



PERANCANGAN PROTOTYPE ALAT PEMBERSIH PANEL SURYA BERBASIS MIKROKONTROLER MENGGUNAKAN METODE *QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT (QFD)*

Gibran Mahesya Rizky¹, Rosidi^{2*}, dan Candra Damis Widiawaty³

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

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

Abstrak

Pendampukan debu dan kotoran pada permukaan panel surya dapat menurunkan efisiensi penyerapan cahaya matahari di sistem PLTS, sehingga diperlukan sistem pembersih yang bekerja secara otomatis. Penelitian ini bertujuan merancang prototype alat pembersih panel surya berbasis mikrokontroler menggunakan metode Quality Function Deployment (QFD) dengan membuat Kuesioner supaya mengetahui kebutuhan pelanggan, lalu membuat konsep Screening dan Scoring untuk memperoleh desain terbaik. Sistem menggunakan mekanisme timing belt, pulley, wiper, serta penyemprotan air. Hasil perhitungan menunjukkan pitch diameter pulley sebesar 12,73 mm, torsi motor 0,1404 Nm, daya motor 0,293 W, gaya tarik timing belt 2,20 N, dan kecepatan linear belt 0,133 m/s. Dimensi yang digunakan pada rangka adalah 530 X 510 X 600, Hasil simulasi SolidWorks menunjukkan tegangan maksimum 20,59 MPa, displacement maksimum 0,049 mm, dan Factor of Safety (FoS) sebesar 12, dengan beban yang berada pada rangka adalah 15 kg atau 150 N, sehingga masih berada di bawah yield strength material ASTM A36. Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi, prototype dinyatakan aman secara struktural dan layak digunakan sebagai alat pembersih panel surya otomatis.

Kata kunci: panel surya, mikrokontroler, QFD, SolidWorks, alat pembersih otomatis.

Abstract

The build-up of dust and dirt on the surface of solar panels can reduce the efficiency of sunlight absorption in solar power systems, thus necessitating an automatic cleaning system. This research aims to design a prototype microcontroller-based solar panel cleaning device using the Quality Function Deployment (QFD) method, by creating a questionnaire to identify customer needs, followed by a Screening and Scoring process to arrive at the optimal design. The system utilises a timing belt mechanism, pulleys, a wiper and a water spray. Calculation results indicate a pulley pitch diameter of 12.73 mm, motor torque of 0.1404 Nm, motor power of 0.293 W, timing belt tensile force of 2.20 N, and linear belt speed of 0.133 m/s. The dimensions used for the frame are 530 × 510 × 600. SolidWorks Simulation results show a maximum stress of 20.59 MPa, a maximum displacement of 0.049 mm, and a Factor of Safety (FoS) of 12, with a load on the frame of 15 kg or 150 N, which remains below the yield strength of ASTM A36 material. Based on the calculation and Simulation results, the prototype is deemed structurally safe and suitable for use as an automatic solar panel cleaning device.

Keywords: solar panel, microcontroller, Quality Function Deployment (QFD), SolidWorks, automatic cleaning system

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 mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi energi terbarukan di Indonesia meningkat pesat, terutama dalam penggunaan energi surya melalui panel surya atau photovoltaic (PV). Energi surya dianggap sebagai solusi untuk memenuhi kebutuhan listrik yang semakin tinggi dan mengurangi ketergantungan pada energi fosil yang merusak lingkungan. Indonesia, sebagai negara tropis, memiliki potensi besar untuk mengembangkan pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) karena banyaknya sinar matahari sepanjang tahun[1]. Panel surya telah digunakan di berbagai sektor, termasuk rumah tangga dan industri. Namun, ada beberapa masalah yang mempengaruhi kinerja dan efisiensi panel surya. Salah satu masalah utama adalah penumpukan debu dan kotoran di permukaan panel yang dapat menghalangi sinar matahari dan menurunkan daya listrik yang dihasilkan. Penelitian menunjukkan bahwa partikel debu pada panel mengurangi intensitas cahaya yang masuk, berdampak negatif pada keluaran daya panel[2]. Akumulasi debu pada panel surya dapat menurunkan daya keluaran dan menyebabkan hotspot, yang meningkatkan suhu pada titik tertentu dan bisa merusak panel. Hotspot dapat memperpendek umur pakai panel jika tidak ditangani. Penelitian menyebutkan bahwa sistem pembersih otomatis diperlukan untuk mengatasi kehilangan efisiensi akibat soiling dan hotspot[3]. Saat ini, pembersihan panel surya umumnya dilakukan secara manual, yang memerlukan waktu lama, tambahan tenaga kerja, biaya tinggi, dan memiliki risiko kecelakaan, terutama di tempat tinggi. Oleh karena itu, penting untuk memiliki sistem pembersih panel surya otomatis yang efektif, efisien, dan terjadwal. Perkembangan teknologi mikrokontroler memberikan peluang dalam sistem otomatis, termasuk sistem pembersih panel surya. Mikrokontroler dapat mengatur alat, motor DC, sensor, dan monitoring real-time, serta bekerja otomatis berdasarkan waktu atau tingkat kekotoran panel. Mekanisme penggerak adalah bagian penting dalam sistem pembersih. Motor DC dengan sistem transmisi seperti pulley dan timing belt dianggap efektif untuk menggerakkan wiper atau sikat pembersih. Integrasi sensor dan mikrokontroler meningkatkan kontrol otomatis dan monitoring kondisi panel secara akurat. Penelitian sebelumnya menunjukkan sistem pembersih otomatis penting untuk efisiensi dan performa panel, namun terdapat kekurangan seperti desain mekanik yang tidak optimal dan biaya tinggi[4].

Beberapa penelitian telah mengembangkan alat pembersih panel surya otomatis dengan berbagai mekanisme, tetapi seringkali fokusnya pada aspek teknis tanpa mempertimbangkan kebutuhan pengguna. Hal ini menyebabkan desain yang dihasilkan tidak memiliki dasar pengambilan keputusan yang terstruktur. Selain itu, banyak rancangan memiliki kelemahan, seperti konstruksi yang kompleks dan biaya tinggi, serta kurangnya evaluasi sejak tahap awal. Penelitian ini menawarkan pendekatan baru dengan menggunakan metode *Quality Function Deployment (QFD)* dalam perancangan prototipe alat pembersih panel surya berbasis mikrokontroler. Metode QFD membantu menerjemahkan kebutuhan pengguna ke dalam spesifikasi teknis produk, dan menggunakan *House of Quality (HoQ)* untuk menyusun kebutuhan tersebut. Hasil dari QFD digunakan untuk memilih desain terbaik melalui konsep pemilihan dan penilaian sebelum melakukan analisis teknik dan simulasi dengan *SolidWorks*[5]. Pendekatan tersebut menjadi urgensi penggunaan QFD pada penelitian ini karena prototype yang dikembangkan tidak hanya ditujukan untuk menghasilkan sistem pembersih panel surya yang mampu bekerja secara otomatis, tetapi juga mudah digunakan, mudah dirawat, tidak merusak permukaan panel, memiliki biaya manufaktur yang relatif rendah, serta menggunakan air secara efisien sesuai kebutuhan pengguna yang diperoleh melalui kuesioner. Dengan demikian, penelitian ini menghasilkan proses perancangan yang lebih sistematis, berorientasi pada pengguna (*user-oriented design*), serta menghasilkan rancangan yang dapat dipertanggungjawabkan baik dari aspek kebutuhan pengguna maupun aspek teknis[6].

2. METODE PENELITIAN

Jenis Penelitian

Penelitian ini adalah rancang bangun alat pembersih panel surya otomatis yang menggunakan mikrokontroler. Metode yang dipakai adalah *Quality Function Deployment (QFD)* untuk mengubah kebutuhan pengguna menjadi spesifikasi produk. Pemilihan konsep dilakukan dengan Konsep *Screening* dan Konsep *Scoring*, serta analisis teknik menggunakan *SolidWorks Simulation*.

Objek Penelitian

Penelitian menggunakan panel surya berukuran 680 × 540 × 30 mm sebagai objek pembersihan. Prototype terdiri atas rangka baja *ASTM A36*, motor DC gearbox JGB37-545 12 V, timing belt, pulley GT2, wiper berbahan *rubber*, pompa air DC 12 V, *mist nozzle*, Arduino ESP32, driver motor L298N, *flexible coupling*, bearing, dan bracket pendukung. Perancangan model tiga dimensi dilakukan menggunakan *SolidWorks 2024*, sedangkan analisis kekuatan struktur dilakukan dengan modul *SolidWorks Simulation* menggunakan metode Finite Element Analysis (FEA).



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 mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini menggunakan metode Quality Function Deployment (QFD) untuk merancang prototype alat pembersih panel surya otomatis berbasis mikrokontroler. Penelitian dimulai dengan studi literatur untuk mengumpulkan referensi tentang panel surya, sistem pembersihan, metode QFD, dan komponen yang digunakan. Selanjutnya, kebutuhan pengguna diidentifikasi melalui observasi dan kuesioner. Data yang diperoleh dianalisis dengan metode QFD dan disusun dalam House of Quality (HoQ) untuk menerjemahkan kebutuhan menjadi spesifikasi teknis dan menentukan prioritas desain. Berdasarkan analisis QFD, dilakukan perancangan dua alternatif konsep yang dievaluasi dengan metode Concept Screening dan Concept Scoring untuk memilih konsep terbaik. Konsep terpilih kemudian dianalisis melalui perhitungan teknik dan dilakukan simulasi struktur menggunakan SolidWorks Simulation untuk memvalidasi desain dan memastikan kelayakannya.

Parameter Penelitian

Parameter penelitian yang di analisis oleh penulis meliputi parameter perancangan, parameter simulasi, dan parameter evaluasi. Parameter perancangan terdiri atas kecepatan gerak alat, torsi motor, diameter selang, debit air, dan daya listrik yang digunakan sebagai dasar dalam menentukan spesifikasi sistem pembersih panel surya. Parameter simulasi meliputi nilai tegangan *Von Mises*, *displacement*, dan *Factor of Safety (FoS)* yang diperoleh dari analisis statik menggunakan *SolidWorks Simulation* untuk mengevaluasi kekuatan struktur rangka. Selain itu, parameter evaluasi menggunakan metode *Quality Function Deployment (QFD)* meliputi tingkat kepentingan pelanggan, bobot karakteristik teknis pada *House of Quality (HoQ)*, serta hasil Konsep *Screening* dan Konsep *Scoring* dalam menentukan alternatif desain terbaik.

Analisis Data

Data hasil kuesioner dianalisis menggunakan metode *Quality Function Deployment (QFD)* dengan penyusunan matriks *House of Quality* untuk menentukan prioritas spesifikasi teknis. Selanjutnya hasil *Screening* dan *Scoring* digunakan untuk memilih alternatif desain terbaik. Hasil perhitungan dibandingkan dengan hasil simulasi *SolidWorks Simulation* untuk memvalidasi rancangan. Kriteria kelayakan struktur ditentukan berdasarkan nilai tegangan yang lebih kecil dari *yield strength ASTM A36*, nilai perpindahan yang rendah, serta *Factor of Safety* yang memenuhi batas aman.

Langkah Simulasi

Simulasi dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks Simulation* dan metode *Static Analysis* untuk menguji kekuatan struktur rangka. Pertama, model tiga dimensi (3D) rangka dibuat dengan ukuran 530 x 510 x 600 (P x L x T) dan ditentukan jenis materialnya, yaitu *ASTM A36*. Selanjutnya, *Fixed Geometry* ditetapkan sebagai titik tumpuan. Beban yang sesuai diberikan berdasarkan analisis yang dilakukan. Proses meshing dilakukan untuk memecah model menjadi elemen kecil untuk perhitungan yang lebih akurat menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)*. Hasil simulasi menunjukkan distribusi tegangan, perpindahan, regangan, dan nilai *safety factor*, yang kemudian dibandingkan dengan perhitungan teoritis untuk memvalidasi kekuatan rancangan rangka.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil *Quality Function Deployment (QFD)*

Mengidentifikasi kebutuhan pelanggan membantu memahami harapan dan keinginan mereka terhadap produk atau layanan, meningkatkan kepuasan dan daya saing. Dari hasil kuisisioner yang saya buat diperoleh hasil berikut.

Tabel 3. 1 Kebutuhan Pelanggan

No	Kebutuhan <i>Customer</i>	<i>Importance</i>
1	Mudah digunakan	3
2	Pembersihan Optimal	3,5
3	Tidak Merusak Panel	4
4	Mudah Dalam Perawatan	4
5	<i>Cost</i> Pembuatan	3,5
6	Hemat Air	3

Berdasarkan kebutuhan konsumen, telah dilakukan penetapan spesifikasi teknis beserta targetnya, berikut ini merupakan hasil dari diskusi terkait spesifikasi teknis pada tabel.

Tabel 3. 2 Target Spesifikasi Teknis

NO	Spesifikasi	Target
1	Kecepatan Gerak Alat	$\geq 0,1$ m/s
2	Torsi Motor	≤ 1 Nm
3	Diameter Pulley	12,7 mm
4	Biaya Manufaktur	Rp 3.000.000
5	Material Wiper	Rubber
6	Efektivitas Pembersihan	$\geq 90\%$
7	Debit Aliran	1 – 2 L/Min
8	Daya Listrik	≤ 15 W

Matriks House of Quality dapat digunakan untuk menentukan bobot kepentingan pada pemilihan konsep desain, berikut adalah *Matriks House of Quality* yang dibuat oleh penulis.

Tabel 3. 3 Matriks *House of Quality*

Metode : Quality Function Deployment (QFD)
-Tools : House of Quality (HOQ)

QFD : House of Quality (HOQ)
project : Dies Compression Molding

Legend										
++	Strong positive correlation									
+	Positive correlation									
.	No correlation									
-	Negative correlation									
▼	Strong negative correlation									
9	Strong relationship									
3	Moderate relationship									
1	Weak relationship									

1: very easy, 5: very difficult

Konsep *Screening* merupakan tahap penyaringan awal yang digunakan untuk mengevaluasi dan memilih alternatif desain, berikut hasil konsep *Screening*.

Tabel 3. 4 Konsep *Screening*

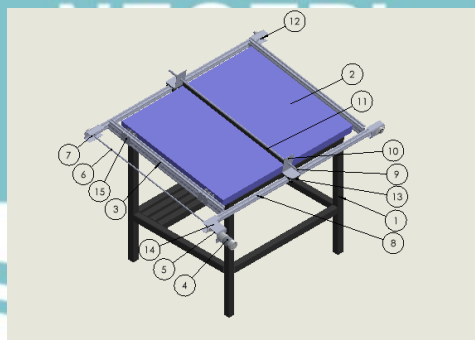
No	Kriteria Seleksi	Alternatif Desain		
		1	2	Ref
1	Mudah digunakan	+	+	0
2	Pembersihan Optimal	+	+	0
3	Tidak Merusak Panel	+	+	0
4	Mudah dalam Perawatan	+	-	0
5	Cost Pembuatan	+	-	0
6	Hemat Air	0	0	0
Jumlah nilai (+)		5	3	
Jumlah nilai (-)		0	2	
Jumlah nilai (0)		1	1	
Total Nilai		5	1	
Peringkat		1	2	
Lanjutkan		YA	YA	

Setelah tahap *Screening* selesai dilakukan, konsep desain yang terpilih kemudian dievaluasi lebih lanjut menggunakan metode *Scoring*, berikut hasil *Scoring* yang dilakukan oleh penulis.

Tabel 3. 5 Konsep *Scoring*

No.	Kriteria Seleksi	Bobot	Design Konsep			
			1		2	
			Nilai	Bobot Nilai	Nilai	Bobot Nilai
1	Mudah digunakan	14%	4	0,006	4	0,0056
2	Pembersihan Optimal	17%	4	0,0068	5	0,0085
3	Tidak Merusak Panel	19%	4	0,0076	5	0,0095
4	Mudah dalam Perawatan	19%	5	0,0095	3	0,0057
5	Cost Pembuatan	17%	5	0,0085	3	0,0051
6	Hemat Air	14%	4	0,0056	4	0,0056
Total			0,044		0,04	
Peringkat			1		2	
Kesiapan Konsep			YA		TIDAK	

Desain yang terpilih adalah Alternatif desain 1 alat pembersih panel surya yang menggunakan mekanisme timing belt dan pulley. Mekanisme ini mentransmisikan putaran motor ke pulley yang menggerakkan timing belt, yang terhubung denganudukan sikat pembersih untuk bergerak di sepanjang permukaan panel surya. Sistem ini cepat, ringan, dan murah, serta mudah dalam perawatan. Namun, ada kelemahan seperti akurasi posisi yang rendah, kemungkinan slip, dan kebutuhan penyetelan ketegangan secara berkala. Sistem juga lebih rentan terhadap getaran.



Gambar 3. 1 Desain Alternatif 1

Bagian-bagian dari alat *prototype* pembersih panel surya:

- | | |
|---|---|
| 1. Rangka Utama | 9. Shaft Wiper |
| 2. Panel Surya | 10. Bracket Wiper |
| 3. Frame Alat | 11. Wiper |
| 4. Motor Dinamo | 12. <i>Pulley</i> Penegang/ <i>Idler pulley</i> |
| 5. Shaft Couple | 13. Roda |
| 6. Shaft | 14. Bracket Motor Dinamo |
| 7. <i>Pulley</i> Penggerak/ <i>Drive Pulley</i> | 15. Bracket Alat ke Panel |
| 8. Belt | |



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

Analisis Perhitungan

1. Massa Total Alat

Beban Maksimum pada alat adalah 15 kg

$$F = m \cdot g = 15 \times 9,81 = 147,15 \text{ N}$$

Perhitungan massa total digunakan untuk mengetahui beban yang ditopang rangka dan sistem penggerak. Ini penting untuk menentukan gaya berat, torsi motor, dan kekuatan struktur. Jadi beban maksimum yang berada pada ragka adalah 147,15 N[7].

2. Gaya Gesek Sikat

Gaya gesek dihitung untuk mengetahui besar gaya yang harus diatasi motor saat menggerakkan wiper di atas permukaan panel surya[8].

$$F_g = \mu \times N = 0,5 \times 2,943 = 1,47 \text{ N}$$

Jadi gaya gesek yang dihasilkan oleh wiper adalah 1,47 N.

3. Torsi Motor

Perhitungan torsi bertujuan untuk memastikan motor mampu menggerakkan sistem pembersih sesuai beban kerja yang diterima[8].

$$T = F_g \times r = 1,47 \times 0,006365 = 0,00936 \text{ Nm}$$

$$T \times SF = 0,00936 \times 1,5 = 0,1404 \text{ Nm}$$

Jadi torsi motor yang digunakan adalah 0,1404 Nm.

4. Daya Motor

Perhitungan daya dilakukan untuk mengetahui kebutuhan energi listrik selama alat beroperasi. Besarnya daya dipengaruhi oleh nilai torsi dan kecepatan putar motor[8].

$$P = \frac{2 \times \pi \times n \times T}{60} = \frac{2 \times 3,14 \times 200 \times 0,140}{60} = 0,293 \text{ W}$$

Jadi daya yang dihasilkan oleh motor adalah 0,293 W.

5. Kecepatan Linear Belt

Perhitungan kecepatan linear timing belt dilakukan untuk mengetahui kecepatan gerak wiper saat membersihkan permukaan panel surya, dan waktu tempuh sekali gerak (satu arah)[9].

$$V = \frac{\pi \times D \times N}{60} = \frac{3,14 \times 0,01273 \times 200}{60} = 0,133 \text{ m/s}$$

Waktu yang di tempuh dalam sekali gerak (satu arah):

$$t = \frac{s}{V} = \frac{0,68}{0,133} = 5,11 \text{ s}$$

Jadi kecepatan linear timing belt yang dihasilkan adalah 0,133 m/s, dan waktu yang di tempuh dalam satu kali gerak adalah 5,11 s.

6. Debit Air

Perhitungan debit air bertujuan untuk mengetahui jumlah air yang diperlukan selama proses pembersihan panel surya[10].

$$Q = \frac{V}{t} = \frac{240}{60} = 4 \text{ L/menit} = 0,67 \text{ L/s}$$

Jaadi debit air yang diperlukan adalah 4 L/menit atau 0,067 L/s.



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

7. Daya Pompa

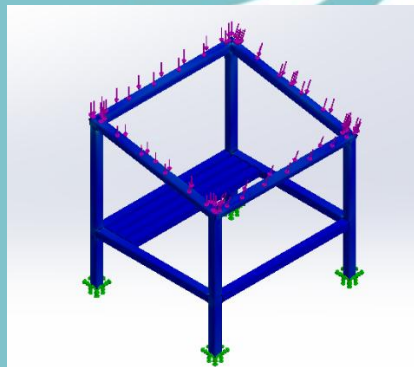
Perhitungan daya pompa bertujuan untuk mengetahui kebutuhan daya listrik pompa selama proses penyemprotan. Hasil perhitungan digunakan untuk memastikan pompa bekerja sesuai spesifikasi[11].

$$P = V \times A = 12 \times 0,35 = 4,2 \text{ W}$$

Jadi daya yang di perlukan adalah 4,2 W.

Langkah simulasi

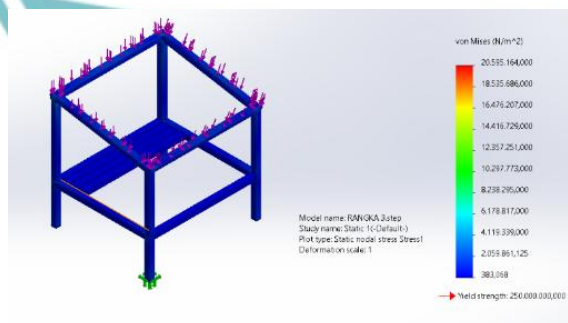
Simulasi struktur rangka dilakukan menggunakan *SolidWorks Simulation* dengan metode *Static analysis*. Material rangka ditetapkan menggunakan baja karbon *ASTM A36*. Kondisi batas (*boundary conditions*) ditentukan dengan memberikan *Fixed Support* pada keempat kaki rangka (ditunjukkan dengan panah hijau pada kaki rangka). Kondisi ini merepresentasikan keadaan aktual saat *prototype* dipasang pada panel surya, di mana kaki-kaki rangka dianggap terikat kuat sehingga tidak mengalami perpindahan maupun rotasi selama proses operasi. Beban statis sebesar 150 N diaplikasikan secara vertikal ke bawah pada bagian atas rangka (ditunjukkan dengan panah berwarna ungu ke arah bawah) sebagai representasi berat total komponen *prototype* yang meliputi motor DC, sistem transmisi, carriage, pompa air, dan komponen pendukung lainnya. Selanjutnya, proses *meshing* dilakukan menggunakan *Blended Curvature-Based Solid Mesh* dengan kualitas *High*, ukuran elemen maksimum 53,04 mm dan ukuran elemen minimum 2,65 mm, sehingga menghasilkan 408.214 elemen dan 819.878 node. Hasil simulasi kemudian dievaluasi berdasarkan distribusi tegangan *Von Mises*, *displacement*, dan *Factor of Safety (FoS)*[12].



Gambar 3. 2 *Boundary Conditions*

Hasil Simulasi Struktur Rangka Pada Software *Solidwork*

1. Analisis *Von Mises Stress*

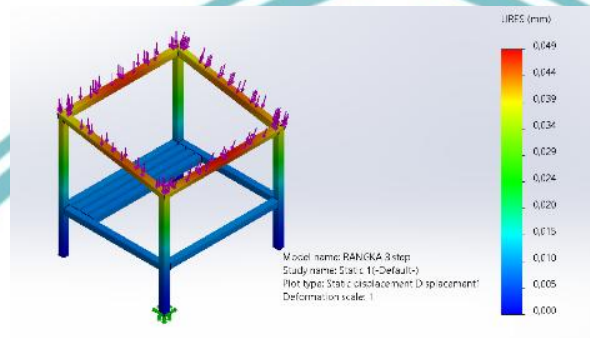


Gambar 3. 3 *Von Mises Stress*

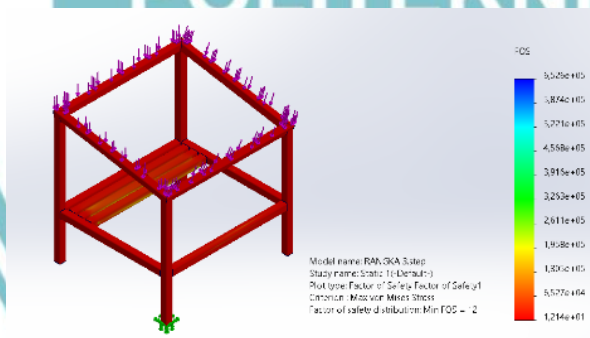
Hak Cipta :

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 mengumpukan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin Politeknik Negeri Jakarta

Berdasarkan hasil simulasi, Tegangan maksimum pada rangka mencapai 20,59 MPa, jauh di bawah kekuatan material *ASTM A36* yang sebesar 250 MPa, sehingga rangka aman secara struktural. sehingga struktur masih berada dalam daerah elastis dan tidak mengalami perubahan bentuk permanen. Ini menunjukkan bahwa desain rangka tersebut mampu menyebar beban secara merata, sehingga tekanan pada material tidak melebihi batas daya tahan yang dimilikinya. Hasil ini juga sesuai dengan teori mekanika bahan yang menyatakan bahwa suatu struktur dianggap aman jika tegangan yang terjadi lebih kecil dari tegangan luluh bahan tersebut[13].

2. Analisis *Displacement*Gambar 3. 4 Analisis *Displacement*

Perpindahan maksimum yang terjadi adalah 0,049 mm, menunjukkan bahwa deformasi rangka sangat kecil dan struktur tetap stabil serta fungsional. Hal tersebut mengindikasikan bahwa kekakuan rangka cukup baik sehingga tidak mengganggu lintasan gerak wiper selama proses pembersihan panel surya. Semakin kecil displacement yang terjadi, semakin tinggi kekakuan struktur dalam mempertahankan bentuk ketika menerima pembebanan[13].

3. Analisis *Factor of Safety* (FOS)Gambar 3. 5 Analisis *Factor of Safety* (FOS)

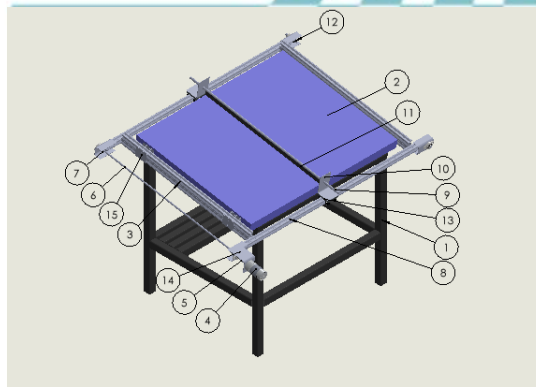
Berdasarkan analisis, nilai FOS adalah 12, menunjukkan bahwa rangka aman dan dapat menahan beban lebih besar dari yang diberikan. Struktur dinyatakan aman untuk dioperasikan. Berdasarkan prinsip perancangan mekanik, nilai FoS di atas 2 umumnya telah memenuhi kriteria keamanan struktur statis. Oleh karena itu, nilai FoS sebesar 12 menunjukkan bahwa rangka sangat aman, meskipun masih terdapat peluang untuk melakukan optimasi dimensi agar penggunaan material menjadi lebih efisien[13].



Hasil Perancangan

Hasil penelitian ini adalah prototype alat pembersih panel surya otomatis. Pengembangan dilakukan melalui langkah-langkah sistematis, mulai dari identifikasi kebutuhan pelanggan hingga validasi desain dengan simulasi SolidWorks. Semua tahapan berhasil menghasilkan alat yang fungsional, mudah digunakan, kuat, dan efisien. Metode Quality Function Deployment (QFD) digunakan untuk menemukan karakteristik teknis pengguna, seperti efektivitas pembersihan, material wiper, debit penyemprotan air, kecepatan gerak alat, dan konsumsi daya listrik. Karakteristik ini menentukan spesifikasi komponen agar sesuai dengan kebutuhan pengguna.

Evaluasi menggunakan metode konsep *Screening* dan konsep *Scoring* menunjukkan desain pertama adalah pilihan terbaik untuk prototype. Desain menggunakan mekanisme transmisi *timing belt* dan *pulley* dengan motor DC, yang mengubah gerak putar menjadi gerak translasi. Desain ini sederhana, biaya rendah, dan mudah dirakit. Analisis spesifikasi komponen menunjukkan kecocokan untuk kebutuhan operasional. Validasi dengan *SolidWorks Simulation* menggunakan *Finite Element Analysis (FEA)* memastikan struktur dalam batas aman. *Prototype* yang dihasilkan adalah alat pembersih panel surya otomatis yang efisien dan kuat, menjadi dasar bagi manufaktur dan penelitian selanjutnya.



Gambar 3. 6 Desain *Prototype* Alat Pembersih Solar Panel

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perancangan, perhitungan, dan simulasi alat pembersih panel surya berbasis mikrokontroler, dapat disimpulkan bahwa.

1. Penelitian ini berhasil membuat *prototype* alat untuk membersihkan panel surya secara otomatis menggunakan *mikrokontroler* dengan metode *Quality Function Deployment (QFD)*. Penerapan *QFD* mampu mengubah kebutuhan pengguna menjadi spesifikasi teknis yang spesifik, sehingga diperoleh beberapa alternatif desain yang memenuhi berbagai aspek seperti kemudahan dalam penggunaan, kemudahan dalam perawatan, efektivitas dalam pembersihan, biaya produksi, serta efisiensi penggunaan air.
2. Hasil perhitungan mekanisme menunjukkan bahwa sistem transmisi yang menggunakan *timing belt* dan *pulley* memenuhi kebutuhan desain dengan pitch diameter pulley sebesar 12,73 mm, torsi motor sebesar 0,1404 Nm, daya motor sebesar 0,293 W, gaya tarik *timing belt* sebesar 2,20 N, serta kecepatan linear belt sebesar 0,133 m/s. Nilai tersebut menunjukkan bahwa sistem penggerak mampu menggerakkan mekanisme pembersih sesuai dengan kebutuhan perancangan. Beban yang bekerja pada rangka masih di bawah batas maksimum material ASTM A36, perpindahan yang terjadi sangat kecil, dan nilai faktor keamanan menunjukkan bahwa rangka tersebut aman untuk mendukung beban kerja dari prototype.



Berdasarkan hasil tersebut, tujuan penelitian untuk membuat rancangan prototype alat pembersih panel surya yang sesuai dengan kebutuhan pengguna, layak secara teknis, dan aman secara struktur telah berhasil tercapai. Prototype ini bisa dikembangkan lebih jauh dengan menguji langsung performanya pada panel surya di berbagai kondisi lingkungan.

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] R. Subarkah, G. Heryana, And C. D. Widiawaty, "The Development Of Photovoltaic Application In Indonesia : A Review," No. Asais 2019, Pp. 108–113, 2022, Doi: 10.5220/0009906100002905.
- [2] H. Isyanto, M. Azra, K. Batubara, And D. Almada, "Perancangan Alat Pembersih Panel Surya Berbasis Internet Of Things," Vol. 6, No. 2, Pp. 125–132.
- [3] U. Singaperbangsa, D. Satria, L. A. Faturrahman, And F. E. Subagja, "Volume 7 Issue 1 Aisyah Journal Of Informatics And Electrical Engineering Sistem Pembersih Panel Surya Otomatis Dengan Metode Wiper Berbasis Internet Of Things (Iot) Untuk Mengatasi Soiling Loss Dan Hot Spot Pada Panel Surya Aisyah Journal Of Informatics And Electrical Engineering Aisyah Journal Of Informatics And Electrical Engineering," Vol. 7, No. 1, Pp. 40–45.
- [4] 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. 01, Pp. 23–32, 2020, Doi: 10.31358/Techne.V19i01.220.
- [5] M. I. R. Jamaludin Purba, Aep Saepul Uyun, Didik Sugiyanto, "Perancangan Prototipe Alat Pembersih Panel Surya," Vol. 7, No. 1, Pp. 1–8.
- [6] A. Bantu, G. Oli, T. Otomatis, A. Transmission, And O. Change, "(Journal Of Industrial And Manufacture Engineering)," Vol. 7, No. 1, Pp. 134–146, 2023.
- [7] F. P. Beer, *Mechanics Of Materials*.
- [8] L. G. K. J.L. Meriam, "Engineering Mechanics Statics".
- [9] M. S. Prof. Dr. Drs. Agus Edy Pramono, S.T., "Elemen Mesin I," No. September, 2021.
- [10] T. T. Franky Tombokan, "Identifikasi Dan Pengukuran Debit Aliran Sungai Sario Franky," Vol. 3, No. July, Pp. 146–155, 2021.
- [11] D. Yolarinda, A. M. Sakti, A. Natara, F. Ganda, And D. Riandadari, "Analisis Perbandingan Diameter Pulley Pada Mesin Pompa Air Dengan Menggunakan Bahan Bakar Gas Terhadap Kapasitas Debit Air," Vol. Xx, No. Xx, 2024.
- [12] N. A. Puspitasari And M. P. Nugraha, "Simulasi Stress Analysis Pembebanan Statis Dengan Bantuan Software Solidworks Pada Hasil Perancangan Ladder Frame Chassis Mobil Listrik Menggunakan Material Aisi 4340," No. November, Pp. 25–33, 2021.
- [13] S. D. Bagja Brilliand Tenggara, "Jurnal Mesin Material Manufaktur Dan Energi Analisa Tegangan Von Mises Stress , Deformation , Dan Safety Factor," Vol. 6, No. 1, Pp. 292–297, 2026.