sulit mencatat berapa durasi pemakaian tiap komponen mesin, terlebih pada mesin perkakas konvensional. Mengetahui durasi komponen bekerja akan memudahkan dalam melakukan manajemen perawatan yang tepat. Kondisi tersebut mengilhami pengaplikasian teknik *pseudo sensor* untuk mengetahui fase operasi berdasarkan variabel yang tidak berkaitan langsung seperti arus, tegangan, rpm, dan getaran untuk diterjemahkan sebagai fase operasi. Metode ini diawali akuisisi data pada dua jenis material. Hasil pengujian menunjukkan terdapat korelasi antara perubahan fasa operasi dengan besarnya nilai pembacaan variabel arus dan rpm. Saat fasa non cutting nilai arus listrik terbaca 2,2 A, nilai ini meningkat ketika berubah menjadi fasa cutting. Pembacaan rpm pada fasa non Cutting terbaca sebesar 1200 dan menurun sebesar 1050 (spesimen baja), 1100 (spesimen aluminium).

**Kata kunci:** industri 4.0, mesin perkakas, *pseudo sensor*.

## Abstract

Industry in Indonesia is very diverse with the type of *job-shop* (producing a large number of products with very few varieties). This condition will have a direct impact on determining the duration of component use in order to determine the engine maintenance schedule. Conventional machines can still be used in Industry 4.0 by adding intelligence. In this case the ability to monitor the process of machining phases. At each phase of operation, the components involved are always changing so it is very difficult to record the duration of use of each engine component. Knowing the duration of working components will make it easier to carry out proper maintenance management. This condition inspires the *pseudo sensor* to determine the operating phase based on variables that are not directly related (current, voltage, rpm, and vibration) to be translated as operating phase. The test results show that there is a correlation between the operating phase change and the reading value of the current and rpm variables. When non-cutting phase, the electric current value reads 2,2 A, this value increases when it changes to the cutting phase. rpm readings in the non-Cutting phase were read at 1200 and decreased by 1050 (steel), 1100 (aluminum).

**Keywords:** industry 4.0, machine tools, *pseudo sensor*.

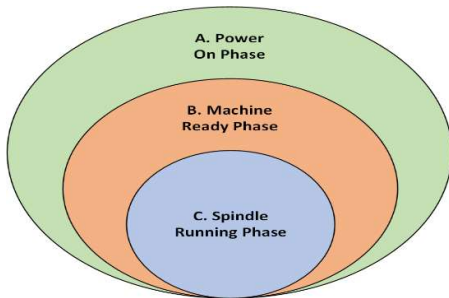
## 1. Pendahuluan

Industri 4.0 pertama kali dipaparkan di Jerman pada *Hannover Fair* di tahun 2011 sebagai simbol awal revolusi industri keempat [1]. Semenjak pemaparan pertamanya, konsep industri 4.0 tiap negara di dunia berusaha mendefinisikan bagaimana menerapkan konsep industri 4.0 yang sesuai dengan negaranya. Beberapa negara memulai mengkonsep paradigma industri 4.0 seperti China dengan "*Made in China 2025*" [2], negara-negara di Eropa dengan label "*Digitising European Industry*", Amerika dengan "*Advanced Manufacturing Partnership and Smart Manufacturing*", Korea Selatan dengan "*Manufacturing Innovation Strategy 3.0*" [3].

Pemerintah Indonesia memulai inisiatif revolusi industri keempat dengan konsep "*Making Indonesia 4.0*" yang dipaparkan oleh Kementerian Perindustrian yang kemudian dipilihlah sektor industri yang akan dijadikan awalan dalam memulai konsep industri 4.0 [4]. Pada negara berkembang seperti Indonesia, terdapat hambatan tersendiri untuk menerapkan konsep industri 4.0 karena kebanyakan pabrik yang berada di negara berkembang merupakan industri padat karya [5]. Oleh karenanya, cara Indonesia melompat ke industri 4.0 untuk agar menjadi negara yang kompetitif di pasar global masih perlu dipertimbangkan. Pada industri manufaktur yang memerlukan fleksibilitas dan efisiensi tinggi. Satu cara dalam mengimplementasi atau mengadopsi konsep industri 4.0 adalah mendesain proses dan

manajemen informasi untuk mencapai *smart manufacturing* [6].

Industri di Indonesia sangat jamak bertipe *job-shop* yang mempunyai karakteristik memproduksi produk dengan varietas yang sangat banyak dengan jumlah yang sangat sedikit. Hal ini menyebabkan beban produksi dengan pembebanan dinamis, kondisi ini akan berimbas langsung pada umur komponen. Dalam rangka menentukan jadwal perawatan mesin. Konsep industri 4.0 yang diawali pada konektivitas tiap elemen produksi sehingga mendapatkan data utilitas mesin seperti *power on state*, *machine ready state*, atau *spindle running state*.

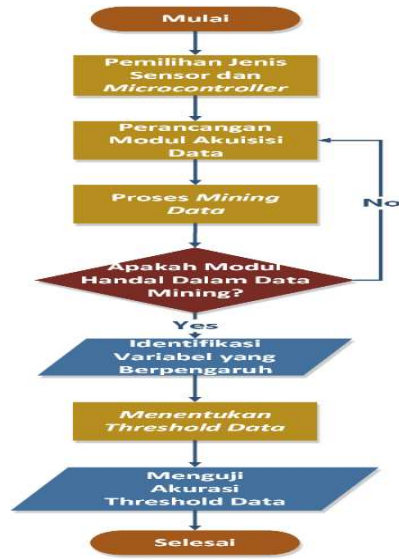


Gambar 1. Diagram venn penggolongan fase operasi mesin perkakas CNC [7].

Data fase-fase proses pemesinan menjadi sangat penting untuk menentukan berapa lama komponen mesin telah bekerja. Sebagai contoh saat mesin dalam fase *power on*, pahat belum memulai memotong benda kerja, durasi pemakaian komponen pahat belum bertambah. Akan tetapi ketika sudah memasuki fase *cutting*, memotong benda kerja, durasi pemakaian pahat akan bertambah. Jika durasi pemakaian tiap komponen dapat diketahui, maka proses manajemen perawatan yang sesuai dapat dijadwalkan. Persoalan yang timbul adalah dalam mengetahui fase *cutting* pada banyak contoh percobaan dilakukan dengan menggunakan sensor *Dynamometer* untuk mengukur gaya pemotongan. Akan tetapi dalam tahap implementasi di lapangan, hal ini sangat tidak memungkinkan karena harga sensor yang terlampaui mahal. Oleh sebabnya perlu substitusi sensor untuk memperoleh fungsi yang sama dengan harga yang lebih terjangkau. Kajian ini bertujuan untuk menjawab permasalahan ini dengan solusi berbiaya murah serta mudah dilakukan, yaitu dengan metode *pseudo sensor*.

## 2. Metode

Kajian ini diawali dengan studi literatur pencarian informasi mengenai objek penelitian dan objek studi kasus melalui literatur-literatur dari jurnal dan buku. Informasi yang dicari merupakan konsep *pseudo sensor* untuk mengemulasi fungsi sensor tertentu untuk dapat menghasilkan informasi mengenai fase pemesinan yang sedang terjadi. Alur metodologi dapat dilihat pada Gambar 2.



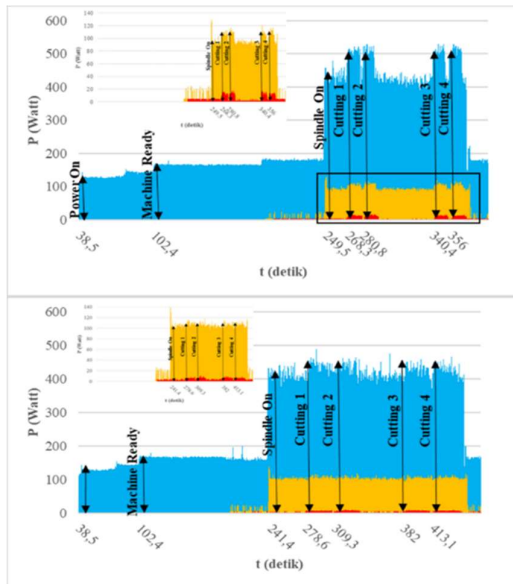
Gambar 2. Diagram alir penelitian.

Konsep *pseudo sensor* bermula dari banyak keterbatasan. Jika mengemulasi akan fungsi sensor yang tidak dipasang melalui pendekatan perangkat lunak, karena beberapa sensor (*pressure*, *touchscreens*, *humidity*) tidak praktis untuk perangkat kecil, karena daya komputasi yang terbatas, area interaksi kecil atau harga suatu sensor yang terlampaui mahal dan akan menambah ongkos perakitan. Sensor *dynamometer* yang berfungsi untuk mengukur gaya pemotongan memiliki harga yang sangat mahal menyebabkan tidak memungkinkannya dipasang pada tiap mesin. Oleh sebabnya perlu substitusi sensor untuk memperoleh fungsi yang sama dengan harga yang lebih terjangkau.



Gambar 3. Konsep pseudo sensor [8].

Mesin perkakas secara umum digerakan menggunakan motor listrik, baik 1 fasa maupun hingga 3 fasa. Sehingga menyebabkan variabel arus listrik menjadi variabel yang tidak boleh dilewatkan dalam memperkirakan fasa operasi mesin. Uji empiris menunjukkan bahwa nilai arus listrik terus berubah seiring dengan proses pemesinan yang berjalan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4. Setiap fase operasi akan memiliki probabilitas untuk perbedaan besaran arus listrik yang digunakan. Hasil pengujian menunjukkan daya listrik akan meningkat seiring dengan peningkatan laju penghasilan geram. Selain itu, data yang diperoleh dapat menunjukkan fase penggunaan mesin perkakas saat *power on*, *machine ready*, *spindle on*, dan *operasi cutting*.

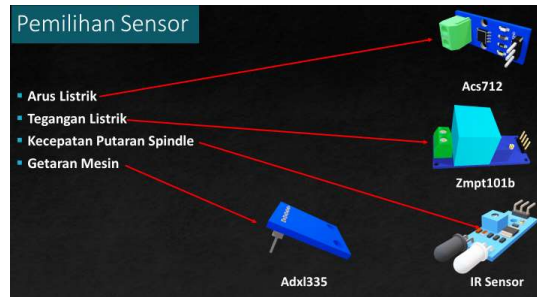


Gambar 4. Grafik pemantauan fase operasi berbasis arus listrik [9].

Pada Gambar 4 dirincikan bagaimana fase-fase yang terjadi pada proses pemesinan dapat didefinisikan. Tapi seringkali fase *cutting* dan *non cutting* sulit terdefinisi seperti yang terlihat pada Gambar 4 grafik sebelah kanan. Mencari *threshold* akan menjadi pekerjaan sulit karena variasi pengerjaan pada proses pemesinan yang akan selalu berubah seperti kedalaman pemotongan, jenis material dan sejenisnya. Begitupula dengan kemungkinan perubahan kenaikan arus tidak signifikan atau tidak berubah sama sekali. Hal ini mendorong variabel tambahan dan metode lain untuk dapat mendefinisikan fase operasi [10].

Menambahkan jumlah variabel yang dilibatkan akan meningkatkan *explanatory power*, akan tetapi bila terlalu banyak variabel yang dilibatkan dan ternyata tidak memiliki pengaruh terhadap prediksi fase operasi mesin. Hal ini hanya menambah kerumitan dalam memprediksi fase operasi sehingga menyulitkan dalam pengerjaannya. Oleh sebab itu dipilihlah 4 jenis variabel yang akan dicoba dilibatkan dalam memprediksi fase operasi dengan asumsi yakni arus listrik akan meningkat saat proses *cutting*, tegangan listrik bernilai kisaran 220 volt sumber listrik PLN, kecepatan putaran *spindle* yang akan menurun saat proses *cutting*, dan getaran mesin meningkat saat terjadi proses *cutting*.

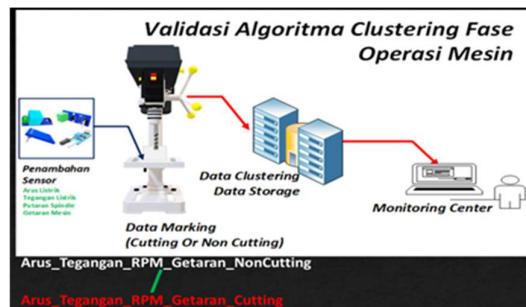
Empat variabel yang dilibatkan memerlukan sensor sebagai alat pembaca besaran nilai tiap variabel yang digunakan. Pemilihan jenis sensor dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Pemilihan sensor pembacaan variabel.

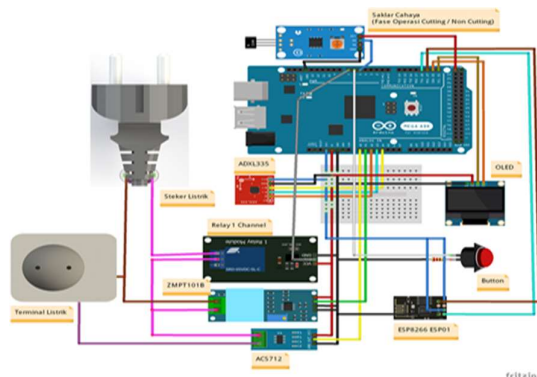
### Alur Aliran Data

Akuisisi data diawali dengan pembacaan nilai tiap variabel yang dibaca oleh masing-masing sensor. Data yang telah didapatkan ditandai sebagai proses *cutting* atau *non cutting* melalui perangkat *data marking*. Data kemudian dikirimkan ke komputer melalui protokol komunikasi serial dengan format “*arus\_tegangan\_RPM\_getaran\_nonCutting*” untuk menandai proses *cutting*. Untuk menandai data sebagai proses *non cutting* akan dikirimkan dengan format “*arus\_tegangan\_RPM\_getaran\_nonCutting*”.



Gambar 6. Flow proses transfer data.

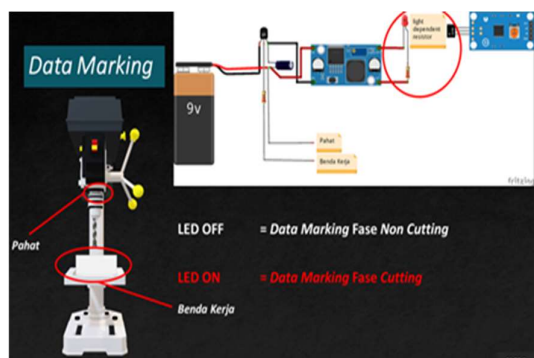
Data diterima komputer untuk kemudian dilakukan proses *clustering* fasa operasi berdasarkan nilai *threshold* yang telah ditentukan secara empiris. Kemudian agar data yang dimiliki lebih informatif, data tersebut dirubah dalam bentuk tabel dan grafik. Alur aliran data akuisisi dapat dilihat pada Gambar 6 di atas dan skematis kelistrikan dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7. Rangkaian kelistrikan komponen modul.

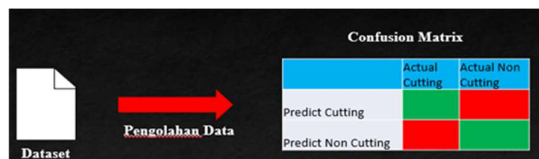
**Proses Validasi Data Threshold Mesin**

Proses *clustering* data yang telah ditentukan berdasarkan nilai *threshold* hasil pengukuran empiris perlu dibuktikan akurasi dalam memperkirakan fase operasi. Oleh karenanya perlu dikembangkan perangkat yang dapat digunakan untuk menandai proses pemesinan yang terjadi sebagai pembanding dengan hasil *clustering*. Perangkat tersebut dinamai *data marking* dengan prinsip kerja memanfaatkan konduktivitas listrik antara mata bor dengan material melalui suplai perangkat *data marking*. Perangkat *data marking* dilengkapi dengan lampu LED, saat mata bor dan material tidak berkontak LED tidak menyala sehingga sensor cahaya LDR bernilai *low* untuk selanjutnya menandai proses pemesinan sebagai fasa *non cutting*. Saat mata bor dan material berkontak arus listrik yang disuplai dari perangkat *data marking* menyalakan LED untuk selanjutnya diterima sensor LDR sebagai sinyal *high* untuk menandai proses sebagai fasa *cutting*. Skematis rancangan *data marking* dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Skematis rancangan perangkat data marking.

Data hasil *clustering* dan hasil dari perangkat *data marking* kemudian dibandingkan seberapa cocoknya nilai yang dihasilkan keduanya melalui metode *confusion matrix*. *Confusion matrix* adalah metode yang menunjukkan seberapa banyak ketidaksesuaian hasil klasifikasi antara metode. Pada Gambar 9 menunjukkan kolom *actual cutting/non cutting* berdasarkan nilai perangkat *data marking*, dan baris *predict cutting/predict non cutting* berdasarkan nilai hasil *cluster*. Ilustrasi dari *confusion matrix* dapat dilihat pada Gambar 9.

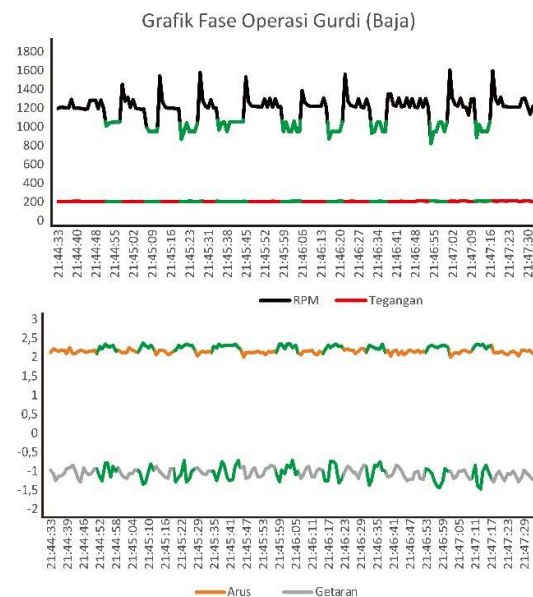


Gambar 9. Ilustrasi confusion matrix.

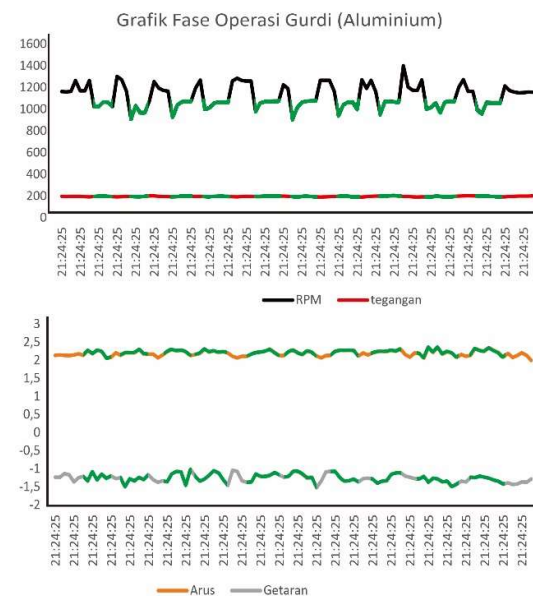
**3. Hasil dan Pembahasan**

Pengujian signifikansi variabel dilakukan dengan cara mengambil data hasil akuisisi proses gurdi pada dua jenis material yakni baja dan aluminium. Kemudian data yang diperoleh di plot pada suatu grafik yang dapat dilihat pada Gambar 10 dan 11. Pada kedua

grafik tersebut setiap variabel diberi warna yang berbeda, di mana sumbu vertikal bernilai besarnya perubahan nilai variabel dan sumbu horizontal menunjukkan kapan data tersebut diterima sistem. Data hasil perangkat *data marking* diwakilkan dengan warna hijau untuk berfungsi sebagai penanda proses yang terjadi. Dalam hal ini fasa *cutting* diwakilkan dengan warna hijau.



Gambar 10. Grafik fase operasi gurdi (baja).

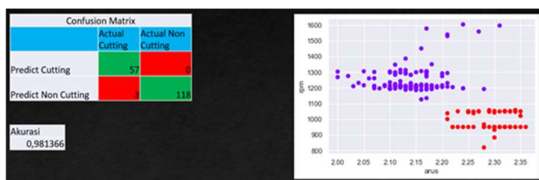


Gambar 11. Grafik fase operasi gurdi (aluminium).

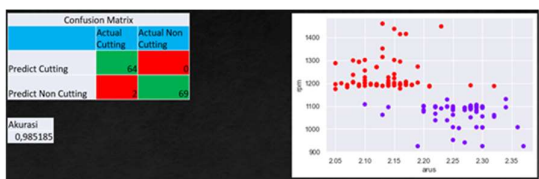
Grafik di atas menunjukkan perubahan nilai variabel bahwa nilai rpm mengalami penurunan setiap kali mengalami fase *cutting*, nilai tegangan terus konstan pada sepanjang pengukuran, nilai arus mengalami peningkatan setiap kali mengalami fase *cutting*, dan nilai getaran yang tidak mengalami perubahan signifikan baik pada fase *cutting* maupun *non cutting*.

### Pengujian Akurasi Nilai Threshold

Akurasi algoritma yang dikembangkan diuji menggunakan metode *confusion matrix*. Metode ini menunjukkan tingkat ketidaksesuaian antara kondisi sebenarnya dengan data *threshold* hasil pengujian empiris. Pada Gambar 12 dan 13 data *actual* adalah data hasil perangkat *data marking*. Sedangkan data *predict* adalah data hasil dari *threshold* hasil pengujian empiris. Pada Gambar 12 dan 13 terdapat grafik yang memperlihatkan pola perubahan nilai yaitu saat fase *non cutting* besarnya arus listrik berkisar dibawah 2,2 A dan untuk rpm berkisar dibawah 1200 rpm. Saat memasuki fase Cutting perubahan nilai arus diatas 2,2 A dan rpm pada pengujian baja berkisar 1050 dan aluminium sebesar 1100 rpm. Akurasi yang ditunjukkan pada Gambar 12 berkisar 0,98/1, di mana hasil itu menunjukkan adanya tiga kesalahan klasifikasi data. Kesalahan yang terjadi ketika perangkat *data marking* menandai tiga data tersebut sebagai proses *cutting*. Sedangkan *threshold* empiris menunjukkan data tersebut sebagai data *non cutting*. Pada Gambar 13, akurasi *threshold* menunjukkan angka 0,98/1. Sama seperti sebelumnya terjadi kesalahan klasifikasi data yang terjadi yaitu sebanyak dua data.



Gambar 12. Fase operasi pemesinan mesin gurdi (baja).



Gambar 13. Fase operasi pemesinan mesin gurdi (aluminium).

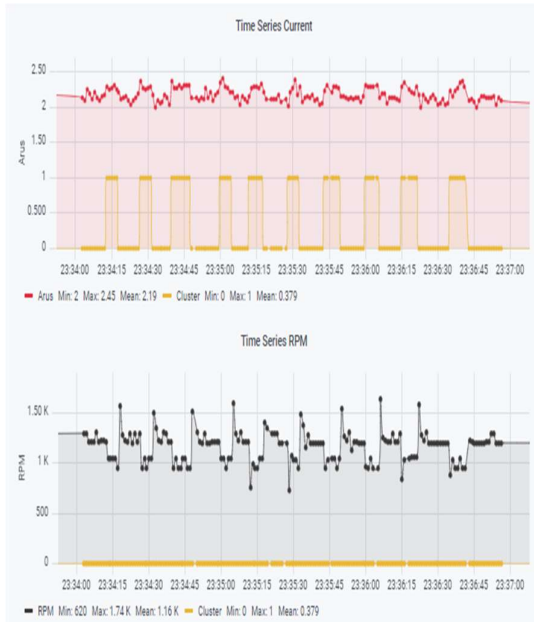
Untuk mengetahui sebab kesalahan klasifikasi dari Gambar 12 dan 13, perlu untuk melihat pola kesalahannya. Pada Gambar 14, kesalahan klasifikasi selalu terjadi ketika perangkat *data marking* sudah menandai data tersebut sebagai proses *cutting* sedangkan algoritma tidak. Kolom hijau mewakili klasifikasi hasil perangkat *data marking* sedangkan kolom kuning adalah hasil *cluster* berdasarkan *threshold* empiris. Prinsip kerja perangkat *data marking* adalah menandai suatu proses pemesinan sebagai *cutting* ketika pahat sudah menyentuh benda kerja sekalipun belum terjadi proses terciptanya geram pemotongan. Hal ini disebabkan keterbatasan dari perangkat *data marking* menandai fasa operasi pemesinan yang terjadi.

Aluminium					Baja Karbon Rendah				
Arus	RPM	Status	Cluster	Waktu	Arus	RPM	Status	Cluster	Waktu
2.16	979	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.11	1283	non Cutting	non Cutting	19/01/2021 21:44
2.14	870	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.14	1283	non Cutting	non Cutting	19/01/2021 21:44
2.12	834	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.14	1192	non Cutting	non Cutting	19/01/2021 21:44
2.13	824	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.17	1285	non Cutting	non Cutting	19/01/2021 21:44
2.15	835	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.1	1198	non Cutting	non Cutting	19/01/2021 21:44
2.25	851	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.28	1192	Cutting	non Cutting	19/01/2021 21:44
2.22	879	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.21	1037	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:44
2.17	882	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.34	1047	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:44
2.16	882	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.29	1048	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:44
2.15	881	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.27	1048	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:44
2.16	897	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.31	1049	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:44
2.1	847	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.16	1451	non Cutting	non Cutting	19/01/2021 21:44
2.11	1186	non Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.17	1272	non Cutting	non Cutting	19/01/2021 21:44
2.16	1270	non Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.13	1313	non Cutting	non Cutting	19/01/2021 21:45
2.18	1179	non Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.11	1205	non Cutting	non Cutting	19/01/2021 21:45
2.16	1182	non Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.13	1290	non Cutting	non Cutting	19/01/2021 21:45
2.15	1181	non Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.13	1290	non Cutting	non Cutting	19/01/2021 21:45
2.2	1182	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.24	1196	non Cutting	non Cutting	19/01/2021 21:45
2.17	769	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.18	1191	non Cutting	non Cutting	19/01/2021 21:45
2.13	883	Cutting	Cutting	19/01/2021 21:35	2.15	1185	non Cutting	non Cutting	19/01/2021 21:45

Gambar 14. Contoh data akuisisi baja dan aluminium.

### Pengujian Visualisasi Data pada Web Modul Pemantau

Hasil dari proses *data mining* perlu ditampilkan sebagai informasi yang berguna dan mempermudah pengguna dalam mengambil kesimpulan berdasarkan data yang ada. Pada Gambar 15, memperlihatkan grafik *time series* dari getaran mesin, arus listrik, voltase listrik dan rpm. Rentang waktu yang ditampilkan dapat diatur dalam sistem.



Gambar 15. Grafik informasi variabel hasil data akuisisi.

Arus	Tegangan	RPM	Waktu	Status
2.14	198	1164	Jan 19 2021 6:23PM	nonCutting
2.15	196	1161	Jan 19 2021 6:23PM	nonCutting
2.14	199	1165	Jan 19 2021 6:23PM	nonCutting
2.13	199	1265	Jan 19 2021 6:23PM	nonCutting
2.15	199	1170	Jan 19 2021 6:23PM	nonCutting
2.18	196	1170	Jan 19 2021 6:23PM	nonCutting
2.14	194	1264	Jan 19 2021 6:23PM	nonCutting
2.27	196	1023	Jan 19 2021 6:23PM	Cutting
2.18	200	1023	Jan 19 2021 6:23PM	Cutting
2.28	198	1065	Jan 19 2021 6:23PM	Cutting
2.24	198	1065	Jan 19 2021 6:23PM	Cutting
2.05	195	1026	Jan 19 2021 6:23PM	Cutting
2.09	194	1302	Jan 19 2021 6:23PM	nonCutting
2.21	195	1272	Jan 19 2021 6:23PM	nonCutting
2.14	198	1168	Jan 19 2021 6:23PM	nonCutting
2.21	196	912	Jan 19 2021 6:23PM	Cutting
2.21	195	1033	Jan 19 2021 6:23PM	Cutting
2.21	195	971	Jan 19 2021 6:23PM	Cutting
2.30	198	971	Jan 19 2021 6:23PM	Cutting
2.17	202	1077	Jan 19 2021 6:23PM	Cutting

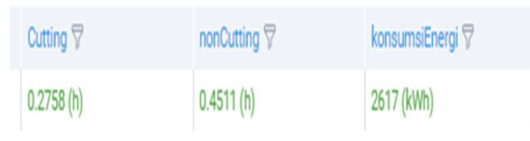
Gambar 16. Tampilan informasi data hasil akuisisi.

Pada Gambar 16 memperlihatkan keseluruhan data yang telah didapatkan dalam proses *data mining*. Data yang didapatkan akan dijabarkan sebagai berikut:

- 1 ID Mesin : adalah data yang menunjukkan identitas mesin yang mengirimkan data akuisisi,

- 2 Arus : adalah data besarnya arus listrik yang terbaca sensor,
- 3 Tegangan : adalah data besarnya tegangan listrik yang terbaca sensor,
- 4 rpm : adalah data kecepatan putaran mesin yang terbaca sensor,
- 5 Getaran : adalah data besarnya getaran mesin yang terbaca sensor,
- 6 Waktu : adalah kapan data akuisisi tersebut terjadi,
- 7 Status : adalah status fase operasi (*Cutting/Non-Cutting*) hasil dari perangkat *data marking*, dan
- 8 Cluster : adalah status fase operasi (*Cutting/Non-Cutting*) hasil dari *threshold* empiris

Selain itu informasi yang bisa didapatkan adalah konsumsi daya listrik mesin. Hal ini merupakan salah satu keunggulan memprediksi fase operasi mesin menggunakan basis energi listrik. Tampilan antarmuka pada Gambar 17 memberikan informasi durasi fase operasi *cutting/noncutting*, konsumsi energi listrik serta informasi identitas mesin yang digunakan. Selain itu, Gambar 17 menampilkan fluktuasi konsumsi daya listrik berupa grafik *time series* yang dapat diatur kurun waktunya.



Gambar 17. Tampilan informasi daya listrik, dan durasi fasa operasi.

#### 4. Kesimpulan

Konsep *pseudo sensor* mampu menggolongkan hasil data akuisisi pada fasa operasi *cutting* dan *non cutting*. Pola perubahan nilai variabel yang dapat diamati polanya. Nilai variabel arus pada fase *non cutting* berkisar pada nilai dibawah 2,2 A, saat terjadi perubahan fase *cutting* arus meningkat menjadi bernilai diatas 2,2 A. Pada variabel rpm saat fasa *non cutting* terjadi nilainya berkisar pada 1200, nilai rpm turun seiring perubahan menjadi fase *cutting* menjadi berkisar 1050 rpm untuk spesimen baja, dan 1100 rpm untuk spesimen aluminium. Karena melibatkan variabel arus dan tegangan listrik sistem juga dapat menghitung konsumsi listrik mesin.

Pada pengujian yang telah dilakukan berdasarkan *threshold* yang telah ditentukan di atas, akurasi pada pengujian spesimen baja sebesar 0,981366/10 (lihat Gambar 12), dan 0,985185/10 (lihat Gambar 13). Besarnya akurasi didapat dengan menggunakan metode *confusion matrix*. Metode ini mengukur berapa kali *threshold* yang ditetapkan salah dalam mengklasifikasikan dataset. Pada spesimen baja terjadi 3 kali kesalahan klasifikasi data, pada

spesimen aluminium terdapat 2 kali kesalahan klasifikasi data (lihat Gambar 12 dan 13). Pada Gambar 14 memperlihatkan pola kesalahan yang terjadi dikarenakan keterbatasan kemampuan perangkat *data marking* dalam menandai proses *cutting*. Hal ini menyebabkan proses pemesinan yang terjadi ditandai sebagai fase *cutting* lebih dini dibandingkan dengan realitanya.

Penyebab variabel tidak signifikan dalam pengujian dapat diinterpretasikan. Variabel tegangan listrik akan cenderung terus konstan terhadap perubahan fase operasi yang terjadi karena menggunakan sumber listrik konstan 220 V dari sumber PLN. Variabel getaran mesin tidak berpengaruh secara signifikan terhadap perubahan fase operasi yang terjadi. Hal ini disebabkan komponen mesin yang digunakan masih dalam kondisi yang baik. Oleh sebabnya, variabel ini nantinya dapat dimanfaatkan dalam memperkirakan kerusakan komponen semisal bearing pada kajian berikutnya.

#### Daftar Pustaka

- [1] Qin J, Liu Y, Grosvenor R. A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and beyond. *Procedia CIRP* [Internet]. 2016;52:173–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>
- [2] Li L. China's manufacturing locus in 2025: With a comparison of "Made-in-China 2025" and "Industry 4.0." *Technol Forecast Soc Change* [Internet]. 2018;135(August 2017):66–74. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2017.05.028>
- [3] Wiktorsson M, Noh S Do, Bellgran M, Hanson L. Smart Factories: South Korean and Swedish examples on manufacturing settings. *Procedia Manuf* [Internet]. 2018;25:471–8. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.06.128>
- [4] Perindustrian K. *Indonesia Making Indonesia*. 2018;
- [5] Hartono R. *Pengembangan Sistem Pemantau Kondisi Riil Sistem Produksi Seminar Kemajuan III (MS-9091)*.
- [6] Raharno S, Cooper G. Jumping to Industry 4.0 through process design and managing information for smart manufacturing: Configurable virtual workstation. *Ind 40 – Shap Futur Digit World*. 2020;47–51.
- [7] Harja HB, Prakosa T, Raharno S, Martawirya YY, Nurhadi I, Nograho AS. Preliminary Development of Real Time Usage-Phase Monitoring System for CNC Machine Tools with a Case Study on CNC Machine VMC 250. *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*. 2018;319(1):0–6.
- [8] Hwang S, Wohn K. PseudoButton: enabling pressure-sensitive interaction by repurposing microphone on mobile device. *Proc CHI '12 Ext Abstr* [Internet]. 2012;1565–70. Available from: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2223673>
- [9] Prayoga H, Yuwana Y, Budi H, Raharno S. Pengembangan Modul Pemantau Fase Operasi pada Mesin Perkakas CNC berdasarkan Pengukuran Arus Listrik.
- [10] Chen X, Li C, Tang Y, Xiao Q. An Internet of Things based energy efficiency monitoring and management system for machining workshop. *J Clean Prod* [Internet]. 2018;199:957–68. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.211>