

OPTIMASI JALUR PEMOTONGAN 2D POCKET MACHINING BERBASIS METODE TRAVELING SALESMAN PROBLEM UNTUK MINIMASI RETRACT MATA PAHAT

1st Haekal Arkan Muhammad
Faculty of Industrial Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

haekalarkan@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Rino Andias Anugraha
Faculty of Industrial Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

rinoandias@telkomuniversity.ac.id

3rd Teddy Sjafrizal
Faculty of Industrial Engineering
Telkom University
Bandung, Indonesia

teddysjafrizal@telkomuniversity.ac.id

Abstrak— Strategi contour-parallel pada pocket milling 2D dapat menghasilkan lintasan tidak efisien, terutama untuk geometri kompleks seperti Modular Curved-Island, karena banyaknya retract dan repositioning. Kajian ini mengusulkan metode PRT-GCAM, yang menggabungkan ekstraksi koordinat dari G-code CAM, penyederhanaan titik menggunakan Distance-Based Reduction dan RDP, serta optimasi urutan titik dengan algoritma Lin-Kernighan Helsgaun (LKH) berbasis TSP. Evaluasi melalui simulasi dan pemotongan aktual pada Aluminium 6061 menunjukkan pengurangan waktu pemesinan lebih dari 60% dan penurunan signifikan jumlah retract, menjadikan PRT-GCAM solusi efisien untuk lintasan pocket milling 2D.

Kata kunci— 2D pocket milling, optimasi lintasan, G-code, TSP, Lin-Kernighan Helsgaun, penyederhanaan titik, CNC, PRT-GCAM.

I. PENDAHULUAN

Pemanfaatan mesin Computer Numerical Control (CNC) telah menjadi bagian penting dalam industri manufaktur modern karena kemampuannya menghasilkan produk presisi secara otomatis dan berulang [1]. Salah satu proses umum yang digunakan adalah 2D pocket milling, yaitu penghilangan material dalam area tertutup untuk membentuk rongga presisi [2]. Strategi contour-parallel sering diterapkan dalam proses ini karena kemampuannya mengosongkan area secara sistematis, namun pada geometri kompleks seperti Modular Curved-Island, pendekatan ini menghasilkan banyak gerakan non-produktif berupa retract dan repositioning [3], sehingga menurunkan efisiensi waktu pemesinan.

Permasalahan tersebut mendorong perlunya pendekatan lintasan pemotongan yang lebih efisien. Salah satu solusi yang berpotensi adalah penggunaan algoritma optimasi lintasan seperti Traveling Salesman Problem (TSP). [4] menunjukkan keberhasilan algoritma Lin-Kernighan Helsgaun (LKH) dalam menyusun jalur bebas retraction pada proses WAAM. LKH juga terbukti efektif untuk berbagai proses manufaktur kompleks seperti laser cutting dan additive manufacturing [5], [6], [7], menjadikannya kandidat kuat untuk optimasi lintasan pocket milling.

Penerapan pendekatan TSP dalam konteks pocketing dimungkinkan dengan mengekstraksi titik koordinat dari G-code hasil CAM, kemudian dilakukan penyederhanaan dengan Distance-Based Point Reduction dan Ramer-Douglas-Peucker (RDP) untuk menghilangkan redundansi [8]. Titik-titik yang telah disederhanakan dioptimalkan menggunakan algoritma LKH. Untuk validasi, digunakan

material Aluminium 6061 karena sifatnya yang sesuai untuk proses pemesinan [9].

Berdasarkan pertimbangan tersebut, kajian ini mengusulkan pendekatan PRT-GCAM (Point Reduction and TSP using G-code from CAM), yang bertujuan mengoptimalkan lintasan pemotongan pocket milling 2D. Efektivitas pendekatan ini akan dibandingkan dengan strategi contour-parallel konvensional menggunakan simulasi dan pemotongan aktual pada material Aluminium 6061.

II. KAJIAN TEORI

A. Pocket Milling: Strategi Contour-parallel

Pocket milling merupakan proses pemesinan penting dalam industri manufaktur untuk membentuk rongga pada benda kerja, baik berbentuk persegi, lingkaran, maupun bentuk kompleks dengan island di dalamnya [10], [11], [12]. Dalam praktiknya, perencanaan jalur pemotongan dapat dilakukan dengan berbagai strategi, seperti zigzag dan one-directional, yang cocok untuk geometri sederhana [10]. Namun, untuk bentuk pocket yang kompleks, dibutuhkan pendekatan berbasis CAM, seperti strategi contour-parallel (CP).

Strategi CP banyak digunakan pada proses mold dan dies karena kemampuannya dalam mengosongkan area tertutup secara bertahap [13]. Namun, pendekatan ini menghadapi kendala teknis, terutama saat menyusun lintasan antar loop offset (OLE), seperti munculnya retract dan repositioning akibat nested structure yang rumit [3]. Permasalahan tersebut diklasifikasikan ke dalam tiga tantangan utama: penentuan offset curve, pencegahan uncut region, dan perancangan lintasan bebas retraction.

Untuk mengatasi masalah ini, [3] mengembangkan pendekatan berbasis entitas jalur, seperti Contour Loop Entity (CLE), Offset Loop Entity (OLE), dan Path Link Entity (PE), yang membentuk keseluruhan struktur lintasan (Tool Path Entity/TPE). Namun, struktur OLE yang kompleks sering menyebabkan lintasan tidak optimal, terutama ketika tidak dapat dirangkai efisien oleh PE.

Sebagai solusi alternatif, kajian ini mengusulkan metode PRT-GCAM (Point Reduction and TSP using G-code from CAM), yang memanfaatkan titik hasil ekstraksi G-code, disederhanakan melalui metode Distance-Based dan Ramer-Douglas-Peucker (RDP), lalu diurutkan menggunakan algoritma Lin-Kernighan Helsgaun (LKH) untuk menyelesaikan masalah lintasan berdasarkan pendekatan Traveling Salesman Problem (TSP). Pendekatan ini diharapkan mampu menghasilkan jalur pocketing yang efisien dan bebas dari gerakan non-produktif.

B. TSP dan Algoritma LKH

Traveling Salesman Problem (TSP) adalah permasalahan optimasi kombinatorial yang bertujuan menemukan lintasan terpendek untuk mengunjungi semua titik tepat satu kali dan kembali ke titik awal [14]. TSP termasuk masalah NP-Hard, di mana kompleksitasnya meningkat drastis seiring bertambahnya jumlah titik [5]. Salah satu pendekatan efisien untuk menyelesaikannya adalah algoritma Lin-Kernighan (LK), yang bekerja melalui pertukaran sisi (k-opt) secara dinamis untuk memperpendek lintasan [15], [16].

Varian lanjutannya, Lin-Kernighan Helsgaun (LKH), dikembangkan oleh [16] dan dikenal sangat efisien untuk kasus TSP berskala besar. LKH menggabungkan variable-depth search, α -nearness, dan strategi backtracking untuk menghindari solusi lokal dan memperbaiki efisiensi pencarian.

Dalam konteks pocket milling 2D, strategi contour-parallel sering menghasilkan banyak gerakan retract dan repositioning, terutama pada bentuk pocket kompleks. Dengan menerapkan algoritma LKH pada titik koordinat pemotongan, lintasan dapat dioptimasi menjadi sirkuit Hamiltonian, sehingga gerakan non-produktif dapat diminimalkan dan efisiensi pemotongan meningkat [15], [16].

C. Ekstraksi Koordinat XY

Dalam penelitian ini, koordinat XY yang merepresentasikan lintasan alat potong diambil langsung dari G-code hasil proses CAM menggunakan post-processor xy dari Autodesk Fusion Library. Post-processor ini menghasilkan file CSV yang memuat pasangan koordinat X dan Y berdasarkan gerakan pemotongan maupun gerakan cepat (rapid). Pemilihan metode ini didasarkan pada kemudahan ekstraksi serta kesesuaian titik dengan kontur pemotongan yang telah ditentukan dalam CAM, termasuk parameter seperti stepover. Menurut Smid [10], G-code merupakan perintah standar dalam CNC, seperti G00 (gerakan cepat) dan G01 (gerakan linier), yang mencantumkan posisi X dan Y secara eksplisit. Titik-titik hasil ekstraksi ini dapat langsung digunakan sebagai input untuk algoritma TSP tanpa perlu penyesuaian tambahan.

D. Metode Reduksi Titik

Ramer-Douglas-Peucker (RDP) adalah algoritma penyederhanaan kurva yang bekerja dengan mempertahankan bentuk utama kontur sambil mengurangi jumlah titik secara signifikan [17]. Algoritma ini secara rekursif menghubungkan dua titik ekstrem dan menyimpan titik dengan jarak terjauh jika melebihi ambang batas tertentu (epsilon), lalu membagi kurva dan mengulang proses tersebut. Dalam penelitian ini, RDP digunakan untuk menyaring titik-titik signifikan dari kontur hasil CAM sebelum dioptimasi oleh solver TSP.

Selain itu, Distance-Based Point Reduction digunakan untuk menghapus titik-titik yang terlalu berdekatan secara geometris. Dengan menghitung jarak Euclidean antar titik berturut-turut dan menetapkan ambang batas (δ), hanya titik-titik dengan jarak signifikan yang dipertahankan. Persamaan jarak antar titik dihitung dengan rumus:

$$d(p_i, p_{i-1}) = \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2} \quad (1)$$

Gabungan metode ini dilakukan dengan urutan: Distance-Based terlebih dahulu untuk mengurangi kepadatan data, kemudian dilanjutkan RDP untuk mempertahankan struktur geometri utama. Pendekatan ini bertujuan menghasilkan jalur yang lebih efisien dan bebas dari noise saat digunakan dalam algoritma TSP Lin-Kernighan Helsgaun (LKH), sehingga dapat mengurangi gerakan non-produktif dalam pemesinan pocket dengan geometri kompleks.

E. Pengujian Jalur Pemotongan

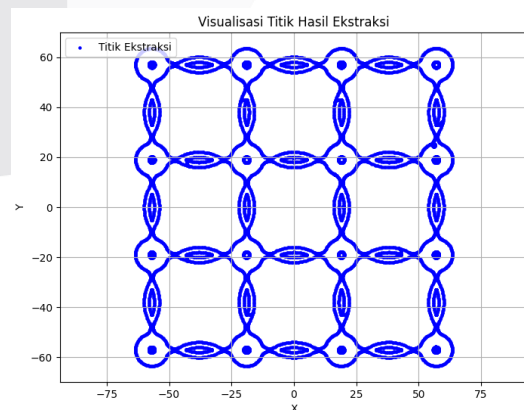
Aluminium 6061 digunakan untuk validasi metode PRT-GCAM melalui pemotongan aktual karena mudah dikerjakan, memiliki kekuatan tinggi, dan tahan korosi [9], [18]. Sifat mekanisnya yang stabil memungkinkan evaluasi hasil pemotongan secara konsisten saat dibandingkan dengan strategi contour-parallel konvensional.

III. METODE

Metode dimulai dengan ekstraksi koordinat dari G-code hasil CAM strategi contour-parallel, dilanjutkan dengan penyederhanaan titik menggunakan Distance-Based Reduction dan algoritma Ramer-Douglas-Peucker (RDP). Selanjutnya, lintasan dioptimasi menggunakan algoritma TSP Lin-Kernighan Helsgaun (LKH). Hasil lintasan kemudian diverifikasi secara visual dan melalui simulasi untuk memastikan jalur tetap sesuai kontur dan tidak meninggalkan area tidak terpotong. Pendekatan ini bertujuan menghasilkan lintasan lebih efisien dibandingkan strategi pemotongan konvensional.

A. Ekstraksi Titik Koordinat G-code

Koordinat XY lintasan alat potong diekstraksi dari G-code hasil CAM menggunakan strategi contour-parallel di Autodesk Inventor CAM. Proses post-processing menggunakan post-processor xy dari Autodesk Fusion Library menghasilkan file CSV yang memuat titik-titik gerakan alat potong. Visualisasi hasil ekstraksi ditampilkan pada Gambar 1. Data ini digunakan sebagai input awal dalam proses optimasi.



GAMBAR 1 (Visualisasi Titik Hasil Ekstraksi)

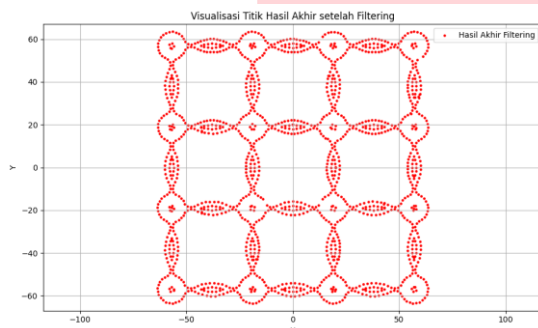
B. Penyederhanaan Titik

Data hasil ekstraksi berisi titik-titik duplikat dan terlalu rapat, terutama pada bagian kurva. Untuk mengurangi redundansi dan beban komputasi, dilakukan penyederhanaan

data menggunakan Distance-Based Point Reduction dan Ramer–Douglas–Peucker (RDP) secara berurutan melalui skrip Python. Efektivitas penyederhanaan ditunjukkan oleh penurunan jumlah titik seperti ditampilkan pada Tabel IV 1, serta divisualisasikan pada Gambar 2.

TABEL 1 (Jumlah Titik dalam Tiap Tahapan)

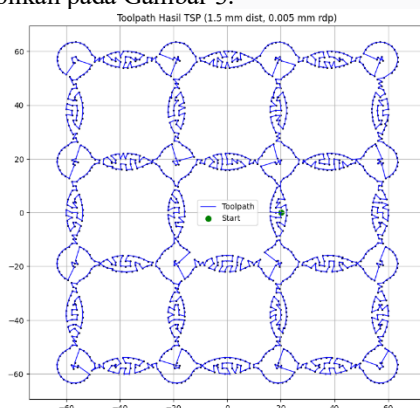
Tahap	Jumlah Titik
Hasil Ekstraksi Awal	8028
Setelah Hapus Duplikat	7888
Setelah Distance Filtering (Threshold: 1.5 mm)	1455
Setelah RDP Filtering (Epsilon: 0.005 mm)	1451



GAMBAR 2 (Visualisasi Titik Hasil Filtering)

C. Optimasi Lintasan dengan Solver LKH

Data titik hasil penyederhanaan disusun ulang menggunakan solver Lin-Kernighan Helsgaun (LKH) untuk menghasilkan urutan lintasan optimal tanpa retract. Hasil komputasi menunjukkan cost lintasan sebesar 2799, sangat mendekati lower bound 2781.8 dengan gap 0,00%, dan waktu komputasi selama 31,85 detik. Visualisasi lintasan hasil solver LKH ditampilkan pada Gambar 3.

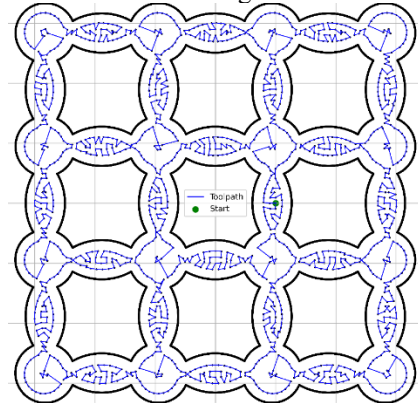


GAMBAR 3 (Visualisasi Lintasan Hasil Solver LKH)

D. Verifikasi Visual

Verifikasi dilakukan untuk memastikan lintasan tetap berada dalam batas kontur pocket dan tidak menyisakan area yang tidak terpotong. Visualisasi overlay lintasan terhadap desain ditampilkan pada Gambar 4. Jika terdapat lintasan yang

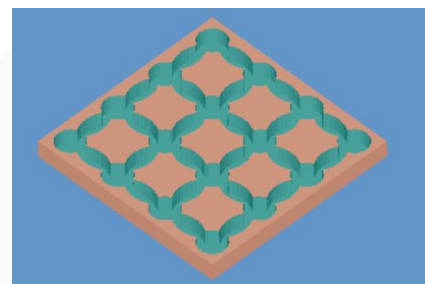
menyimpang dari kontur, nilai threshold dan epsilon pada proses penyederhanaan diatur ulang.



GAMBAR 4 (Overlay Jalur TSP dan Kontur Desain)

E. Penyusunan G-code dan Simulasi

Urutan titik hasil TSP ditulis ulang menjadi G-code dengan perintah G1 menggunakan skrip Python. Parameter seperti feedrate dan kecepatan spindle ditambahkan untuk keperluan simulasi di perangkat lunak HSM Edit. Hasil simulasi ditunjukkan pada Gambar 5, yang menunjukkan tidak ada bagian pocket yang tersisa. Nilai threshold 1.5 mm dan epsilon 0.005 mm dipilih karena memberikan keseimbangan antara akurasi kontur dan efisiensi komputasi.



GAMBAR 5 (Hasil Simulasi Pemotongan Jalur TSP)

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Efektivitas Metode PRT-GCAM Berdasarkan Simulasi

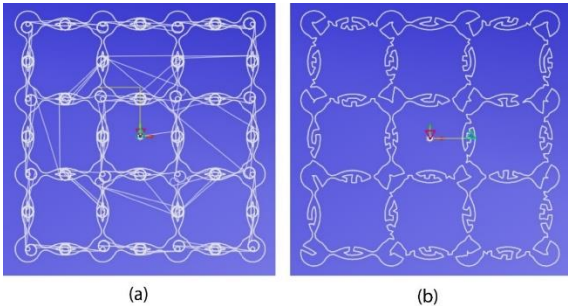
Optimasi lintasan menggunakan PRT-GCAM menghasilkan pengurangan signifikan pada jumlah retract, panjang lintasan, dan waktu pemotongan. Simulasi G-code hasil TSP dengan threshold 1.5 mm dan epsilon 0.005 mm menunjukkan lintasan tetap berada dalam kontur pocket dan tidak menyisakan material (Gambar 5).

Tabel 2 menunjukkan perbandingan antara strategi konvensional dan PRT-GCAM berdasarkan simulasi. Penghitungan retract dilakukan otomatis menggunakan skrip Python, dengan mendeteksi perintah G0/G00 yang mengandung parameter Z positif.

TABEL 2 (Jumlah Titik dalam Tiap Tahapan)

Metode	Jumlah Retract	Panjang Lintasan (mm)	Estimasi Waktu (detik)
Contour-parallel	78	25248	4477
PRT-GCAM	0	8409	1540

Metode konvensional menghasilkan banyak retract dan helix karena keterbatasan dalam penghubung antar-Offset Loop Entity (OLE), sesuai penjelasan Seo [3]. Sebaliknya, jalur PRT-GCAM yang berbasis Hamiltonian circuit dari TSP hanya memerlukan satu entry pre-drill (Gambar 6 (b)) dan menghindari helix berulang (Gambar 6 (a)), memperjelas efisiensi struktur lintasan.



GAMBAR 6 (Simulasi Jalur Konvensional (a) dan PRT-GCAM (b))

B. Validasi Melalui Pengujian Aktual

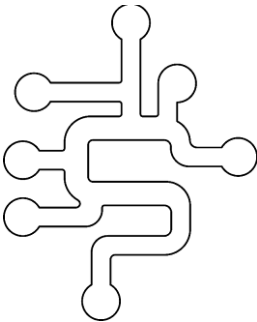
Pengujian aktual dilakukan pada mesin HAAS VF-2 menggunakan material Aluminium 6061 dengan parameter pemotongan konservatif, yaitu spindle speed 1.600 RPM, jumlah flute 4, feed per tooth 0,05 mm/tooth (sehingga feedrate = 320 mm/min), dan kedalaman potong aksial 2 mm. Jalur pemotongan hasil TSP dijalankan, dan hasil pemotongan menunjukkan tidak ada cacat seperti loncatan lintasan maupun bagian pocket yang tidak terpotong (Gambar 7, Gambar 6). Tabel 3 menunjukkan bahwa waktu pemotongan aktual dengan metode PRT-GCAM berkurang lebih dari 65%, dari sekitar 1 jam 13 menit pada strategi contour-parallel konvensional menjadi hanya sekitar 24 menit, menegaskan konsistensi antara hasil simulasi dan implementasi lapangan.

TABEL 3 (Jumlah Titik dalam Tiap Tahapan)

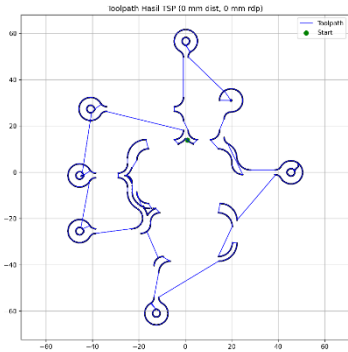
Jenis Pengujian	Strategi	Waktu (detik)	Format (hh:mm:ss)	Efisiensi dibanding Konvensional (%)
Simulasi	Contour-parallel	4477	01:14:37	-
	PRT-GCAM	1540	00:25:40	65.6% lebih cepat
Aktual	Contour-parallel	4411	01:13:31	-
	PRT-GCAM	1490	00:24:50	66.2% lebih cepat

C. Limitasi

Gambar 7 dan gambar 8 menunjukkan bahwa bentuk kontur seperti Serpentine Flow dengan kombinasi kurva dan garis lurus menjadi tantangan, karena G-code hanya mencatat titik awal-akhir dari garis lurus. Hal ini berpotensi menyebabkan jalur TSP keluar kontur jika titik representasi tidak cukup padat.



GAMBAR 7 (Geometri Serpentine Flow)



GAMBAR 8 (Visualisasi jalur hasil LKH serpentine flow)

V. KESIMPULAN

Kajian ini mengusulkan metode PRT-GCAM sebagai pendekatan untuk mengoptimalkan lintasan pemotongan pada operasi 2D pocket milling. Metode ini menggabungkan ekstraksi titik dari G-code CAM, penyederhanaan menggunakan Distance-Based dan Ramer–Douglas–Peucker (RDP), serta optimasi urutan titik dengan solver Lin-Kernighan Helsgaun (LKH). Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode ini mampu secara signifikan mengurangi jumlah retract dan waktu pemesinan hingga lebih dari 60% dibandingkan strategi konvensional. Validasi melalui simulasi dan pengujian aktual pada material Aluminium 6061 membuktikan bahwa jalur hasil optimasi tidak hanya efisien, tetapi juga dapat dijalankan secara aman dalam praktik manufaktur.

REFERENSI

[1] E. Suryono, Y. Y. Kristiawan, E. B. Raharjo, J. A. Siburian, and J. M. Fajar, “STUDY OF INNER AND OUTER POCKET CHARACTERISTICS USING AREA ROUGHING METHOD,” *Media Mesin Maj. Tek. Mesin*, vol. 25, no. 2, pp. 85–91, Jul. 2024, doi: 10.23917/mesin.v25i2.4628.

[2] D. D. Patel, H. R. Dodiya, and D. I. Lalwani, “Experimental investigation of CNC machining of elliptical pockets on AISI 304 stainless steel,” *Int. J. Exp. Des. Process Optim.*, vol. 5, no. 1/2, p. 94, 2016, doi: 10.1504/IJEDPO.2016.080530.

[3] M. Seo, H. Kim, and M. Onosato, “Systematic Approach to Contour-Parallel Tool

- Path Generation of 2.5-D Pocket with Islands,” *Comput.-Aided Des. Appl.*, vol. 2, no. 1–4, pp. 213–222, Jan. 2005, doi: 10.1080/16864360.2005.10738369.
- [4] S. Singh, A. Singh, S. Kapil, and M. Das, “Utilization of a TSP solver for generating non-retractable, direction favouring toolpath for additive manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 59, p. 103126, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.addma.2022.103126.
- [5] Q. Hu, Z. Lin, and J. Fu, “A new global toolpath linking algorithm for different subregions with Travelling Saleman problem solver,” *Int. J. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 35, no. 6, pp. 633–644, Jun. 2022, doi: 10.1080/0951192X.2021.1992667.
- [6] Z. Lin, J. Fu, H. Shen, W. Gan, and S. Yue, “Tool path generation for multi-axis freeform surface finishing with the LKH TSP solver,” *Comput.-Aided Des.*, vol. 69, pp. 51–61, Dec. 2015, doi: 10.1016/j.cad.2015.07.002.
- [7] Z. Lin, J. Fu, Y. Sun, Q. Gao, G. Xu, and Z. Wang, “Non-retraction toolpath generation for irregular compound freeform surfaces with the LKH TSP solver,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 92, no. 5–8, pp. 2325–2339, Sep. 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0247-8.
- [8] K.-D. Lee and H.-S. Park, “Real-Time Motion Analysis System Using Low-Cost Web Cameras and Wearable Skin Markers,” *Front. Bioeng. Biotechnol.*, vol. 9, p. 790764, Jan. 2022, doi: 10.3389/fbioe.2021.790764.
- [9] S. Chakraborty, B. Singh, J. Singh, A. H. Shnain, and A. Sharma, “Measuring of Surface Roughness of Al-6061 Alloy by CNC Milling by using of Taguchi Method,” *E3S Web Conf.*, vol. 588, p. 03025, 2024, doi: 10.1051/e3sconf/202458803025.
- [10] P. Smid, *CNC programming handbook: a comprehensive guide to practical CNC programming*, 3rd ed. New York, N.Y: Industrial Press, 2008.
- [11] S. Aggarwal and P. Xirouchakis, “Selection of optimal cutting conditions for pocket milling using genetic algorithm,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 9–12, pp. 1943–1958, Jun. 2013, doi: 10.1007/s00170-012-4472-x.
- [12] Z. Y. Zhao, F. Tang, L. Liao, and B. Liu, “Toolpath Algorithm for Complex Pocket on the Network Optimization,” *Adv. Mater. Res.*, vol. 97–101, pp. 3428–3431, Mar. 2010, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.97-101.3428.
- [13] M. S. Uddin, S. Ibaraki, A. Matsubara, S. Nishida, and Y. Kakino, “Constant Engagement Tool Path Generation to Enhance Machining Accuracy in End Milling,” *JSME Int. J. Ser. C*, vol. 49, no. 1, pp. 43–49, 2006, doi: 10.1299/jsmec.49.43.
- [14] D. L. Applegate, R. E. Bixby, V. Chvátal, and W. J. Cook, *The traveling salesman problem: a computational study*. in Princeton series in applied mathematics. Princeton: Princeton University Press, 2006.
- [15] S. Lin and B. W. Kernighan, “An Effective Heuristic Algorithm for the Traveling-Salesman Problem,” *Oper. Res.*, vol. 21, no. 2, pp. 498–516, 1973.
- [16] K. Helsgaun, “An effective implementation of the Lin–Kernighan traveling salesman heuristic,” *Eur. J. Oper. Res.*, vol. 126, no. 1, pp. 106–130, Oct. 2000, doi: 10.1016/S0377-2217(99)00284-2.
- [17] D. Yoshida, X. Song, and V. Raghavan, “Development of track log and point of interest management system using Free and Open Source Software,” *Appl. Geomat.*, vol. 2, no. 3, pp. 123–135, Sep. 2010, doi: 10.1007/s12518-010-0028-7.
- [18] F. Widyawati, M. M. Solahudin, and S. Hidayat, “Analisis Variasi Temperatur Artificial aging Terhadap Struktur Mikro dan Sifat Mekanik Pada Aluminium 6061 T6,” *SPECTA J. Technol.*, vol. 8, no. 1, pp. 12–21, Jun. 2024, doi: 10.35718/specta.v8i1.1016.