



Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Proses Manufaktur Rangka dan Bracket Prototype Mesin Pembersih Panel Surya Otomatis

Muhammad Sajid Khalish¹, Rosidi^{1*}, dan Candra Damis Widiawaty¹

¹Program Studi Diploma III, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425

E-mail address: rosidi@mesin.pnj.ac.id

ABSTRAK

Ketergantungan terhadap bahan bakar fosil yang terus menipis mendorong pemanfaatan panel surya sebagai sumber energi alternatif yang berkelanjutan. Namun, kinerja panel surya dapat menurun akibat akumulasi debu dan kotoran pada permukaannya, sehingga intensitas cahaya matahari yang diserap berkurang. Sistem pembersihan manual yang umum digunakan memiliki kelemahan seperti risiko kecelakaan kerja dan efisiensi yang rendah. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan membuat rangka prototype mesin pembersih panel surya otomatis berbasis mikrokontroler dengan mekanisme pulley dan belt, serta mengetahui proses manufakturnya. Material yang digunakan untuk rangka adalah besi hollow hitam 30×30 mm tebal 1 mm, sedangkan bracket dibuat dari plat baja karbon tebal 1 mm. Proses manufaktur meliputi pengukuran dan marking, pemotongan, bending, pengeboran, serta pengelasan dan finishing menggunakan cat pylox. Hasil pengukuran waktu kerja menunjukkan total durasi pengukuran dan marking sebesar 305 menit, total waktu aktual proses bending lima jenis bracket sebesar 81 menit, dan total waktu proses pengeboran 15 pcs bracket sebesar 76 menit. Perbandingan waktu estimasi dan aktual pada proses bending menunjukkan selisih rata-rata 0,3–0,5 menit per pcs, yang menandakan perencanaan waktu manufaktur sudah cukup akurat. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam pengembangan proses manufaktur prototype mesin pembersih panel surya otomatis yang lebih efisien.

Kata-kata kunci: proses manufaktur, panel surya, mikrokontroler, pulley dan belt, prototype

ABSTRACT

The dependence on depleting fossil fuels has encouraged the use of solar panels as a sustainable alternative energy source. However, the performance of solar panels can decrease due to the accumulation of dust and dirt on their surface, reducing the intensity of absorbed sunlight. The commonly used manual cleaning system has drawbacks such as work accident risks and low efficiency. This study aims to design and build the frame of a microcontroller-based automatic solar panel cleaning machine prototype using a pulley and belt mechanism, as well as to determine its manufacturing process. The frame material used is black hollow steel measuring 30×30 mm with a thickness of 1 mm, while the brackets are made of carbon steel plate with a thickness of 1 mm. The manufacturing process includes measuring and marking, cutting, bending, drilling, welding, and finishing using pylox paint. Work-time measurement results show a total duration of 305 minutes for measuring and marking, a total actual bending time of 81 minutes for five bracket types, and a total drilling time of 76 minutes for 15 bracket pieces. The comparison between estimated and actual time in the bending process shows an average difference of 0.3–0.5 minutes per piece, indicating that the manufacturing time planning is fairly accurate. The results of this study are expected to serve as a reference for developing a more efficient manufacturing process for automatic solar panel cleaning machine prototypes.

Keywords: manufacturing process, solar panel, microcontroller, pulley and belt, prototype

Hak Cipta :
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1. PENDAHULUAN

Energi listrik kini menjadi salah satu aspek krusial dalam kehidupan manusia. Mayoritas sumber energi listrik masih bergantung pada batubara dan minyak, sementara stok bahan bakar fosil tersebut semakin menipis, sehingga dibutuhkan sumber energi alternatif yang dapat digunakan secara berkelanjutan. Salah satu jenis sumber energi alternatif yang banyak diterapkan adalah panel surya, yang menggunakan cahaya matahari untuk diubah menjadi energi listrik [1].

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sumber energi listrik terbarukan yang ramah lingkungan dan telah dikembangkan secara luas oleh berbagai negara. Akan tetapi, kinerja optimal panel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor, di antaranya suhu, efek bayangan, dan material sel surya. Apabila kaca pelindung pada bagian luar panel surya tertutup debu atau penghalang lain, intensitas cahaya matahari yang masuk akan berkurang dan berdampak signifikan pada proses efek fotolistrik, sehingga listrik yang dihasilkan menjadi tidak maksimal [2].

Sistem pembersihan debu pada panel surya yang masih dilakukan secara manual memiliki beberapa kerugian, seperti risiko kerusakan panel, risiko kecelakaan kerja, kesulitan pergerakan karena ruang yang terbatas, serta pemeliharaan yang kurang optimal. Penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem pembersih debu panel surya otomatis yang dioperasikan dua kali dalam sehari menggunakan digital programmable timer untuk mengontrol waktu kerja alat secara otomatis [3]. Berdasarkan tinjauan terhadap penelitian-penelitian yang menggunakan mekanisme wiper maupun sistem pencucian pada panel surya.

Dalam pembuatan prototype mesin pembersih panel surya otomatis ini, aspek pembuatan rangka memiliki peranan penting terhadap kekuatan, kestabilan, dan ketahanan struktur alat. Rangka dirancang agar mampu menopang panel surya serta sistem mekanisme pembersih berbasis pulley dan belt, dengan mempertimbangkan posisi pemasangan komponen mekanik dan jalur pergerakan sistem pembersih agar proses kerja alat dapat berjalan secara efisien. Material yang dipilih untuk rangka adalah besi hollow hitam berukuran 30×30 mm dengan ketebalan 1 mm, karena memiliki kekuatan yang cukup baik, bobot ringan, mudah dipotong dan dilas, serta biaya yang relatif ekonomis.

Proses manufaktur prototype meliputi pembuatan kaki rangka meja panel, pembuatan bracket rangka panel, pemotongan material, pengeboran, pengelasan, perakitan komponen, hingga tahap finishing. Meskipun berbagai penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem pembersih panel surya otomatis dari sisi kontrol dan mekanisme geraknya, aspek proses manufaktur rangka dan bracket sebagai struktur penopang sistem tersebut belum banyak dibahas secara rinci, khususnya terkait pemilihan material, urutan tahapan kerja, serta estimasi waktu dan biaya pembuatannya. Kesenjangan inilah yang mendasari perlunya kajian proses manufaktur pada penelitian ini.

Berdasarkan uraian tersebut, permasalahan yang dikaji dalam penelitian ini dirumuskan sebagai berikut: (1) bagaimana merancang dan membuat rangka prototype yang kuat dan stabil menggunakan material besi hollow hitam 30×30 mm tebal 1 mm; (2) bagaimana tahapan proses manufaktur rangka dan bracket dilaksanakan, mulai dari pengukuran dan marking, pemotongan, bending, pengeboran, hingga fitting dan pengelasan, agar sesuai dengan estimasi waktu dan biaya yang direncanakan; dan (3) bagaimana kesesuaian hasil pembuatan kaki rangka meja panel dan bracket rangka panel terhadap gambar kerja serta kebutuhan sistem pembersih otomatis. Ketiga rumusan masalah tersebut menjadi dasar penetapan ruang lingkup penelitian, yaitu proses manufaktur dan perakitan komponen fisik prototype meliputi pengukuran, pemotongan material, bending, pengeboran, serta pengelasan rangka dan bracket, dengan tujuan menghasilkan rangka dan bracket yang sesuai desain sehingga dapat mendukung pemasangan panel surya dan sistem pembersih otomatis secara optimal.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan studi lapangan, identifikasi masalah, dan studi literatur yang dilakukan secara bersamaan untuk memperkuat dasar penelitian. Studi lapangan dilakukan dengan mengamati secara langsung permasalahan yang sering timbul pada panel surya, seperti akumulasi debu dan kotoran yang dapat mengurangi penyerapan cahaya matahari. Studi literatur diperoleh dari jurnal, buku, dan artikel ilmiah terkait proses manufaktur, sistem kontrol mikrokontroler, mekanisme pulley dan belt, serta sistem pembersih panel surya otomatis. [4]

Alat dan Bahan

Alat manufaktur yang digunakan dalam penelitian ini meliputi mesin gerinda potong Maktec M2401 berdaya 2.000 Watt untuk memotong besi hollow dan plat besi, mesin bor duduk dengan kecepatan spindel 810



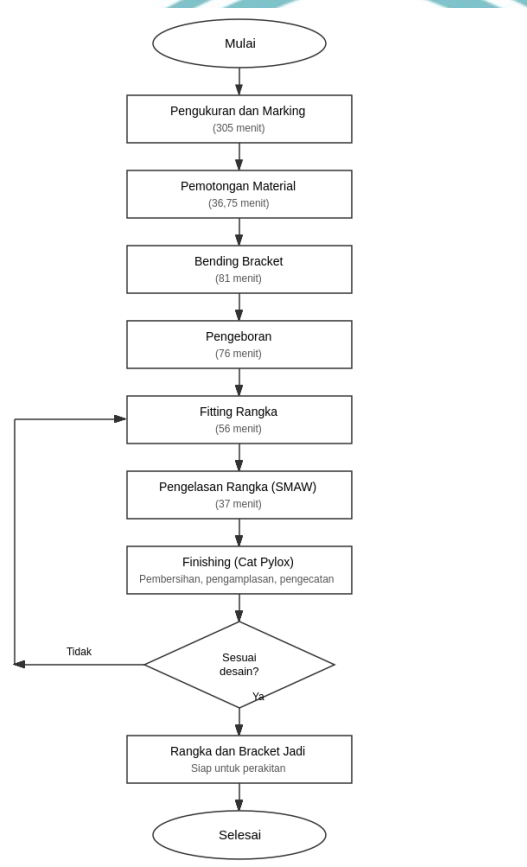
Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

- Hak Cipta:**
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritis atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
 2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

rpm untuk membuat lubang pada bracket dan rangka, mesin las SMAW untuk menyambungkan rangka, serta mesin bending plat manual dengan kapasitas ketebalan maksimum sekitar 2 mm untuk membentuk bracket tipe L dan U. Alat ukur yang digunakan terdiri atas meteran gulung, penggaris baja, jangka sorong, dan busur deret, sedangkan alat bantu lainnya meliputi kunci L, spidol, kaca mata pelindung, sarung tangan, dan helm las. [5]

Material yang digunakan untuk rangka adalah besi hollow hitam berukuran 30×30 mm dengan ketebalan 1 mm dengan berat sekitar 5,652 kg untuk panjang 6 meter berdasarkan massa jenis besi 7,85 kg/1.000.000 mm³. Material bracket menggunakan plat baja karbon (mild steel) tebal 1 mm berukuran 1,2×2,4 m, dengan berat per lembar sekitar 19,2–19,5 kg berdasarkan massa jenis baja 7.960 kg/m³. [6]

Tahapan Proses Manufaktur



Gambar 1 Flowchart Proses Manufaktur

Gambar 1. Diagram alir tahapan proses manufaktur rangka dan bracket

Proses manufaktur prototype dilakukan melalui tahapan pengukuran dan marking, pemotongan material, bending bracket, pengeboran, serta fitting dan pengelasan rangka, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1. Pada tahap pengukuran dan marking, dimensi yang tertera pada gambar kerja diidentifikasi terlebih dahulu, kemudian ditandai pada permukaan material menggunakan spidol, dengan garis lurus untuk garis potong, garis putus-putus untuk titik lipatan, serta tanda silang untuk lokasi lubang bor. Hasil penandaan selanjutnya diverifikasi ulang terhadap gambar kerja sebelum material dilanjutkan ke tahap pemotongan, bending, atau pengeboran.

Proses bending dilakukan menggunakan mesin pembentuk plat manual untuk membentuk lima jenis bracket, yaitu bracket L motor, bracket U sambungan rangka meja-alat, bracket L rangka meja, bracket L dudukan wiper, dan bracket U motor. Pembuatan bracket L hanya memerlukan satu kali proses bending, sedangkan bracket U memerlukan dua kali proses bending dengan penyesuaian posisi material.

Proses pengeboran dilakukan menggunakan bor duduk dengan kecepatan spindel tetap 810 rpm. Sebelum pengeboran utama dilakukan, setiap titik lubang ditandai menggunakan center drill agar mata bor utama tidak bergeser dari posisi yang telah ditentukan. Perhitungan parameter pengeboran menggunakan kecepatan potong aktual sesuai Persamaan (1),



Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

$$vc = (\pi \times d \times n) / 1000 \quad (1)$$

dimana vc adalah kecepatan potong (m/menit), d adalah diameter mata bor (mm), dan n adalah putaran spindel (rpm). Kecepatan pemakanan dihitung melalui Persamaan (2),

$$vf = f \times n \quad (2)$$

dimana vf adalah kecepatan pemakanan (mm/menit) dan f adalah gerak makan (mm/rev). Waktu pengeboran per lubang (machining time, t_m) dihitung dari jarak tempuh total pengeboran (l_t) dibagi kecepatan pemakanan, sebagaimana Persamaan (3),

$$t_m = l_t / vf \quad (3)$$

dimana l_t merupakan penjumlahan ketebalan material (l) dan tinggi ujung mata bor ($a = 0,3 \times d$).

Setelah seluruh komponen rangka dan bracket selesai dibentuk dan dibor, dilakukan proses fitting dan pengelasan rangka menggunakan SMAW, kemudian dilanjutkan dengan proses finishing menggunakan cat pyralox besi hitam, melalui tahapan pembersihan permukaan, pengamplasan, penyemprotan cat, pengeringan, dan pengecekan hasil akhir. [7]

Metode Analisis Data

Data yang diperoleh selama proses manufaktur dianalisis menggunakan pendekatan deskriptif kuantitatif. Data waktu kerja pada setiap tahapan (pengukuran dan marking, pemotongan, bending, pengeboran, fitting, serta pengelasan) dicatat melalui pengamatan langsung (time study), kemudian dibandingkan antara waktu estimasi dan waktu aktual untuk memperoleh nilai selisih waktu sebagai indikator akurasi perencanaan proses. Produktivitas pengerjaan dihitung dengan membagi jumlah komponen yang diselesaikan terhadap total waktu pengerjaan pada satuan waktu tertentu (pcs/jam atau unit/jam). Biaya manufaktur dianalisis dengan menjumlahkan biaya bahan dan komponen, biaya listrik, serta biaya tenaga kerja langsung yang dihitung berdasarkan total waktu manufaktur dikalikan tarif upah per jam, sedangkan estimasi harga jual diperoleh dengan menambahkan margin keuntungan terhadap total biaya manufaktur. Selain analisis kuantitatif, dilakukan pula analisis kualitatif terhadap hasil fabrikasi rangka dan bracket melalui pengamatan visual dan pengukuran dimensi, yang dibandingkan dengan gambar kerja untuk menilai kesesuaian bentuk, ukuran, dan kekuatan sambungan las. Hasil analisis pada setiap tahapan selanjutnya dibahas secara komparatif dengan temuan penelitian terdahulu untuk memperkuat interpretasi data.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses Pengukuran dan Marking

Hasil pengukuran waktu kerja untuk tahap pengukuran dan marking pada pembuatan bracket dan rangka ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Waktu proses pengukuran dan marking

Komponen	Estimasi (menit)	Aktual (menit)	Jumlah	Total (menit)
Persiapan material & pembacaan gambar	10	10	2	20
Marking bracket (pemotongan)	5	5	15	75
Marking bracket (bending)	3	3	15	45
Marking bracket (pengeboran)	5	5	15	75
Marking pengelasan rangka	60	60	1	60
Verifikasi/pengecekan ulang	15	15	2	30
Jumlah Total				305

Berdasarkan Tabel 1, total durasi pengerjaan untuk pengukuran dan penandaan dalam proses pembuatan bracket dan rangka adalah 305 menit. Waktu estimasi dan waktu aktual untuk setiap bagian menunjukkan hasil yang sama, sehingga dapat disimpulkan bahwa pekerjaan tersebut telah berjalan sesuai dengan jadwal yang telah ditentukan. Kesesuaian penuh antara waktu estimasi dan aktual pada tahap ini berbeda dengan tahapan lain yang melibatkan proses pembentukan material, karena pengukuran dan marking merupakan pekerjaan manual dengan tingkat variabilitas rendah, sehingga waktu penyelesaiannya relatif lebih mudah diprediksi dibandingkan proses yang dipengaruhi oleh kondisi mesin maupun karakteristik material, seperti bending dan pengelasan. Durasi 305 menit yang didominasi oleh proses marking pengelasan rangka (60 menit) juga menunjukkan bahwa kompleksitas geometri rangka meja, dengan banyak titik sambungan yang harus ditandai secara presisi, menjadi kontributor waktu terbesar pada tahap ini.



Proses Bending Bracket

Penggunaan mesin pembentuk plat manual pada material baja ringan tebal 1 mm menghasilkan tekukan yang bersih, tepat, dan konsisten. Perbandingan waktu estimasi dan aktual untuk proses bending kelima jenis bracket ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Waktu proses bending bracket

Bracket	Estimasi (menit)	Aktual (menit)	Selisih (menit)	Jumlah (pcs)
Bracket L Motor	5	5	0	1
Bracket U Sambungan Rangka Meja-Alat	5	5,5	0,5	4
Bracket L Rangka Meja	5	5,5	0,5	4
Bracket L Dudukan Wiper	5	5	0	2
Bracket U Motor	5	5,5	0,5	4

Berdasarkan data pada Tabel 2, total waktu aktual proses bending untuk seluruh bracket dihitung sesuai Perencanaan (4),

$$T_{\text{total}} = (1 \times 5) + (4 \times 5,5) + (4 \times 5,5) + (2 \times 5) + (4 \times 5,5) = 81 \text{ menit} \quad (4)$$

Selisih waktu antara estimasi dan aktual pada proses bending bracket berkisar 0–0,5 menit per pcs. Selisih tersebut dipengaruhi oleh faktor teknis seperti penyetelan alat, ketelitian operator dalam menentukan sudut, serta penyesuaian posisi benda kerja. Semakin kecil selisih waktu, semakin akurat perencanaan proses manufaktur yang dilakukan. Temuan ini sejalan dengan kajian metodologi perhitungan waktu dan biaya proses bending pada industri pengerjaan logam, yang menunjukkan bahwa waktu proses bending sangat dipengaruhi oleh parameter setup, jumlah tekukan, dan penyesuaian posisi benda kerja pada setiap siklus produksi [8]. Penelitian berbasis data mesin produksi skala industri bahkan melaporkan variasi waktu bending yang jauh lebih besar akibat faktor setup alat dan efek pembelajaran operator (learning effect), sehingga selisih 0–0,5 menit per pcs pada penelitian ini tergolong kecil dan mengindikasikan proses kerja yang cukup terkendali meskipun dilakukan dengan mesin bending manual dan operator berskala prototipe, bukan mesin bending otomatis berskala industri [9].

Proses Pengeboran

Perhitungan waktu pengeboran menggunakan data RPM spindel 810 rpm (tetap untuk seluruh mata bor), pemakanan $f = 0,1$ mm/put, serta tiga jenis mata bor, yaitu center drill, diameter 5 mm, dan diameter 10 mm. Hasil perhitungan waktu pengeboran untuk setiap jenis bracket ditunjukkan pada Tabel 3.

Tabel 3. Waktu proses pengeboran tiap jenis bracket

Bracket	Waktu per pcs (menit)	Jumlah (pcs)	Total Waktu (menit)
Bracket L Motor	6	1	6
Bracket U Sambungan Rangka Meja-Alat	5	4	20
Bracket L Rangka Meja	5	4	20
Bracket L Dudukan Wiper	5	2	10
Bracket U Motor	5	4	20
Total (15 pcs)			76

Berdasarkan Tabel 3, waktu total yang dibutuhkan untuk proses pengeboran seluruh bracket sebanyak 15 pcs adalah 76 menit. Penggunaan ragum untuk menjepit benda kerja dan tahapan penandaan titik pusat lubang menggunakan center drill sebelum pengeboran utama berkontribusi pada konsistensi posisi lubang, sehingga proses perakitan komponen menjadi lebih mudah dan kekuatan sambungan antar komponen dapat meningkat.

Hasil Fabrikasi Bracket dan Rangka

Kelima jenis bracket yang telah selesai dibentuk dan dibor selanjutnya difinishing menggunakan cat pylox besi hitam agar tampilan lebih rapi dan tahan terhadap karat. Bracket L rangka meja memiliki bentuk kompak dengan tiga lubang vertikal pada sisi tegak dan enam lubang berdiameter 5 mm pada bagian tengah-bawah untuk pemasangan baut penghubung dengan bracket U. Bracket U sambungan rangka meja ke rangka alat dibuat dari plat yang mengalami dua kali tekukan, membentuk tiga sisi, dengan tiga lubang vertikal sebagai tempat penyesuaian ketinggian rangka alat saat assembly. Bracket U motor memiliki ukuran lebih besar dan lebih dalam, dengan empat lubang pada sisi tegak, yaitu tiga lubang kecil dan satu lubang berdiameter 10 mm

sebagai penopang utama motor penggerak. Bracket L motor dibuat dengan susunan empat lubang yang tidak simetris, disesuaikan dengan titik baut pada motor yang akan dipasang.

Secara keseluruhan, hasil fabrikasi bracket dan rangka menunjukkan bahwa proses manufaktur yang dilakukan, mulai dari pengukuran dan marking, bending, pengeboran, hingga finishing, telah berjalan sesuai dengan estimasi waktu yang direncanakan, dengan selisih waktu yang relatif kecil pada setiap tahapan. Hal ini mengindikasikan bahwa metode dan urutan kerja yang diterapkan pada proses manufaktur prototype mesin pembersih panel surya otomatis ini sudah cukup efisien dan dapat dijadikan acuan untuk pengembangan prototype sejenis pada penelitian selanjutnya.

Proses Fitting dan Pengelasan Rangka

Rangka utama disusun dari besi hollow 30×30 mm membentuk struktur meja dengan empat kaki vertikal, bagian atas sebagai dudukan panel, serta cross member sebagai pengikat tambahan. Kaki belakang dibuat dengan tinggi 600 mm dan kaki depan 512 mm, sehingga bagian atas rangka memiliki kemiringan sekitar 80° terhadap bidang horizontal agar panel surya berada pada sudut yang optimal, sementara setiap sambungan antar batang besi hollow tetap dibuat membentuk sudut 90° untuk memudahkan proses fabrikasi. Berdasarkan desain tersebut, terdapat sekitar 80 titik sambungan las pada seluruh rangka.

Sebelum pengelasan permanen, dilakukan proses fitting, yaitu perakitan sementara menggunakan tack weld sepanjang ±10 mm pada dua sisi setiap sambungan, untuk memastikan dimensi, kesikuan, dan kemiringan rangka telah sesuai gambar kerja sebelum pengelasan penuh dilakukan. Proses fitting membutuhkan waktu total 56 menit. Pengelasan permanen dilakukan menggunakan metode SMAW dengan elektroda E6013 diameter 2 mm dan arus 35 A, dipilih untuk mengurangi risiko lubang tembus serta distorsi panas pada material hollow tipis. Berdasarkan kecepatan pengelasan elektroda E6013 sebesar 110 mm/menit dan estimasi panjang total jalur las 2.400 mm, waktu pengelasan teoritis dihitung sesuai Persamaan (5),

$$T = L / v = 2400 / 110 = 21,82 \text{ menit} \approx 22 \text{ menit} \quad (5)$$

dengan T adalah waktu pengelasan (menit), L adalah panjang total jalur las (mm), dan v adalah kecepatan pengelasan elektroda (mm/menit). Dengan ditambah waktu pembersihan slag (10 menit) dan pemeriksaan visual (5 menit), total waktu proses pengelasan rangka adalah 37 menit. Pemilihan arus las 35 A pada penelitian ini relatif rendah dibandingkan kombinasi parameter arus optimal (170 A) yang diperoleh melalui pendekatan TOPSIS pada pengelasan SMAW pelat baja karbon untuk mencapai kekuatan tarik dan kekerasan maksimum [10], namun perbedaan ini sesuai dengan karakteristik material hollow tipis 1 mm pada penelitian ini yang membutuhkan arus lebih kecil agar tidak terjadi lubang tembus maupun distorsi panas berlebih. Kajian lain mengenai proses SMAW pada aplikasi pelapisan logam juga menegaskan bahwa meskipun proses ini relatif memakan waktu dibandingkan metode las busur lain seperti FCAW, SMAW tetap menjadi pilihan yang unggul dari sisi biaya dan fleksibilitas pada pekerjaan berskala kecil hingga menengah seperti pembuatan prototipe [11], sebagaimana tercermin pada penelitian ini yang mengutamakan efisiensi biaya dibandingkan kecepatan produksi massal.



Gambar 2 Hasil Pengelasan Rangka

Biaya Manufaktur dan Produktivitas Pengerjaan

Rekapitulasi waktu aktual seluruh tahapan proses manufaktur ditunjukkan pada Tabel 4.

Tabel 4. Rekapitulasi waktu total proses manufaktur

Tahapan Proses	Waktu Aktual (menit)
Pengukuran dan marking	305
Pemotongan material	36,75
Bending bracket	81
Pengeboran	76
Fitting rangka	56
Pengelasan rangka	37
Total Waktu Manufaktur	591,75

Total waktu manufaktur sebesar 591,75 menit (9,86 jam) menjadi dasar perhitungan produktivitas dan biaya tenaga kerja. Produktivitas dihitung dengan membandingkan jumlah komponen yang dihasilkan terhadap waktu pengerjaan. Hasil perhitungan menunjukkan produktivitas pengerjaan bracket sebesar 5,73 pcs/jam, jauh lebih tinggi dibandingkan produktivitas pengerjaan rangka meja sebesar 0,14 unit/jam, karena rangka meja memerlukan tahapan berurutan yang lebih kompleks meliputi pemotongan, fitting, dan pengelasan 80 titik sambungan, sedangkan bracket dapat dikerjakan secara berulang dengan siklus proses yang lebih singkat. Produktivitas rata-rata untuk keseluruhan 16 unit komponen (15 bracket dan 1 rangka meja) adalah 1,62 unit/jam.

Biaya manufaktur terdiri atas biaya bahan dan komponen sebesar Rp3.736.500 sebagaimana tercantum pada Rancangan Anggaran Biaya, biaya listrik sebesar Rp6.151, serta biaya tenaga kerja langsung yang dihitung berdasarkan tarif upah rata-rata UMK tahun 2026 sebesar Rp17.000/jam. Dengan total waktu manufaktur 9,86 jam, biaya tenaga kerja diperoleh sebesar Rp167.662, sehingga total biaya manufaktur adalah Rp3.910.313. Estimasi harga jual produk dihitung dengan menambahkan margin keuntungan 25% terhadap total biaya manufaktur, sesuai Persamaan (6),

$$\text{Harga Jual} = \text{Total Biaya Manufaktur} \times (1 + \text{Margin}) = \text{Rp3.910.313} \times 1,25 \approx \text{Rp4.900.000} \quad (6)$$

Margin 25% dipilih karena dipandang proporsional untuk produk skala prototipe, memberikan ruang keuntungan yang wajar tanpa membuat harga jual menjadi tidak kompetitif dibandingkan alternatif sistem sejenis di pasaran. Kajian mengenai produktivitas dan ekonomi proses pengelasan pada industri fabrikasi logam menunjukkan bahwa efisiensi biaya sangat dipengaruhi oleh pemilihan metode las serta proporsi waktu kerja langsung terhadap total waktu produksi [12], sehingga struktur biaya pada penelitian ini, dengan komponen biaya tenaga kerja langsung sebesar 4,3% dari total biaya manufaktur, tergolong wajar untuk pekerjaan berbasis proses manual berskala prototipe dibandingkan proses produksi massal yang umumnya memiliki proporsi biaya tenaga kerja lebih tinggi akibat siklus kerja yang berulang. Perbandingan ini menegaskan bahwa struktur biaya dan produktivitas pada penelitian ini lebih relevan dijadikan acuan untuk pengembangan prototipe serupa berskala kecil, bukan untuk produksi komersial berskala besar yang memerlukan efisiensi waktu dan otomatisasi lebih tinggi.

Kinerja Akhir Alat

Hasil akhir rangka meja dan kelima jenis bracket menunjukkan kesesuaian dengan gambar kerja, baik dari segi dimensi, sudut kemiringan 80°, maupun posisi lubang baut. Pengamatan kualitatif terhadap struktur menunjukkan rangka yang sudah dirakit bersifat kuat dan stabil, tanpa getaran atau perubahan bentuk berarti saat menahan beban panel surya beserta komponen mekanik dan elektronik di atasnya. Hasil pengelasan pada 80 titik sambungan menggunakan SMAW dan elektroda E6013 menghasilkan sambungan yang rapat tanpa retak atau lubang tembus, sejalan dengan pemilihan arus las 35 A yang relatif rendah untuk mengurangi risiko distorsi panas pada material hollow tipis. Bracket hasil bending dan pengeboran juga dapat dipasang langsung tanpa penyesuaian ulang, menandakan akurasi proses penandaan dan pengeboran yang telah dilakukan.

Mekanisme pendukung berupa sistem pulley dan belt, motor penggerak, wiper pembersih, serta pompa dan nozzle penyemprot air yang telah dirangkai pada rangka hasil manufaktur dapat berfungsi sesuai rancangan saat diujicoba, meskipun pengujian kuantitatif terhadap kekuatan struktur (misalnya uji beban statis/dinamis menggunakan load cell) belum dilakukan dalam penelitian ini dan menjadi salah satu batasan yang dapat ditindaklanjuti pada penelitian selanjutnya.



Hak Cipta Negeri Jakarta

Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Hak Cipta :

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :

a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.

b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta

2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta



Gambar 3 Hasil Kinerja Alat Assembly

4. DISIMPULAN

Berdasarkan hasil proses manufaktur prototype mesin pembersih panel surya otomatis berbasis mikrokontroler dengan mekanisme pulley dan belt, dapat disimpulkan bahwa rangka prototype yang menggunakan besi hollow hitam 30×30 mm tebal 1 mm berhasil dibuat dengan kekuatan dan kestabilan yang sesuai dengan desain, dengan sudut kemiringan bagian atas 80° dan 80 titik sambungan las menggunakan SMAW elektroda E6013. Proses meliputi pengukuran dan marking dengan total waktu 305 menit, pemotongan material 36,75 menit, bending lima jenis bracket dengan total waktu aktual 81 menit, pengeboran 15 pcs bracket dengan total waktu 76 menit, fitting rangka 56 menit, dan pengelasan rangka 37 menit, sehingga total waktu manufaktur adalah 591,75 menit (9,86 jam). Perbandingan waktu estimasi dan aktual pada setiap tahapan menunjukkan selisih yang relatif kecil, yaitu berkisar 0–0,5 menit per komponen pada proses bending, yang mengindikasikan bahwa perencanaan waktu manufaktur sudah cukup akurat dan proses kerja berjalan efisien. Produktivitas pengerjaan bracket tercatat sebesar 5,73 pcs/jam, sedangkan produktivitas pengerjaan rangka meja sebesar 0,14 unit/jam, dengan rata-rata produktivitas keseluruhan 1,62 unit/jam. Total biaya manufaktur yang diperlukan adalah Rp3.910.313, terdiri atas biaya bahan dan komponen sebesar Rp3.736.500, biaya listrik sebesar Rp6.151, serta biaya tenaga kerja langsung sebesar Rp167.662, dengan estimasi harga jual produk sebesar Rp4.900.000 pada margin keuntungan 25%. Kaki rangka meja panel dan bracket rangka panel yang dihasilkan juga telah sesuai dengan desain serta dapat dipasang langsung tanpa penyesuaian ulang, sehingga dapat mendukung pemasangan panel surya serta sistem pembersih otomatis berbasis pulley dan belt secara optimal. Penelitian lebih lanjut disarankan untuk melengkapi pengujian kuantitatif terhadap kekuatan struktur, seperti uji beban statis atau dinamis menggunakan load cell, agar diperoleh data kinerja struktur yang lebih lengkap dan akurat.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Program Studi Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, atas dukungan fasilitas dan sarana yang diberikan selama pelaksanaan penelitian ini. Penulis mengucapkan terima kasih kepada Lab Konversi Energi, Politeknik Negeri Jakarta, telah memberikan fasilitas dan sarana yang diberikan selama pelaksanaan penelitian membuat prototype alat pembersih solar panel. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (P3M), Politeknik Negeri Jakarta, atas dukungan pendanaan selama pelaksanaan penelitian ini dengan skema PMTA dengan nomor surat : 919/DST/PL3.14/B/PT.00.03/2026, Tanggal 26 Mei 2026, dan penulis juga menyampaikan apresiasi kepada seluruh pihak yang telah memberikan bantuan baik secara teknis maupun administratif sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

REFERENSI

- [1] N. A. Ardiansyah, "Rancang Bangun Alat Pembersih Solar Panel Menggunakan Wiper Dan Rolling Brush Secara Otomatis Berbasis Mqtt," *El Sains J. Elektro*, vol. 6, no. 1, pp. 15–20, 2024, doi: 10.30996/elsains.v6i1.10309.
- [2] W. Purnomo, S. B. Mulia, and M. Fikri, "Rancang Bangun Prototype Pembersih Solar Panel Otomatis Pada Rooftop Berbasis Mikrokontroler," *J. Energy Electr. Eng.*, vol. 5, no. 1, pp. 55–64, 2023, doi: 10.37058/jee.v5i1.8540.
- [3] M. R. W. Kusuma, E. Apriaskar, and D. Djunaidi, "Rancang Bangun Sistem Pembersih Otomatis Pada Solar Panel Menggunakan Wiper Berbasis Mikrokontroler," *Techné J. Ilm. Elektrotek.*, vol. 19, no.



© Hak Cipta milik Politeknik Negeri Jakarta

Hak Cipta:

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penulisan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah.
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar Politeknik Negeri Jakarta
2. Dilarang mengemukakan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

01, pp. 23–32, 2020, doi: 10.31358/techne.v19i01.220.

- [4] A. Sumpena, “Teknik Kerja Mesin Perkakas,” *Depok Politek. Negeri Jakarta*, vol. 58, pp. 59–60, 2011.
- [5] Y. A. Nugroho, “PROSES MANUFAKTUR MESIN VAPOR BLASTING CNC 2-AXIS,” repository pnj. Accessed: May 20, 2026. [Online]. Available: <https://repository.pnj.ac.id/id/eprint/32682/>
- [6] Histeel, “Tabel Berat Besi Hollow Hitam dan Ukurannya,” histeel.co.id. Accessed: Jun. 04, 2026. [Online]. Available: <https://histeel.co.id/ukuran-dan-berat-besi-hollow-hitam/?srsltid=AfmBOopHrwWRWoEbYXIZhq0M3pVYiMgfSfsPxWjT9yiC77Pr9kDyN6y9>
- [7] M. S. Anam, J. W. Dika, and H. S. Putra, “Analisis Tensile Strength Dan Micro Structure Pada Hasil Las Plat Besi Strip Dengan Variasi Jenis Ampare,” *J. Sci. Nusan.*, vol. 2, no. 1, pp. 24–32, 2022, doi: 10.28926/jsnu.v2i1.206.
- [8] K. Janovska, S. Vilamova, D. Labounek, R. Kozel, and T. Pala, “Methodology for Calculating the Cost Price of the Bending Process for the Needs of Manufacturing Logistics,” *Acta Logist.*, vol. 9, no. 4, pp. 361–368, 2022, doi: 10.22306/al.v9i4.326.
- [9] M. Ballegeer, T. Van Camp, W. Jaspers, A. Bayar, A. N. Soe, M. Roelfs, D. F. Benoit, B. Decraemer, and J. R. Duflo, “CAD-feature enhanced machine learning for manufacturing effort estimation on sheet metal bending parts,” *arXiv preprint arXiv:2605.12266*, 2026.
- [10] O. O. Lofinmakin, I. Emovon, and O. D. Samuel, “Selection of Optimal Process Parameters for a Mild Steel Weld using Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution,” *J. Appl. Sci. Environ. Manag.*, vol. 26, no. 8, 2022, doi: 10.4314/jasem.v26i8.5.
- [11] Chowda Reddy C., K. M. Kenchi Reddy, C. T. Jayadeva, Ramesh Kumar S. C., R. Vara Prasad Kaviti, A. Bhowmik, and C. Prakash, “A Comparative Assessment of Chromium–Boron Hardfacing Using SMAW and FCAW Techniques,” *Sci. World J.*, 2024, doi: 10.1155/2024/4943983.
- [12] Fachrizal and A. N. Fajar, “A Work on Welding Productivity and Economy for SMAW & FCAW Processes,” *Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng.*, vol. 9, no. 5, 2020.

POLITEKNIK
NEGERI
JAKARTA