

Perancangan Pengendali CNC pada *Friction Stir Welding*

Agus Wibowo ^{a,1}, Anak Agung Maharaja Adhithanaya Indrawan ^{b,2} Fajar Gumilang ^{c,3}.

^{a,b,c} Politeknik Kirana, Jl. Harmony Raya Blok GK No.06, Wanakerta - Sindang Jaya, Tangerang, Indonesia

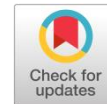
¹agusbowo@gmail.com; ²agungmaharajaax@gmail.com; ³fajar.gumilang@politeknikkirana.ac.id

* Penulis Korespondensi: Agus Wibowo

Diterima 02 April 2026; Direvisi 08 April 2026; Diterima 10 April 2026

ABSTRAK

Friction Stir Welding/Pengelasan gesekan aduk adalah metode pengelasan yang menggabungkan 2 (dua) material logam dalam keadaan plastis dengan cara menggesekkan pisau frais berputar ke permukaan material. Mesin CNC yang dapat diprogram secara otomatis digunakan untuk mempertahankan keadaan plastis kontinyu dari material yang disambung. CNC dioperasikan dengan laju umpan/*feeding rate* terkondisi yang bergantung pada panas permukaan persambungan sebagai *input* variabel dan titik leleh material sebagai *input* tetap. Pengontrol Mach-3 diterapkan pada mesin CNC. Ini adalah pengontrol *open source* dan ekonomis. Pengontrol ini didedikasikan untuk mesin pelatihan pendidikan dasar. Pengontrol ini dipilih karena fleksibilitas, implementasi dan perawatan yang sederhana. Pengontrol ini dapat menangani hingga 6 (enam) *port* sumbu mesin CNC. Pengontrol ini diterapkan untuk memastikan bahwa alat dioperasikan pada posisi yang tepat, gaya tekan yang cukup, keadaan deformasi plastis yang sempurna, dan laju umpan/*feeding rate* adaptif.



KATA KUNCI

Friction Stir Welding;
Mesin CNC;
Pengendali;
Mach-3

ABSTRACT

The Friction stir welding is a welding method, joining between 2 (two) or more metal materials at the plastic state by friction the steering the rotating tool on to material surface. The automatic programable CNC machine is applied to maintain the continuous plastic state of joined material. The CNC is operated by conditioned feed rate depending the heat of welded area as variable input and melting point of material as fix input. The Mach-3 controller is applied on CNC machine. That is the open source and economical controller. The controller is dedicated for basic education training machine. It is selected due to the flexibility, simple implementation and maintenance. The controller can handle up to 6 (six) axis port of CNC machine. The controller is applied to make sure that the tool is operated in precise position, sufficient force of pressure, perfect plastic deformation state and adaptive feeding rate.



KEYWORD

Friction Stir Welding;
CNC Machine;
Controller;
Mach-3



This is an open-access article under the [CC-BY-SA](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/) license

1. Pendahuluan

Friction stir welding(FSW)/Pengelasan gesekan aduk adalah metode pengelasan untuk menyambung 2 (dua) atau lebih lembaran material logam, terutama diterapkan pada material logam yang tidak dapat dilas, misalnya aluminium dan paduannya. Pada penyambungan lembaran logam, FSW lebih banyak dipilih daripada metode perekatan dengan paku keling, karena alasan kekuatan dan estetika. FSW juga lebih ekonomis. FSW juga merupakan solusi dari kekurangan perakitan dengan paku keling, misalnya rapat, kedap air, dan mudah retak. [5]-[12]

Pahat FSW harus diatur dan dipertahankan pada posisi dan jarak standar optimal dari material untuk menghasilkan hasil pengelasan yang berkualitas. Panas gesekan bergantung pada tekanan antara pisau frais dan lembaran material logam. Tekanan yang lebih rendah akan menghasilkan panas yang lebih sedikit, tetapi tekanan yang berlebihan akan berdampak pada kualitas pengelasan yang buruk karena deformasi berlebihan. [5]-[7]

Mesin CNC dan pengontrolnya yang memadai harus digunakan untuk memenuhi persyaratan ini. Pengontrol akan mempertahankan posisi area pengelasan, kecepatan putaran pisau frais, tekanan pisau frais, dan laju pengumpanan (*feeding rate*). [1]-[4]

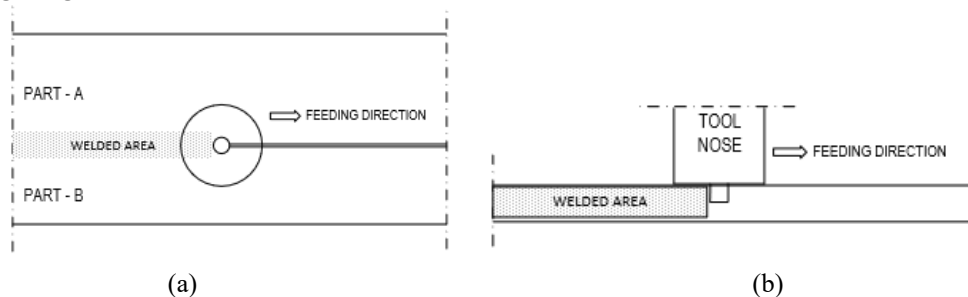
2. Tinjauan Pustaka

Friction stir welding (FSW)/pengelasan gesekan aduk adalah metode pengelasan yang menggabungkan 2 (dua) atau lebih material logam dalam keadaan plastis dengan cara menggesekkan putaran pisau frais ke permukaan material. Mesin CNC otomatis yang dapat diprogram digunakan untuk mempertahankan keadaan plastis kontinu dari material yang disambung. CNC dioperasikan dengan laju umpan terkondisi yang bergantung pada kepala sebagai input variabel dan titik leleh material sebagai input tetap.

3. Metology Penelitian

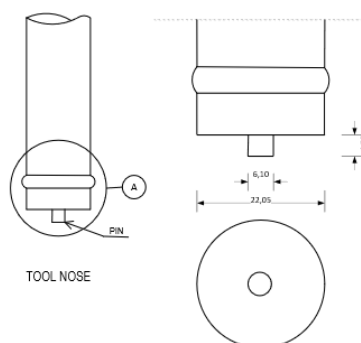
Material yang disiapkan adalah lembaran aluminium dengan ketebalan 10 mm. Tidak disarankan untuk menyambung 2 (dua) material yang berbeda, karena perbedaan titik leleh. Penelitian lebih lanjut menemukan bahwa 2 material dengan titik leleh yang berbeda, tetapi dapat mencapai suhu keadaan deformasi plastis yang serupa. [7]

Pisau frais diputar dengan kecepatan yang direncanakan secara bebas. Gerakkan pahat yang berputar ke posisi (koordinat) titik awal area pengelasan. Pisau frais digerakkan hingga mencapai permukaan material. Material lembaran akan meleleh karena panas gesekan, kemudian pahat terus ditanamkan/dimasukkan hingga kedalaman yang direncanakan. Dalam keadaan plastis di sekitarnya, pahat bergerak melintasi arah pengumpanan dengan laju pengumpanan tertentu. Area pengelasan dijaga dalam pendinginan alami untuk mempertahankan karakteristik material tetap sama. Dan 2 (dua) material disambung dengan kuat.



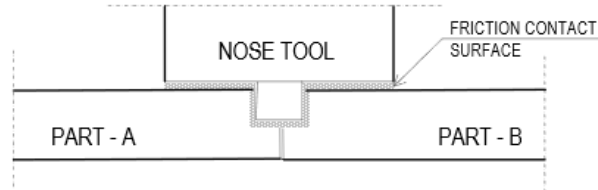
Gambar 1. Area Pengelasan (a) Tampak Atas (b) Tampak Potongan Samping

Contoh detail pahat ditunjukkan pada gambar 2. Pisau frais terdiri dari badan pegangan, bahu, dan ujung pin. Terdapat banyak jenis pisau frais tergantung pada bahan logam yang disambung dan ketebalan lembarannya. Detail pisau frais gambar diatas digunakan untuk menyambung lembaran aluminium ketebalan 10 mm.



Gambar 2. Gambar detil pahat

Permukaan kontak gesekan antara pisau frais dan lembaran material logam bagian A dan bagian B ditunjukkan pada gambar 3. Panas gesekan dihasilkan di sepanjang permukaan kontak. Panas meningkat menuju titik leleh kedua material logam. Hal ini menghasilkan keadaan deformasi plastis pada lembaran logam yang tergesek pahat [8]-[12]

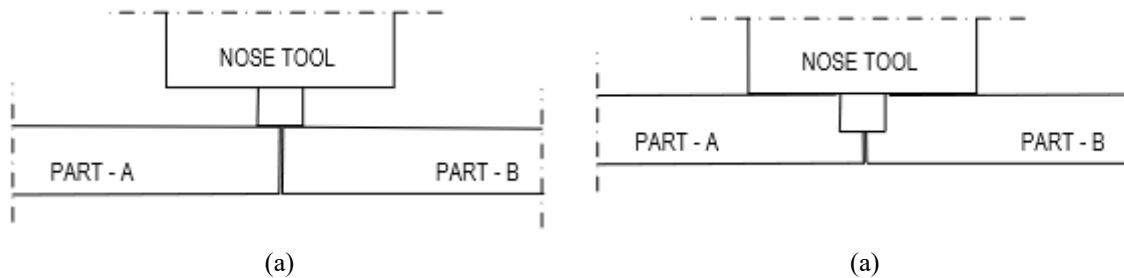


Gambar 3. Permukaan kontak gesekan

Terdapat 3 tahapan pemrosesan. Pertama: ketika ujung pisau mencapai permukaan lembaran material logam seperti yang ditunjukkan pada gambar 4a. Panas gesekan dihasilkan pada permukaan ujung pisau frais sehingga diperoleh keadaan plastis lembaran material logam. Ujung pisau frais akan masuk ke dalam secara bertahap. [7]

Kedua: ketika permukaan bahu pisau frais mencapai permukaan kedua lembaran material logam seperti yang ditunjukkan pada gambar 4b. Ini adalah kedalaman maksimum masuknya pisau frais. Ujung pisau frais akan tenggelam pada kedalaman yang direncanakan di tepi kedua pelat material logam. [7]

Ketiga: ketika keadaan deformasi plastis diperoleh sesuai rencana, pisau akan bergerak maju melintasi area pengelasan seperti yang ditunjukkan pada gambar 1 sebelumnya. [7]



Gambar 4. (a) Langkah pertama (b) Langkah kedua

4. Hasil dan Pembahasan

Topik ini menggabungkan 3 disiplin ilmu mekatronika, yaitu mekanis, elektronika-pengendali, serta pemrograman. Makalah ini membahas tentang desain sistem listrik dan kontrol. Dua makalah lainnya disiapkan oleh tim lain.

Mesin CNC pengelasan gesekan aduk (*friction stir welding*) ini dirancang untuk tujuan pelatihan dan pendidikan. Desainnya dibuat agar mudah diimplementasikan, dioperasikan, dan dipelihara. Unit ini dibuat agar mudah dipindahkan, dapat dibawa ke laboratorium, bahkan masuk ke ruang kelas.

Pengontrol yang digunakan adalah perangkat keras yang ekonomis dan sistem sumber terbuka (*open-source*). Pengontrol ini dapat dipasang, dioperasikan, dan dipelihara oleh pemula.

4.1 Mesin CNC Friction stirs welding

Mesin CNC dirancang dengan 3 (tiga) sumbu, yaitu sumbu X, sumbu Y dengan area kerja sekitar 70 cm x 90 cm dan sumbu Z sekitar 30 cm. Sekrup bola digunakan untuk pergerakan mekanis linier di sepanjang setiap sumbu. Sekrup bola-rel pemandu (*guide-rail ball-screw*) dipasang pada pelat baja 12 mm.

Gearbox digunakan untuk mengatur rentang kecepatan yang dirancang 1/3 dari kecepatan putaran terendah motor servo, hingga 3 kali kecepatan putaran maksimum. *Gearbox* juga digunakan untuk mengisolasi tekanan pahat terhadap motor servo. [7]

Variasi kecepatan putaran tersebut cukup untuk menghasilkan panas logam yang disambung hingga tahap plastis pada operasi normal. Kecepatan dapat disesuaikan lebih lambat ketika mencapai suhu berlebih, atau dapat ditingkatkan lebih cepat untuk meningkatkan panas.

Kecepatan putaran dikolaborasikan dengan laju pengumpanan untuk mempertahankan panas yang dibutuhkan. Laju pengumpanan disesuaikan (lebih lambat dan lebih cepat) untuk menyesuaikan dengan panas optimal pada tahap deformasi plastis.

4.2 Pengendali CNC

Terdapat variabel pengontrol: [7]

- a. Posisi area pengelasan
- b. Kecepatan putaran pisau frais
- c. Laju pengumpanan/*feeding rate*
- d. Suhu area pengelasan
- e. Tekanan pisau frais

Posisi area pengelasan adalah area garis sambungan antara dua lembaran material yang dijepit secara kaku. Ini bisa berupa garis lurus lembaran material logam datar, dan/atau pola spesifik lainnya pada lembaran datar. Area pengelasan pada permukaan yang tidak datar dapat dilakukan dengan beberapa pertimbangan yang diperlukan.

Variabel kecepatan putaran diatur pada RPM (putaran per menit) yang direncanakan, karena karakteristik material. Putaran alat akan dipercepat ketika kita membutuhkan efek gesekan yang lebih besar untuk menaikkan suhu. Sebaliknya, putaran akan diperlambat ketika suhu meningkat dibandingkan dengan suhu yang telah ditetapkan. Kecepatan putaran dipengaruhi oleh suhu permukaan area pengelasan. Kita perlu mengatur penundaan waktu beberapa detik untuk menghindari fluktuasi/getaran motor, tergantung pada spesifikasi motor dan penggerakannya.

Laju pengumpanan diatur pada kecepatan mm/s yang dirancang berdasarkan titik leleh material yang akan disambung. Laju pengumpanan akan dipercepat ketika suhu area pengelasan meningkat. Sebaliknya, laju pengumpanan akan diperlambat ketika suhu turun dibandingkan dengan suhu acuan.

Suhu pada area pengelasan menunjukkan apakah material logam berada dalam keadaan deformasi plastis dan proses pengelasan akan berjalan normal. Dalam kondisi di bawah keadaan deformasi plastis, pengontrol akan memerintahkan untuk memperlambat (atau menghentikan) pengumpanan dan pada saat yang sama mempercepat putaran pisau frais untuk meningkatkan panas gesekan.

Panas gesekan bergantung pada tekanan antara pisau frais dan material logam. Tekanan yang lebih rendah akan menghasilkan panas yang lebih sedikit, sebaliknya tekanan yang lebih tinggi akan menghasilkan panas yang lebih banyak. Di sisi lain, posisi bahu pisau frais harus dipertahankan pada permukaan material logam, tidak boleh masuk memendam pada material yang disambungkan.

Pengontrol Mach-3 digunakan untuk mengontrol mesin CNC pengelasan gesekan aduk. Diagram skematik pengontrol ditunjukkan pada gambar 5. [13]-[15]

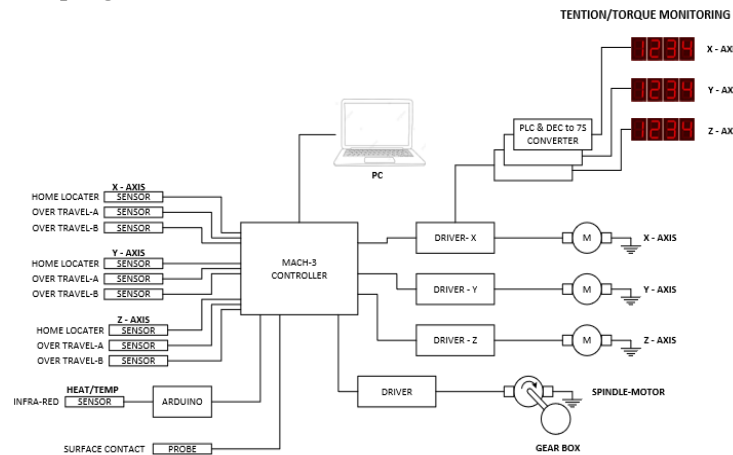
1) Sensor input pada Pengendali

Setiap sumbu (sumbu X, sumbu Y, dan sumbu Z) akan dilengkapi dengan 3 sensor, yaitu: sensor posisi awal (*home locater*) diatur sebagai pusat sumbu, sensor pergerakan berlebih-A diatur sebagai pergerakan positif maksimum, dan sensor pergerakan berlebih-B diatur sebagai pergerakan negatif maksimum. Sensor pergerakan berlebih adalah sakelar mikro (*micro-switch*) sebagai sakelar batas untuk menghentikan pergerakan alat keluar dari alas.

Sensor-sensor ini digunakan sebagai penghenti pembatas listrik untuk menghentikan pergerakan motor servo. Hal itu adalah sistem perlindungan (*protection system*) untuk menghentikan motor ketika pergerakan dihentikan oleh pelindung fisik.

Sensor panas digunakan untuk mendeteksi permukaan area pengelasan. Sensor ini menggunakan sensor panas inframerah dan diproses dengan pengontrol Arduino sebelum dihubungkan ke pengontrol CNC. Nilai panas diatur tergantung pada titik leleh lembaran material logam tertentu.

Sensor kontak permukaan adalah probe listrik yang akan menyentuh permukaan lembaran material logam. Ini akan menjadi faktor koreksi posisi sumbu Z nol. Sensor ini hanya dapat diterapkan pada lembaran datar pada desain ini. Untuk pengerjaan lembaran material logam yang tidak rata pada pengembangan mendatang, kita membutuhkan sensor infra-merah yang ditempatkan dekat di depan pahat, tepat di depan area pengelasan.



Gambar 5. Diagram Pengendali CNC

2) Aktuator *output* pada Pengendali

Mesin CNC dirancang untuk pergerakan 3 sumbu, sumbu X dan Y bekerja pada permukaan horizontal, dan sumbu Z bekerja pada pergerakan vertikal. Motor servo dan drivernya digunakan untuk setiap sumbu. Motor dihubungkan ke ball-screw yang ditempatkan pada rel pemandu (*guide-rel*) untuk pergerakan linier setiap sumbu.

Motor servo dan *driver* lainnya digunakan untuk spindel. Gearbox digunakan untuk menghubungkan antara motor servo dan spindel untuk mempertahankan kecepatan putaran, dan mengisolasi tekanan dari motor. *Gearbox* dihubungkan ke sekrup bola yang ditempatkan pada rel pemandu.

Driver dilengkapi dengan output pembacaan torsi. Torsi ini ditampilkan pada LED 7 segmen, sehingga kita dapat memantau torsi saat ini. Output pembacaan torsi juga dapat dimanipulasi sebagai pembacaan tekanan, yang akan diumpan balik ke pengontrol. Pembacaan torsi yang lebih rendah berarti tekanan yang lebih rendah. Sebaliknya, bisa jadi tekanan berlebih. Pengontrol akan mengatur nilai torsi yang setara dengan nilai tekanan yang direncanakan.

Data pembacaan torsi dikumpulkan dan ditinjau sebagai data mentah untuk mengetahui karakteristik logam untuk evaluasi input lebih lanjut pada pengaturan mesin las gesekan aduk CNC.

3) Monitor pada pengendali

Monitor layar sentuh 10 inci dapat dipasang pada pengendali. Monitor ini menampilkan data operasional, yaitu posisi (0,0,0) alat, kecepatan putar, laju pengumpanan, suhu area pengelasan, torsi motor X, Y, dan Z, dan lain sebagainya. Monitor ini juga berfungsi sebagai input data pengaturan mesin CNC. Monitor layar sentuh tidak wajib digunakan karena alasan ekonomis. Laptop dapat dihubungkan untuk pemantauan, pengaturan awal, dan input program secara manual.

4.3 Sistem kendali

Pola area pengelasan dirancang dalam program gambar untuk mendapatkan file .dwg. Kemudian file tersebut dikonversi ke bahasa kode dasar, dan diunggah ke pengontrol Mach-3. Program ini juga dapat memasukkan perintah secara manual satu per satu ke pengontrol Mach-3.

Langkah-langkah:

Memasukkan karakteristik lembaran material logam dan mengisi pengaturan awal, seperti laju pengumpanan (*feeding rate*), suhu titik leleh atau keadaan deformasi plastis, ketebalan material, dan lain sebagainya.

Mengatur posisi awal pisau frais secara manual pada titik koordinat (0,0,0) yang dipilih.

Pengaturan normal titik permukaan horizontal adalah sumbu X di bagian kiri alas, sehingga nilai sumbu X positif dari 0 hingga tepi maksimum alas.

Sumbu Y diatur di tengah alas, sehingga nilai sumbu X maksimum negatif satu hingga nol dan kemudian positif satu.

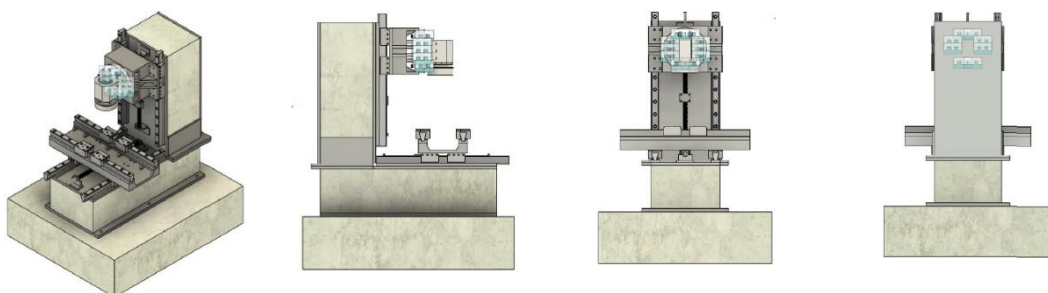
Sumbu Z dapat diatur dari -100mm hingga 0, kemudian mencapai maksimum positif satu. Titik lain (0,0,0) juga dapat dipilih pengaturannya.

Jalankan mesin dan periksa titik awal area pengelasan. dimana pisau frais bergerak ke titik setting.

- Pada step ini proses inialisasi mesin CNC selesai.
- Dan proses pengelasan dimulai
- Pisau frais mulai berputar pada RPM tertentu sesuai pengaturan
- Pisau frais menyentuh permukaan lembaran material logam pada tekanan tertentu sesuai pengaturan
- Gesekan dimulai dan menghasilkan panas untuk mencapai keadaan deformasi plastis.
- Pisau frais menembus material hingga kedalaman yang telah ditentukan
- Sekarang permukaan gesekan optimal telah tercapai seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.
- Piasu frais bergerak maju sesuai dengan kecepatan pengumpanan (*feeding rate*)
- Dan 2 material tersambung, proses pendinginan berlangsung secara alami
- Pisau frais mencapai ujung area pengelasan, ditarik ke atas dan dimatikan
- Proses pengelasan selesai

4.4 Pondasi beton

Pelat beton digunakan sebagai penyangga untuk mesin CNC. Beton dipilih sebagai penyeimbang untuk menyerap getaran. Terdapat 3 bagian pelat beton, yaitu pelat dasar utama yang menopang seluruh bagian mesin CNC. Pelat dasar kaki menopang sumbu X dan Y, dan pelat belakang menopang sumbu Z seperti yang ditunjukkan pada gambar-6. Tulangan diterapkan pada pelat beton, dengan kualitas beton minimal K225. Tiga bagian pelat beton dihubungkan dengan flensa, desain ini dikhususkan untuk mesin CNC portabel untuk tujuan pendidikan. Ini adalah semi-CKD (completely knock down) yang mudah dikemas, ditangani, dipindahkan, dan dipasang kembali.



Gambar 6. Slab cor beton (a) Tampak 3D (b) Tampak Samping (c) Tampak depan
(d) Tampak belakang

Chemical anchor dapat diaplikasikan jika menggunakan pelat beton pracetak parsial dengan kualitas beton tinggi (lebih dari K225). Pelat beton tersedia di pasaran dan mudah dibeli.

4.5 Pemrograman Pengendali

Pengontrol Mach-3 dipilih karena kesederhanaan implementasinya. Ini adalah pengontrol tingkat pemula, sumber terbuka (*open source*), dan biaya ekonomis untuk tujuan pendidikan. Unit ini akan diterapkan secara mandiri dan terisolasi dari jaringan. Jika unit perlu dihubungkan ke jaringan, sistem perlindungan keamanan jaringan diperlukan untuk melindungi unit tersebut. [13]

Pengontrol ini cukup untuk menangani sampel pertama permukaan datar dua dimensi. Minimal dibutuhkan 3 (tiga) sumbu. Peningkatan selanjutnya pada penyambungan permukaan non-datar, pengontrol dapat ditingkatkan hingga 5 (lima) sumbu. [13]-[15]

Program Computer Aid Design/Computer Aid Manufacturer (CAD/CAM) dapat diunggah ke pengontrol Mach-3. Perintah program bahasa dasar juga dapat ditulis sebagai input manual untuk gerakan sederhana, seperti pelatihan gerakan dasar. [14]

Pengontrol Mach-3 dapat berjalan di bawah Windows XP (atau Windows 2000), di bawah prosesor 1Ghz. Persyaratan rendah ini dapat didukung oleh laptop siswa. [14]-[15]

5. Penutup

5.1. Kesimpulan

Mesin las gesek/*friction stir welding* CNC didedikasikan untuk tujuan pendidikan, biaya ekonomis, pemasangan dan perawatan yang mudah. Desain penyangga fisik yang sederhana, sebagian semi-CKD (completely knock down), mudah dikemas, ditangani, dipindahkan, dan dipasang kembali. Menggunakan kontroler Mach-3 yang mudah untuk pemasangan, pengoperasian, dan perawatan. Sesuai dan berjalan pada prosesor dan sistem operasi spesifikasi rendah. [13]-[15] Pada implementasi awal, mesin las gesek/*friction stir welding* CNC digunakan untuk menyambung permukaan dua dimensi datar, dan akan ditingkatkan untuk permukaan tiga dimensi lainnya, dengan kontroler yang sama. [1]-[4]. Material ke-2 (dua) yang disambung dalam penelitian ini adalah logam aluminium dengan ketebalan 10 mm pada kondisi permukaan datar. Dapat dikembangkan untuk logam lain dengan variasi ketebalan..

5.2. Saran

Pengontrol CNC ini dapat dimodifikasi menjadi pengontrol canggih profesional dengan modifikasi sederhana pada sensor, kabel, dan bagian mekanik, untuk menjadi mesin CNC produksi.

Ucapan terimakasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Bapak Oscar Haris dosen Politeknik Boash Indonesia sebagai anggota tim, Bapak Farkhan sebagai Direktur PT CNC Indonesia. Rizki dan Fidi mahasiswa Universitas Sebelas Maret Surakarta (UNS) sebagai anggota tim.

Daftar Pustaka

- [1] M. Atul Pandey, CNC Machines in Current Us: Technology, Applications, and future outlook, International Journal for Applied Research in Science and Engineering Volume 5 Issue 5 December-2022
- [2] [Rahulkrishnan R A, Nijin S, Nikhil S Prasad, Thejus S, Lekshmi P Govind, Advance in CNC Machinery: A comprehensive reiew for industry, JETIR, 2024.
- [3] B Autodesk CAM, Fundamental of CNC Machining, Autodesk Inc, 2014.
- [4] Fundamentals of CNC Machining A Practical Guide for Beginners, HSMWorks ApS, 2012
- [5] Zaid Alsalami, P. Thiruramanathan, S. Krishnakumar, Kala Priyadarshini G , Vinod Balmiki, Advancements in Friction Stir Welding: A comprehensive Review of Process Warivable and Emering Developments, ICECS, 2026
- [6] Moses G. Nyang'au*, Alex M. Muumbo and Fredrick N. Mutua, A review of the application of friction stir welding on hard-to-weld materials, Netjournal, 2024

- [7] Esab, Introduction to the FSW Technical Handbook, ESAB, 2022,
- [8] Mullaierasu R, Thilagham K T, Noorullah D, A Literature Review On Friction Stir Welding Process, IJSART - Vol 6, 2020
- [9] G.C.Jadhav, R.S.Dalu, Friction Stir Welding a Review, IJCRT | Volume 5, 2017
- [10] Mahndra Kumar Jangid, Sharad Srivastava, Mahest Kumar Jangid, Friction Stir Welding, IJCRT, 2017
- [11] Anamaria Feier, Rita Bola, Rita Bola, Peter Zifcák, Miro Ur an, European Friction Stir Welding Operator, Erarmus, 2017,
- [12] Daniela Lohwasser and Zhan Chen, Friction Stir Welding from basics to application, Woodhead Publising ltd, 2010
- [13] Novusun, Mach-3 USB port 6 Axis Controller Card NVCM Manual, Novusun CNC, 2020
- [14] A User's guide to installation, configuration and operation, Mach Developers Network (MachDN), 2014
- [15] Mach Developers Network, The nurture, care and feeding of the Mach3 controlled CNC Mill, MachDN, 2003