

# Analisa dan Perbaikan Kerusakan Cutter Mesin *Milling* F4.04

Asep Apriana<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta Kampus Baru - UI Depok 16425

\*Corresponding author: [asep.apriana@mesin.pnj.ac.id](mailto:asep.apriana@mesin.pnj.ac.id)

**Artikel info:** Diterima: 6 April 2023 | Disetujui 29 April 2023 | Tersedia online: 30 April 2023

DOI: [10.32722/jmt.v4i1.5754](https://doi.org/10.32722/jmt.v4i1.5754)

## Abstrak

*Studi kerusakan pada pisau (cutter) mesin milling F4.04 yang sering terjadi dalam industri manufaktur telah dilakukan menggunakan metode analisa kerusakan dan perbaikan. Studi ini bertujuan untuk menganalisis kerusakan pada cutter mesin milling F4.04 dan melakukan perbaikan sesuai dengan standarisasi yang ada. Analisis penyebab kerusakan yang tepat dan perbaikan yang sesuai diharapkan dapat meningkatkan efisiensi, produktivitas, dan mengurangi biaya produksi di industri manufaktur. Analisa ini menggambarkan hasil pengamatan visual terhadap kerusakan pada cutter dalam bentuk patahan pada ujung-ujung dan keausan permukaan. Patahan pada ujung cutter terlihat secara tidak teratur, disebabkan oleh beban pemotongan yang berlebihan. Beban pemotongan berlebih diakibatkan oleh kecepatan pemakanan yang tidak sesuai, dan kedalaman potong yang berlebihan. Ketidakstabilan proses pemotongan juga berkontribusi pada kerusakan cutter. Vibrasi berlebihan pada mesin milling menghasilkan dampak atau benturan yang merusak cutter dan mempercepat keausan. Beban pemotongan yang berlebihan dan ketidakstabilan pemotongan diinisiasi oleh kerusakan komponen bearing dan tidak standart ukuran V-belt yang digunakan. Studi ini memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai jenis kerusakan cutter dan faktor-faktor yang mempengaruhinya, yang dapat digunakan untuk meningkatkan efisiensi pemotongan dan masa pakai cutter. Studi ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam mengidentifikasi penyebab kerusakan yang tepat dan merancang perbaikan yang sesuai, sehingga kualitas produksi dapat ditingkatkan dan risiko kerusakan dapat dikurangi pada mesin milling F4.04 di masa depan.*

*Kata-kata kunci: Analisa kerusakan, Mesin milling, Cutter frais, Patahan dan keausan*

## Abstract

*Failure studies on the F4.04 milling machine cutter that frequently occur in the manufacturing industry have been conducted using applied failure analysis and repair methods. This study aims to analyze the damage to the F4.04 milling machine cutter and carry out repairs according to existing standards. The analysis of the root causes of damage and appropriate repairs is expected to enhance efficiency, productivity, and reduce production costs in the manufacturing industry. This analysis describes the results of visual observations of damage to the cutter in the form of fractures at the edges and surface wear. Fractures at the cutter edges appear irregularly, caused by excessive cutting loads. Excessive cutting loads result from improper feed speeds and excessive cutting depths. Process instability also contributes to cutter damage. Excessive vibration in the milling machine generates impacts or collisions that damage the cutter and accelerate wear. Excessive cutting loads and cutting instability are initiated by damage to bearing components and the use of non-standard V-belt sizes. This study provides a better understanding of the types of cutter damage and influencing factors, which can be utilized to enhance cutting efficiency and cutter lifespan. It is expected that this study will contribute to identifying the exact causes of damage and designing appropriate repairs, thereby improving production quality, and reducing the risk of damage to F4.04 milling machines in the future.*



*Keywords: Failure analysis, Milling machine, Milling cutter, Fractures and wear*

## 1. PENDAHULUAN

Mesin *milling* adalah salah satu jenis mesin perkakas yang digunakan dalam proses produksi di industri manufaktur. Mesin ini memiliki fungsi untuk memotong benda kerja dalam berbagai bentuk dan ukuran dengan menggunakan *cutter* atau *cutter* [1]. Namun, pada saat penggunaan mesin ini, seringkali terjadi kerusakan pada bagian *cutter*nya [2]. Kerusakan pada *cutter* mesin *milling* ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti penggunaan yang tidak sesuai, kurangnya perawatan, atau faktor lain seperti kualitas bahan benda kerja dan kondisi lingkungan kerja yang tidak mendukung [3]–[5]. Kerusakan pada *cutter* mesin *milling* dapat mengakibatkan penurunan kualitas produk yang dihasilkan dan bahkan dapat menghambat proses produksi secara keseluruhan [4], [6].

Untuk memperbaiki kerusakan pada *cutter* mesin *milling*, diperlukan analisa yang tepat terhadap penyebab kerusakan tersebut [7]. Setelah penyebab kerusakan diketahui, langkah selanjutnya adalah melakukan perbaikan yang sesuai dengan standarisasi yang ada. Hal ini dilakukan untuk memastikan bahwa mesin *milling* dapat bekerja dengan optimal dan menghasilkan produk yang berkualitas, serta meminimalkan risiko kerusakan pada *cutter* mesin *milling* dimasa depan [8]. Dalam konteks industri manufaktur, perbaikan kerusakan pada mesin *milling* memiliki peran penting dalam meningkatkan efisiensi dan produktivitas produksi, serta mengurangi biaya produksi [9]. Sayangnya, studi tentang kerusakan *cutter* pada mesin *milling* ini masih jarang dilakukan. Padahal, dengan adanya hasil-hasil investigasi tentang hal ini akan sangat membantu dalam menanggulangi kerusakan dan *unscheduling* perawatan. Oleh karena itu, analisa penyebab kerusakan *cutter* atau *cutter* mesin *milling* dan perbaikan yang dilakukan sesuai dengan standarisasi adalah topik yang sangat relevan untuk diinvestigasi [10], [11].

Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisa penyebab kerusakan *cutter* mesin *milling* F4.04 dan melakukan perbaikan sesuai dengan standarisasi yang ada. Sehingga penelitian yang dilakukan dapat memberikan kontribusi dalam mengidentifikasi penyebab kerusakan pada *cutter* mesin *milling* F4.04 secara tepat dan melakukan perbaikan sesuai dengan standarisasi yang ada [12]. Hal ini diharapkan dapat membantu meningkatkan efisiensi dan produktivitas produksi, serta mengurangi biaya produksi di industri manufaktur [13]. Lebih lanjut penelitian ini bertujuan untuk memperbaiki kualitas produksi dan mengurangi risiko kerusakan pada mesin *milling* F4.04 di masa depan.

## 2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah pengamatan dan monitoring kondisi secara langsung dan melakukan pengujian/pengukuran pada objek yang akan diteliti [7] [14], yaitu pada *cutter* mesin *milling* F4.04. Adapun bagian-bagian yang akan diukur dan dianalisa adalah:

1. Kerusakan yang dialami oleh *cutter* mesin *milling*.
2. Pengukuran pada kepala *frais* vertikal meliputi:
  - a) Penyimpangan putaran arah radial,
  - b) Penyimpangan putaran arah aksial,
  - c) Eksentrisitas lubang konis,
  - d) Eksentrisitas lubang konis diukur pada jarak 200 mm.
3. Pemeriksaan pada *cutting speed*.
4. Penyelarasan meja kerja dalam arah memanjang dan melintang.
5. Kelurusan gerak vertikal lutut

Dalam langkah ini, kami menggunakan alat bantu seperti *dial indicator* dan *test bar* siku yang ditempatkan di pusat meja kerja. Penyangga magnetik dial diletakkan pada bagian mesin yang tidak bergerak, sementara ujung sensor *dial indicator* ditempelkan secara tegak lurus pada *test bar* siku dan digerakkan secara vertikal sepanjangnya. Kami melakukan pengukuran ketepatan posisi permukaan meja kerja terhadap kolom pandu secara simetris secara vertikal menggunakan *dial indicator* dengan ketelitian/resolusi 0,001 mm yang ditempatkan di meja kerja mesin. Untuk memeriksa sejajar atau tidaknya permukaan meja kerja terhadap pergerakan vertikal *spindel* utama, kami menggunakan alat bantu berupa *test bar* lurus yang dipasang pada kepala *milling* serta *dial indicator* dengan ketelitian/resolusi 0,001 mm. Standar ISO memperbolehkan

penyimpangan maksimum kedataran permukaan meja kerja sebesar 0,025 mm untuk panjang lintasan pengujian 300 mm. Untuk tujuan ini, kami memasang jam ukur (*dial indicator*) pada *head milling*.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### Kerusakan pada Cutter

Gambar 1 menampilkan hasil pengamatan secara visual jenis kerusakan yang dialami oleh *cutter*. Kerusakan yang terjadi berupa patahan pada ujung-ujung *cutter* dan keausan pada bagian permukaan. Berdasarkan pengamatan, patahan pada ujung *cutter* berupa patahan getas (rompal) secara tidak beraturan. Patahan ini dapat disebabkan oleh beban pemotongan yang berlebihan. Jika *cutter* mesin *milling* dipaksa melakukan pemotongan yang melebihi batas kapasitasnya, maka *cutter* dapat mengalami patah atau retak [13][15]. Beban pemotongan yang berlebihan bisa disebabkan oleh kecepatan pemakanan (*feed rate*) yang terlalu tinggi atau sebaliknya, kedalaman potong yang terlalu besar, atau pemilihan *cutter* yang tidak sesuai untuk bahan yang sedang diproses. Selanjutnya, ketidakstabilan proses pemotongan juga dapat menyebabkan patahan pada ujung hingga bagian batang dari *cutter* [16]. Jika proses pemotongan tidak stabil, misalnya terjadi getaran atau vibrasi berlebihan pada mesin *milling*, maka ini dapat menyebabkan patahan pada *cutter*. Getaran yang berlebihan dapat merusak integritas *cutter* dan mempercepat terjadinya keausan atau retakan pada permukaan *cutter*.

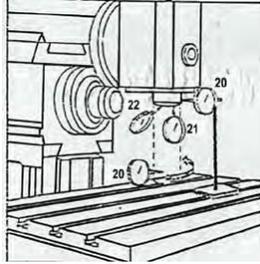


Gambar 1. Kerusakan *cutter* mesin *milling* F4.04

### Penyimpangan dan Eksentrisitas

Tabel 1 menunjukkan hasil pengukuran pada bagian kepala *frais* vertikal. Pengukuran meliputi penyimpangan dan eksentrisitas baik pada arah radial dan aksial serta pada lubang konis. Sementara batasan penyimpangan yang diijinkan disesuaikan dengan standar yang telah ditentukan. Hasil pengukuran dan pemeriksaan awal (A) menunjukkan bahwa pada putaran arah radial dan arah aksial menunjukkan adanya penyimpangan sebesar 1  $\mu\text{m}$ . Sementara pada bagian eksentrisitas lubang konis, tidak terdapat penyimpangan. Penyimpangan ini dapat menghasilkan putaran yang tidak stabil atau tidak berpusat pada senter [12]. Hal ini berdampak pada pergerakan yang *cutter* yang kasar dengan amplitudo yang besar selama penyayatan material. Sehingga proses penyayatan tidak terjadi secara teratur dan cenderung bersifat *impack* atau benturan [8]. Kondisi ini tentunya akan melemahkan kekuatan *cutter* dan dapat mengikis permukaan dan sudut *cutter*. Situasi ini sesuai dengan gambar 1 yang menunjukkan kerusakan *cutter frais* yang patah pada bagian ujung atau sisi tajamnya dan permukaannya. Selanjutnya hasil pengukuran lanjutan (B), semua bagian yang diperiksa tidak mengalami penyimpangan. Pengukuran lanjutan ini dilakukan setelah mengganti *bearing* yang menumpu poros *spindel* vertikal atau *Spindle Head Milling*. Proses pembongkaran, penggantian dan pemasangan *bearing* ini ditunjukkan pada gambar 2. Berdasarkan hasil pengukuran dan pengujian, ketikastabilan putaran *spindel* yang menghasilkan getaran pada *cutter*, diyakini bahwa penyebab meningkatnya keausan yang tidak normal pada *cutter cutter* hingga patahan pada permukaan dan sudut *cutter* adalah karena kerusakan pada komponen *bearing*. Sehingga penggantian *bearing* ini adalah salah satu langkah efektif dalam menurunkan kerusakan pada *cutter cutter* mesin *milling* F4.04.

Tabel 1. Hasil pengukuran kepala *frais* vertikal pada mesin *milling* F4.04

No	Bagian yang diperiksa	Kesalahan yang diijinkan	Hasil pemeriksaan A	Hasil pemeriksaan B	Gambar kepala <i>frais</i> vertikal
1	Penyimpangan Putaran Arah Radial	0.005	0.006	0.005	
2	Penyimpangan Putaran Arah Aksial	0.005	0.007	0.005	
3	Eksentrisitas lubang konis	0.005	0.005	0.005	
4	Eksentrisitas lubang konis diukur pada jarak 200 mm	0.020	0.020	0.005	



(a)

(b)

Gambar 2. (a) Pembongkaran *Spindle Head Milling*, (b) Penggantian dan pemasangan *Bearing Spindle Head*.

### *Cutting Speed*

Selanjutnya adalah pemeriksaan kecepatan potong atau *cutting speed* pada *cutter*. Pemeriksaan dilakukan dengan membandingkan antara regulator dengan putaran aktual pada *spindel*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa terjadi ketidaksesuaian antara putaran pada regulator *setting* dengan rpm *spindel* aktual. Reduksi putaran ini terjadi hingga 15,38%. Ketidaksesuaian putaran ini akan mempengaruhi putaran *cutter* yang secara langsung akan berdampak pada laju pemotongan. Laju pemotongan yang tidak sesuai dengan bahan yang akan dipotong akan berdampak pada kerusakan material dan *cutter*. Berdasarkan pada pengamatan dan pengukuran rpm ini, didapatkan bahwa *V-belt* yang digunakan adalah tidak standar atau lebih pendek dari ukuran aslinya. Ukuran *V-belt* yang lebih pendek dapat meningkatkan ketegangan *belt* saat dipasang diantara dua puli. Mengingat sistem transmisi kecepatan ini menggunakan sistem semi otomatis, dimana ketegangan *belt* terhadap puli dapat berpengaruh pada reduksi kecepatan putaran, sehingga rpm puli yang digerakan akan menurun ketika ketegangan *belt* meningkat. Gambar 3 menunjukkan penggantian dan pemasangan *V-belt* pada sistem transmisi untuk rpm.



Gambar 3. Penggantian dan pemasangan *V-belt*.

### Penyelarasan Arah Memanjang dan Melintang

#### a. Penyelarasan dalam arah memanjang

Pada bagian kiri *spirit level*, terlihat pembacaan pada angka garis, sementara pada bagian kanan *spirit level* menunjukkan angka 0. *Spirit level* yang digunakan dalam pengujian ini memiliki ketelitian 0,02 mm per divisi dalam jarak 1000 mm. Oleh karena itu, penyimpangan yang terjadi dalam proses penyelarasan meja kerja mesin ini rata-rata sebesar 1,5 divisi, yang berarti dalam pengukuran sepanjang 1000 mm, meja ini memiliki penyimpangan sebesar 0,03 mm (*slop* kemiringan garis).



Gambar 4. Pengukuran Penyelarasan.

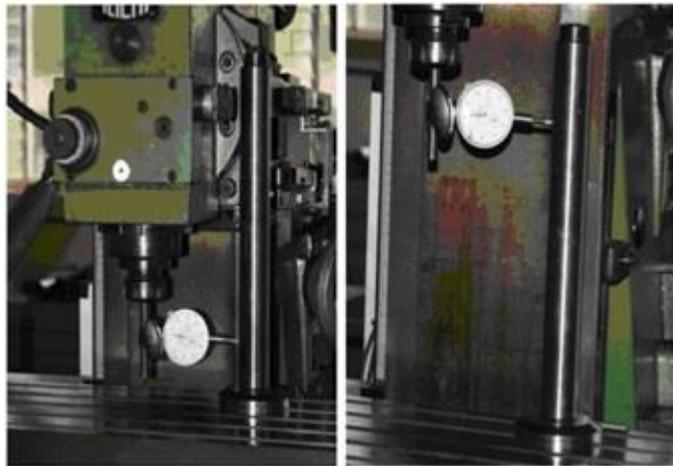
#### b. Penyelarasan dalam arah memanjang

Menunjukkan pembacaan pada bagian kiri *spirit level* pada angka min satu (-1), sedangkan pada bagian kanan menunjukkan angka +1, sehingga penyimpangan yang terjadi pada arah melintang ini bisa dikatakan tidak ada (datar).



Gambar 5. Pengukuran Penyelarasan Meja Kerja Arah melintang.

Data hasil pengujiannya adalah batas toleransi yang diperbolehkan adalah 0,025 mm untuk pengujian dengan jarak lintasan sepanjang 300 mm. Tanda minus dalam tabel mengindikasikan bahwa pada saat pengujian dilakukan, daerah yang diuji berada lebih jauh dari garis skala nol dibandingkan dengan titik awal (titik nol), begitu pula sebaliknya (lihat Gambar 2). Dalam pengujian ini, alat bantu yang digunakan adalah *test bar* siku dan *dial indicator* dengan ketelitian/resolusi 0,001 mm, serta magnet penyangganya yang ditempatkan pada bagian yang tidak bergerak. *Test bar* diletakkan di tengah-tengah meja mesin. Saat *dial indicator* berada pada posisi yang dianggap sebagai titik awal (paling bawah), posisi jarum pengukuran diatur pada titik 0. Setelah *dial gauge* digerakkan secara vertikal ke arah atas (sejauh 300 mm), jarum *dial indicator* menunjukkan angka negatif, menunjukkan bahwa bagian yang diukur semakin menjauh dari garis skala nol.



Gambar 6. Pengukuran/Pengujian.

## Kelurusan Gerak Vertikal Lutut

### a. Kelurusan Gerak Vertikal Lutut

Tabel 2. Hasil pengujian kelurusan gerak vertikal lutut setelah perbaikan

Posisi	Jarak (mm)	Penyimpangan (mm)		
		Naik	Turun	Rata-rata
0	0	0,000	0,000	0,000
1	35	-0,012	-0,014	-0,013
2	60	-0,013	-0,016	-0,0145
3	85	-0,016	-0,017	-0,016
4	100	-0,020	-0,021	-0,021
5	120	-0,022	-0,024	-0,023
6	160	-0,025	-0,027	-0,026
7	185	-0,028	-0,030	-0,029
8	200	-0,022	-0,022	-0,022

Berdasarkan data hasil pengujian di atas, dapat disimpulkan bahwa penyimpangan yang terjadi adalah sebesar 0,0210 untuk pengujian dengan panjang 300 mm, sedangkan batas penyimpangan yang diizinkan menurut standar adalah 0,025 mm per 300 mm. Dengan demikian, penyimpangan yang terjadi masih berada dalam batas yang diizinkan. Kemungkinan penyebabnya adalah faktor-faktor berikut:

- Setelan pasak luncur (*wedge*) yang menjadi kendur.
- Adanya keausan pada permukaan bidang luncur *dove tail*, sehingga gerakan meja kerja tidak lagi tegak lurus terhadap kolom mesin.

### b. Kelurusan Gerak Vertikal Lutut

Pengukuran ketegaklurusan dilakukan terhadap gerak vertikal sumbu utama. Penyimpangan maksimum yang diizinkan untuk pengujian ini adalah 0,025 mm untuk pengujian sepanjang lintasan 300 mm. Alat yang digunakan adalah test bar lurus yang dipasang pada spindel head *milling* dan jam ukur (dial indikator & magnet *stand*) yang dipasang pada meja kerja ditunjukkan pada gambar 7.



Gambar 7. Pengukuran ketegaklurusan meja kerja terhadap gerak vertikal sumbu utama.

Tabel 3. Hasil pengujian kedataran permukaan meja kerja setelah penggantian

Posisi	Jarak (mm)	Penyimpangan		
		Naik	Turun	Rata-rata
0	0	0,000	0,000	0,000
1	35	0,005	-0,008	-0,007
2	60	-0,004	-0,006	-0,005
3	85	-0,021	-0,029	-0,025
4	100	-0,024	-0,030	-0,027
5	120	-0,020	-0,028	-0,024
6	160	-0,012	-0,030	-0,021

Posisi	Jarak (mm)	Penyimpangan		
		Naik	Turun	Rata-rata
7	185	- 0,010	- 0,036	- 0,023
8	200	- 0,007	-0,011	-0,009

Dari tabel di atas, terlihat bahwa penyimpangan maksimum yang terjadi adalah sebesar 0,0485 mm, sehingga masih berada dalam batas toleransi yang diizinkan. Penyimpangan ini dapat disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain:

- Sering terjadinya benturan pada meja kerja yang mengakibatkan deformasi pada meja kerja.
- Terjadinya keausan pada meja kerja akibat gesekan dengan benda kerja atau kontak dengan *cutter*.

Dari hasil kelima jenis pengujian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa dengan mengganti komponen yang mengalami penyimpangan berdasarkan hasil pengukuran, penyimpangan tersebut masih berada dalam batas toleransi yang sesuai dengan standar perawatan industri. Dengan melakukan proses pembongkaran, penggantian beberapa komponen, pemasangan kembali, dan pengukuran/pengujian, mesin *milling* F4.04 dapat beroperasi dengan performa yang optimal dan dapat digunakan baik untuk keperluan pembelajaran mahasiswa maupun proses produksi.

#### 4. KESIMPULAN

Analisa kerusakan *cutter* mesin *milling* F4.04 dan perbaikan sesuai dengan standarisasi telah dilakukan. Berdasarkan observasi secara visual, pengujian, pengukuran dan analisa kerusakan, kerusakan yang terjadi pada *cutter* adalah patahan pada ujung-ujung dan keausan pada permukaan. Patahan pada ujung terjadi karena beban pemotongan yang berlebihan dan kecepatan pemotongan yang tidak sesuai. Ketidakstabilan proses pemotongan yang dipengaruhi oleh getaran atau vibrasi berlebihan, berkontribusi dalam laju patahan dan keausan pada *cutter*. Beban dan laju pemotongan yang berlebihan dan tidak sesuai, serta getaran *cutter* yang tinggi disebabkan karena kerusakan pada komponen bearing dan ketidaksesuaian ukuran *V-belt* pada transmisi berdampak pada meningkatnya keausan yang tidak normal pada permukaan *cutter* dan menimbulkan patahan pada ujungnya. Perbaikan dan normalisasi pada kedua komponen tersebut mengembalikan kinerja *cutter* secara optimal.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat Politeknik Negeri Jakarta atas dukungannya finansialnya pada penelitian ini dan kepada Teknisi, Jurusan dan Bengkel Teknik Mesin atas dukungannya dalam kegiatan ilmiah ini. Penulis juga berterima kasih kepada Iwan Susanto atas dikusi yang bermanfaat dalam menyelesaikan penelitian dan penulisan artikel ini.

#### REFERENSI

1. A. Gil Del Val, X. Cearsolo, A. Suarez, F. Veiga, I. Altuna, and M. Ortiz, "Machinability characterization in end milling of Invar 36 fabricated by wire arc additive manufacturing," *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 23, pp. 300–315, 2023, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.12.182.
2. J. Airao, B. Chaudhary, V. Bajpai, and N. Khanna, "An Experimental Study of Surface Roughness Variation in End Milling of Super Duplex 2507 Stainless Steel," *Mater. Today Proc.*, vol. 5, no. 2, pp. 3682–3689, 2018, doi: 10.1016/j.matpr.2017.11.619.
3. K. Kamdani, S. Hasan, A. F. I. Ahmad Ashaary, M. A. Lajis, and E. A. Rahim, "Study on tool wear and wear mechanisms of end milling nickel-based alloy," *J. Tribol.*, vol. 21, pp. 82–92, 2019.
4. K. Monkova, S. Sun, P. P. Monka, S. Hloch, and M. Belan, "Durability and tool wear investigation of HSSE-PM milling cutters within long-term tests," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 108, no. December 2019, p. 104348, 2020, doi: 10.1016/j.engfailanal.2019.104348.
5. K. G. Anthymidis, A. Balouktsis, C. David, and A. Trakali, "Wear of cutting tools used in *milling* treatments," *Key Eng. Mater.*, vol. 465, no. January 2011, pp. 165–168, 2011, doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.465.165.
6. T. Bakša, T. Kroupa, P. Hanzl, and M. Zetek, "Durability of cutting tools during machining of very hard and solid materials," *Procedia Eng.*, vol. 100, no. January, pp. 1414–1423, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.01.511.

7. Y. Zhou and W. Xue, "Review of tool condition monitoring methods in milling processes," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 96, no. 5–8, pp. 2509–2523, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-1768-5.
8. A. V. Muthusamy Subramanian, M. D. G. Nachimuthu, and V. Cinnasamy, "Assessment of cutting force and surface roughness in LM6/SiCp using response surface methodology," *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 283–296, 2017, doi: 10.1016/j.jart.2017.01.013.
9. P. Y. Sevilla, J. C. Jauregui, G. Herrera, and J. B. Robles, "Efficient method for detecting tool failures in high-speed machining process," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 227, no. 4, pp. 473–482, 2013, doi: 10.1177/0954405412473906.
10. Z. C. Lin and D. Y. Chen, "A study of cutting with a CBN tool," *J. Mater. Process. Tech.*, vol. 49, no. 1–2, pp. 149–164, 1995, doi: 10.1016/0924-0136(94)01321-Q.
11. P. Twardowski, S. Legutko, G. M. Krolczyk, and S. Hloch, "Investigation of wear and tool life of coated carbide and cubic boron nitride cutting tools in high speed milling," *Adv. Mech. Eng.*, vol. 7, no. 6, pp. 1–9, 2015, doi: 10.1177/1687814015590216.
12. L. Qin, X. Zhou, and X. Wu, "Research on Wear Detection of End Milling Cutter Edge Based on Image Stitching," *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 16, 2022, doi: 10.3390/app12168100.
13. J. Rech, Y. C. Yen, M. J. Schaff, H. Hamdi, T. Altan, and K. D. Bouzakis, "Influence of cutting edge radius on the wear resistance of PM-HSS milling inserts," *Wear*, vol. 259, no. 7–12, pp. 1168–1176, 2005, doi: 10.1016/j.wear.2005.02.072.
14. A. G. Rehorn, J. Jiang, and P. E. Orban, "State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: A review," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 26, no. 7–8, pp. 693–710, 2005, doi: 10.1007/s00170-004-2038-2.
15. H. Li, Y. Wang, P. Zhao, X. Zhang, and P. Zhou, "Cutting tool operational reliability prediction based on acoustic emission and logistic regression model," *J. Intell. Manuf.*, vol. 26, no. 5, pp. 923–931, 2015, doi: 10.1007/s10845-014-0941-4.
16. X. Wu, Y. Liu, X. Zhou, and A. Mou, "Automatic identification of tool wear based on convolutional neural network in face milling process," *Sensors (Switzerland)*, vol. 19, no. 18, 2019, doi: 10.3390/s19183817