Optimasi Performa Daya Hisap Dan Waktu Perakitan Berbasis Metode DFMA: Studi Kasus Pada Vacuum Cleaner XYZ

Annisya Faradilla Aurora[1], Nur Hadi Hazami[2], Muhammad Akmal[3], Ezra Maldini Hardiansyah[4], Rangga Ivan Saputro[5]

[1] Program Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Jakarta, Jl. Prof. G. A. Siwabessy, Kampus UI, Depok, 16425, Indonesia

annisya.faradilla.aurora.tm23@stu.pnj.ac.id

Abstract

This study discusses the reverse engineering process carried out on XYZ *portable vacuum cleaners*. The decrease in suction performance of the tool is the main goal of *Reverse Engineering* and improving suction performance and design efficiency through the *Design for Manufacture and Assembly* (DFMA) method is the main focus of the research. The cause of the decline in performance comes from the usage factor and the absence *of a Battery Management System* (BMS) module. The *reverse engineering* process includes several steps, such as systematically disassembling the tool, identifying components, measuring dimensions, analyzing materials, and recreating engineering drawings using CAD. After that, measurable modifications are made. The battery is replaced and equipped with a BMS module. The impeller cover is redesigned using a *snap-fit mechanism,* and *the filter seal* is integrated with a HEPA filter. After modification, the test results were carried out 30 times, to ensure the validity of the data, and the difference in performance was verified by the t-test ($\alpha = 0.05$). The test results showed that the average airflow speed increased from 9.73 m/s to 17.45 m/s (79.3%), the suction capacity from 0.3503 m^3/s to 0.6282 m^3/s (79.3%), and the suction power from 0.017 W to 0.097 W (476.3%); All of the increases were statistically significant ($p < 0.05$). DFMA's analysis showed that the number of components decreased from 15 to 14, assembly time decreased from 87.46 s to 74.96 s, assembly costs from Rp 1,313 to Rp 1,125, and DFA efficiency increased from 41.4% to 47.7%. These results prove that the integration of *reverse engineering* and DFMA is an effective and data-driven strategy to improve the functional performance as well as the manufacturing efficiency *of portable vacuum cleaners*.

Keywords: *Reverse Engineering, Vacuum Cleaner, DFMA, DFA, Daya Hisap, BMS*

Abstrak

Penelitian ini membahas tentang proses reverse engineering yang dilakukan pada *vacuum cleaner portable* XYZ. Menurunnya performa hisap dari alat tersebut menjadi tujuan utama dilakukannya *Reverse Engineering* dan peningkatan performa hisap serta efisiensi desain melalui metode *Design for Manufacture and Assembly* (DFMA) menjadi fokus utama dalam penelitian. Penyebab menurunnya performa berasal dari faktor penggunaan dan tidak adanya modul *Battery Management System* (BMS). Proses *reverse engineering* meliputi beberapa langkah, seperti membongkar alat secara sistematis, mengidentifikasi komponen, pengukuran dimensi, menganalisis material, dan membuat ulang gambar teknik menggunakan CAD. Setelah itu dilakukan modifikasi yang terukur. Baterai diganti dan dilengkapi dengan modul BMS. Penutup impeller didesain ulang menggunakan mekanisme *snap-fit,* dan *seal filter* diintegrasikan dengan *filter* HEPA. Setelah dimodifikasi, hasil pengujian yang dilakukan sebanyak 30 kali pengulangan, untuk menjamin validitas data, dan perbedaan performa diverifikasi dengan uji-t ($\alpha = 0,05$). Hasil pengujian menunjukkan kecepatan rata-rata aliran udara meningkat dari 9,73 m/s menjadi 17,45 m/s (79,3%), kapasitas hisap dari 0,3503 m^3/s menjadi 0,6282 m^3/s (79,3%), dan daya hisap dari 0,017 W menjadi 0,097 W (476,3%); seluruh peningkatan signifikan secara statistik ($p < 0,05$). Analisis DFMA menunjukkan jumlah komponen berkurang dari 15 menjadi 14, waktu perakitan turun dari 87,46 s menjadi 74,96 s, biaya

perakitan dari Rp 1.313 menjadi Rp 1.125, serta efisiensi DFA meningkat dari 41,4% menjadi 47,7%. Hasil ini membuktikan bahwa integrasi *reverse engineering* dan DFMA merupakan strategi efektif dan berbasis data untuk meningkatkan performa fungsional sekaligus efisiensi manufaktur *vacuum cleaner portable*.

Kata Kunci: *Reverse Engineering, Vacuum Cleaner, DFMA, DFA,* Daya Hisap*, BMS*

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi peralatan rumah tangga mengalami kemajuan yang sangat pesat dalam beberapa dekade terakhir. Salah satu contoh perkembangannya adalah *Vacuum cleaner*, terutama jenis *portable* atau *handheld* (genggam), yang kini telah menjadi pilihan utama bagi banyak orang karena sifatnya yang praktis, ringan, dan tidak memerlukan kabel listrik[1]. Alat ini bekerja berdasarkan prinsip perbedaan tekanan udara. Cara kerjanya adalah dengan menggunakan kipas (*fan*) yang digerakkan oleh motor listrik. Kipas ini menghasilkan aliran udara yang menyebabkan tekanan di dalam alat lebih rendah dibandingkan tekanan atmosfer di luar, sehingga udara beserta partikel debu dan kotoran terhisap masuk ke dalam alat melalui saluran masuk[3].

Dalam penggunaan sehari-hari, *vacuum cleaner portable* sering mengalami penurunan performa yang terjadi akibat kerusakan pada komponen-komponen penting, terutama pada sistem kelistrikan. Salah satu permasalahan yang umum dijumpai adalah tidak adanya sistem modul *Battery Management System* (BMS) pada rangkaian kontroler, yang dapat menyebabkan tegangan *output* baterai tidak stabil sehingga kecepatan putar motor tidak dapat stabil selama penggunaan[4][5]. Kondisi ini berdampak langsung pada penurunan kapasitas hisap (Q) dan daya hisap (P) alat.

Reverse engineering adalah cara yang terstruktur untuk mempelajari dan menganalisis suatu produk untuk memahami bagaimana cara kerjanya, bagian-bagian yang menyusunnya, serta prinsip desain yang digunakan oleh pembuatnya. *Reverse engineering* dapat membantu dalam memahami cara kerja suatu produk secara detail, sehingga dapat menjadi rujukan belajar dari desain dan teknologi yang telah ada dan digunakan di luar sana[6][7][8]. Dengan cara ini juga, kelemahan desain suatu produk dapat diidentifikasi secara sistematis dan menjadi dasar perbaikan yang berbasis data teknis. Di sisi lain, metode *Design for Manufacture and Assembly* (DFMA) yang dikembangkan oleh Boothroyd dan Dewhurst memberikan kerangka evaluasi kuantitatif untuk menilai seberapa efisien proses perakitan suatu produk. Tujuan utama dari metode DFMA adalah mengurangi jumlah komponen, waktu, dan biaya perakitan tanpa mengorbankan fungsi utama produk tersebut[9][10][11].

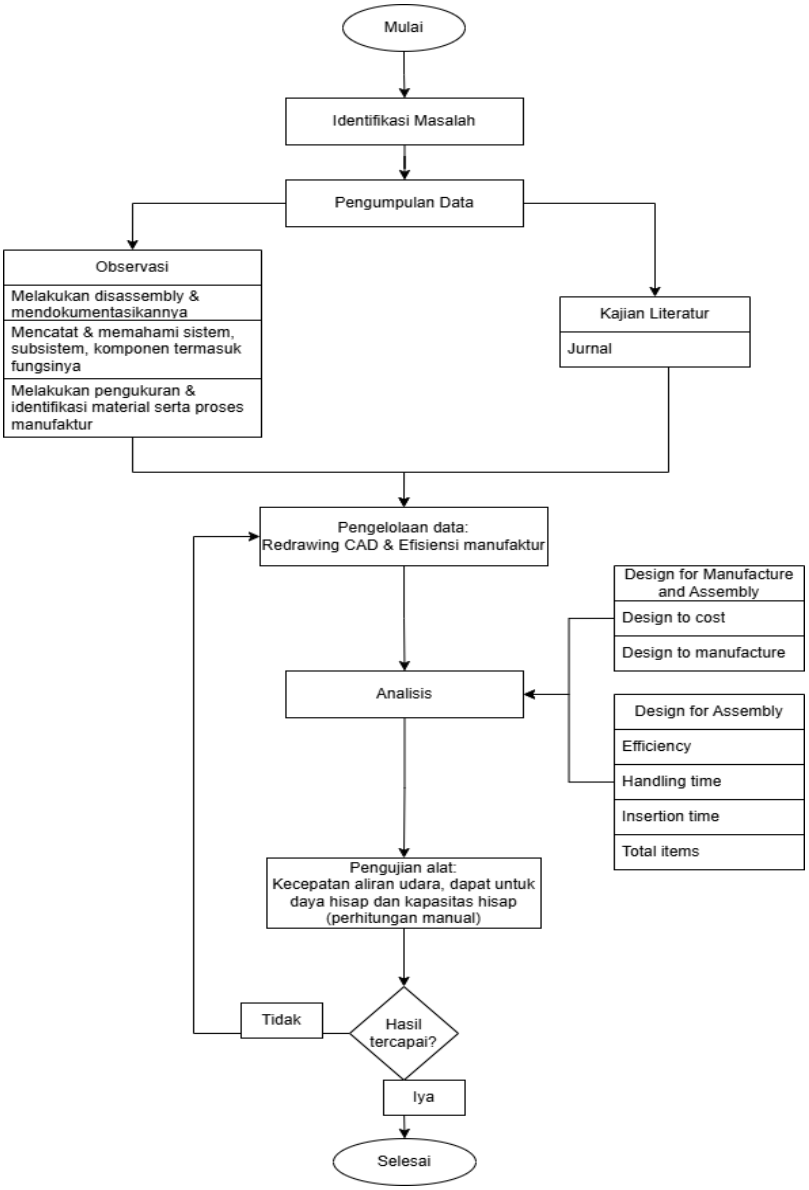
Dalam praktiknya, *reverse engineering* sering memanfaatkan teknologi pemindaian tiga dimensi (*3D scanning*) untuk merekonstruksi geometri komponen secara cepat dan akurat[12][13]. Namun, pendekatan tersebut memerlukan perangkat khusus yang tidak selalu tersedia, sehingga pada penelitian ini akuisisi geometri dilakukan melalui pengukuran manual yang lebih terjangkau.

Meskipun *reverse engineering* dan DFMA telah banyak diterapkan, umumnya digunakan secara terpisah: *reverse engineering* untuk rekonstruksi geometri dan pemahaman desain produk, sedangkan DFMA untuk optimasi proses perakitan. Studi yang mengintegrasikan *Reverse Engineering* dan DFMA pada produk elektronik rumah tangga skala kecil masih terbatas, khususnya pendekatan yang sekaligus menelusuri akar masalah pada sistem kelistrikan (ketiadaan BMS) dan menyederhanakan desain perakitan dalam satu kerangka kerja[7]. Selain itu, sebagian besar studi terdahulu belum disertai validasi statistik atas peningkatan performa yang dilaporkan. Celah inilah yang menjadi fokus pada penelitian ini.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menganalisis peningkatan kinerja *vacuum cleaner portable* XYZ melalui pendekatan *reverse engineering*. Pendekatan ini mencakup modifikasi sistem kelistrikan dengan menambahkan modul BMS dan mengganti baterai dengan kapasitas yang lebih tinggi. Selain itu, dilakukan juga penyederhanaan desain perakitan menggunakan metode DFMA yang meliputi pengurangan dan penggabungan komponen. Tujuannya adalah untuk meningkatkan efisiensi waktu perakitan, mengurangi biaya perakitan, dan membuat produk lebih optimal baik dari segi fungsional maupun kemampuan manufakturnya.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode *Reverse Engineering* dan prinsip *Design for Manufacture and Assembly* (DFMA). Penelitian ini dilakukan pada sebuah unit *vacuum cleaner portable* tipe *handheld* merek XYZ yang mengalami penurunan performa. Untuk melakukan penelitian ini, disusun secara sistematis dalam delapan tahapan.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Tahap awal diawali dengan studi literatur yang bertujuan membangun landasan teori yang kuat. Kajian ini mencakup prinsip kerja *vacuum cleaner portable*, konsep dasar *reverse engineering*, serta metodologi DFMA (*Design for Manufacturing and Assembly*) Boothroyd-Dewhurst. Selain itu, ditelaah pula sejumlah jurnal ilmiah dan paten terkini, khususnya yang berkaitan dengan desain *vacuum cleaner*, sebagai acuan dalam menganalisis dan mengembangkan rancangan.

Setelah landasan teori terbentuk, dilakukan tahap pembongkaran (*disassembly*) dan identifikasi komponen secara sistematis dan terdokumentasi. Setiap komponen yang dilepas diberi label, difoto, serta dicatat posisi asalnya untuk menjaga ketertelusuran. Dari proses ini berhasil diidentifikasi sejumlah komponen, yaitu bodi *casing* kanan dan kiri, motor DC 12V, impeller sentrifugal, *cover* impeller, modul vakum 4V, dua sel baterai Li-ion 18650, kabel penghubung, saklar (*switch*), PCB kontroler, filter HEPA, *seal filter*, serta *dust container*. Seluruh komponen tersebut kemudian didokumentasikan dalam bentuk *Bill of Materials* (BOM).

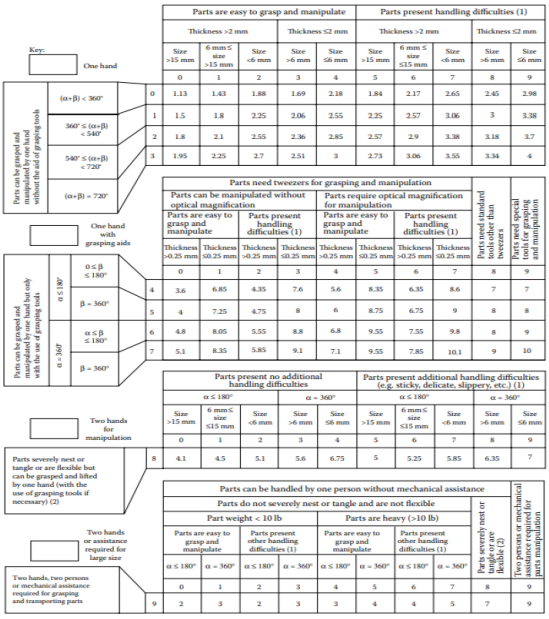
Tahap berikutnya adalah pengukuran dimensi dan analisis material. Pengukuran dilakukan menggunakan jangka sorong dengan ketelitian 0,02 mm untuk komponen berdimensi kecil dan penggaris baja dengan ketelitian 0,5 mm untuk komponen yang lebih besar, sementara kecepatan aliran udara pada *inlet* diukur menggunakan anemometer digital (rentang 0-30 m/s; resolusi 0,1 m/s). Parameter dimensi yang diukur meliputi panjang, lebar, tinggi, diameter, ketebalan dinding, dan sudut kemiringan. Adapun analisis material dilakukan melalui pengamatan visual terhadap warna, tekstur, dan fleksibilitas tiap komponen[14].

Berdasarkan data dimensi yang diperoleh, dilakukan penggambaran ulang (*redrawing*) CAD menggunakan perangkat lunak *Computer-Aided Design*. Setiap komponen digambar dalam minimal tiga tampak ortogonal (depan, atas, dan samping), serta dilengkapi tampak isometrik untuk komponen dengan geometri kompleks guna mempermudah pemahaman terhadap bentuknya[14][8].

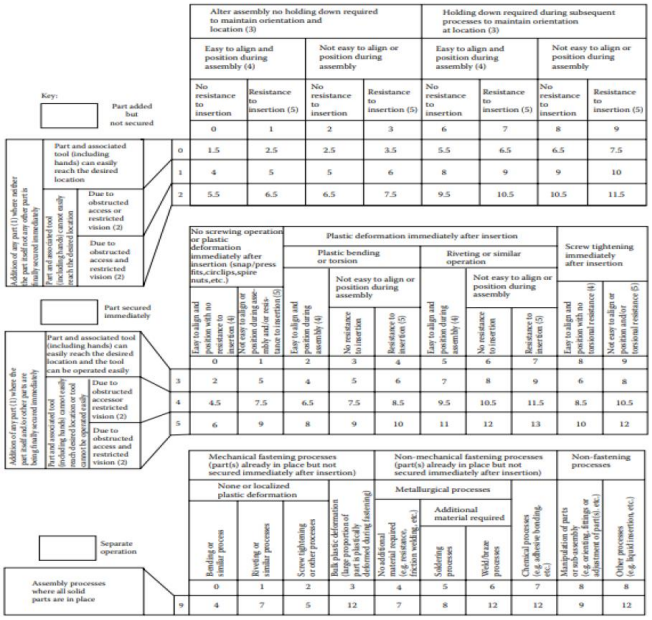
Selanjutnya dilakukan analisis DFMA dan identifikasi kelemahan. Analisis *Design for Assembly* (DFA) menggunakan metode Boothroyd-Dewhurst dengan menghitung waktu penanganan (*handling time*) dan waktu pemasangan (*insertion time*) untuk setiap komponen. Efisiensi perakitan dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$E_{ma} = \frac{3 \times N_{min}}{T_{ma}}$$

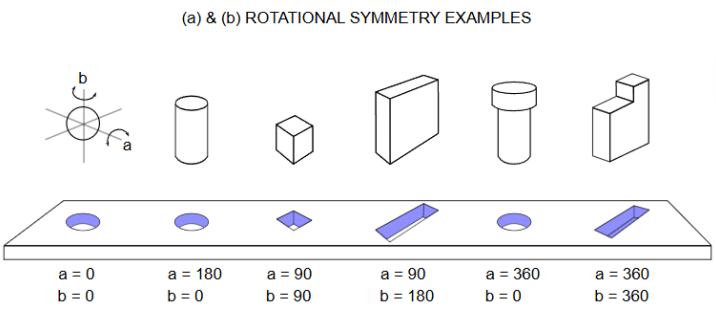
di mana N_{min}adalah jumlah komponen minimum teoritis, angka 3 merupakan waktu perakitan dasar per komponen (detik), dan T_{ma}adalah total waktu perakitan aktual (detik)[9]. Suatu komponen dikategorikan sebagai komponen minimum apabila memenuhi minimal satu dari tiga kriteria Boothroyd-Dewhurst, yaitu: (1) memiliki pergerakan relatif terhadap komponen lain; (2) terbuat dari material yang berbeda atau perlu diisolasi; atau (3) tidak dapat dipisahkan dari rakitan[9]. Acuan estimasi waktu pada tahap ini mengikuti tabel standar simetri putar (Gambar 4), *Manual Handling Estimated Times* (Gambar 2), dan *Manual Insertion Estimated Times* (Gambar 3).



Gambar 2. Manual Handling Estimated Times



Gambar 3. Manual Insertion Estimated Times



Gambar 4. Contoh Simetri Putar

Untuk mengevaluasi performa, dilakukan pengujian daya hisap sebelum dan sesudah modifikasi dengan metode yang sama agar konsistensi data tetap terjaga[15]. Kecepatan aliran udara (v) diukur menggunakan anemometer digital tipe AS816+ yang memiliki rentang pengukuran 0–30 m/s, resolusi 0,1 m/s, dengan interval pencatatan setiap 30 detik pada lubang *inlet*. Kapasitas hisap (Q) dihitung menggunakan persamaan:

$$Q = v \times A$$

sedangkan daya hisap (P) dihitung melalui persamaan:

$$P = \rho \cdot g \cdot h \cdot Q$$

dengan ρ sebagai massa jenis udara (1,2 kg/m³), g sebagai percepatan gravitasi (9,81 m/s²), dan h sebagai *head* tekanan[3][16]. Diameter pipa *inlet* yang digunakan sebesar 0,04 m sehingga luas penampangnya A = 0,001018 m². Setiap kondisi pengujian dilakukan sebanyak 30 kali pengulangan, dan ketidakpastian baku rata-rata pengukuran dihitung menggunakan persamaan:

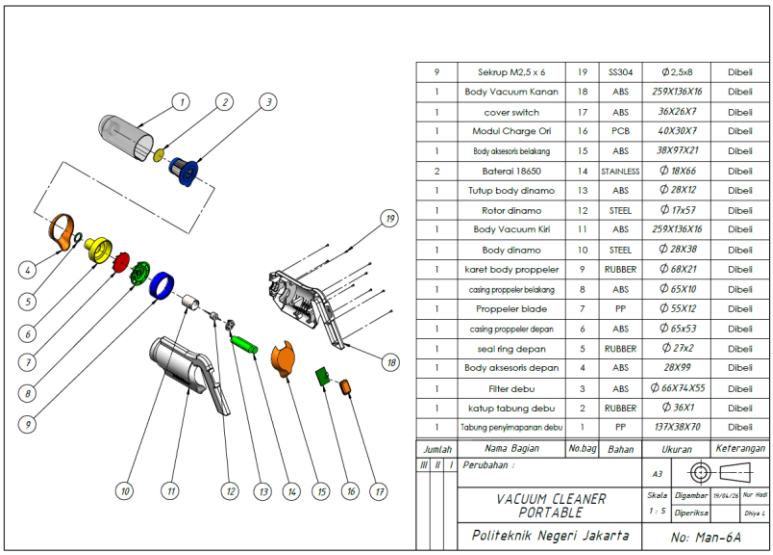
$$u_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}}$$

dengan s sebagai simpangan baku, yang kemudian dirambatkan ke nilai Q dan P[17][18]. Untuk menguji signifikansi perbedaan performa sebelum dan sesudah modifikasi, digunakan uji-t dua sampel independen terhadap data kecepatan aliran udara pada taraf signifikansi $\alpha = 0,05$, di mana perbedaan dinyatakan signifikan apabila $p < 0,05$[19][20].

Tahap akhir berupa modifikasi dan verifikasi, yang dirancang berdasarkan hasil identifikasi kelemahan pada tahap sebelumnya. Modifikasi dikelompokkan ke dalam dua bagian, yaitu: (1) perbaikan sistem kelistrikan melalui penggantian baterai dan penambahan modul BMS (*Battery Management System*); serta (2) perbaikan desain *assembly* melalui redesain *cover* impeller dengan sistem *snap-fit* dan integrasi *seal filter* dengan filter HEPA. Pengujian pasca-modifikasi kemudian dilakukan menggunakan metode yang sama untuk memverifikasi efektivitas perbaikan yang telah diterapkan.

3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

3.1. Disassembly dan Identifikasi Komponen



9	Sekrup M2,5 x 6	19	SS304	Ø 2,5x8	Dibeli
1	Body Vacuum Kanan	18	ABS	259X136X16	Dibeli
1	cover switch	17	ABS	36X26X7	Dibeli
1	Modul Charge Ori	16	PCB	40X30X7	Dibeli
1	Body aksesoris belakang	15	ABS	38X97X21	Dibeli
2	Baterai 18650	14	STAINLESS	Ø 18X66	Dibeli
1	Tutup body dinamo	13	ABS	Ø 28X12	Dibeli
1	Rotor dinamo	12	STEEL	Ø 17x57	Dibeli
1	Body Vacuum Kiri	11	ABS	259X136X16	Dibeli
1	Body dinamo	10	STEEL	Ø 28X38	Dibeli
1	karet body proppeler	9	RUBBER	Ø 68X21	Dibeli
1	casing proppeler belakang	8	ABS	Ø 65X10	Dibeli
1	Proppeler blade	7	PP	Ø 55X12	Dibeli
1	casing proppeler depan	6	ABS	Ø 65x53	Dibeli
1	seal ring depan	5	RUBBER	Ø 27x2	Dibeli
1	Body aksesoris depan	4	ABS	28X99	Dibeli
1	Filter debu	3	ABS	Ø 66X74.X55	Dibeli
1	katup tabung debu	2	RUBBER	Ø 36X1	Dibeli
1	Tabung penyimpanan debu	1	PP	137X38X70	Dibeli

Jumlah	Nama Bagian	No.bag	Bahan	Ukuran	Keterangan
III II I	Perubahan :			A3	
	VACUUM CLEANER PORTABLE			Skala 1 : 5	Digambar / Diperiksa
	Politeknik Negeri Jakarta			No: Man-6A	

Gambar 5. *Redesign Vacuum Cleaner Portable* XYZ Sebelum *Reverse Engineering*

Tabel 1. *Bill Of Material*

No. Item	Deskripsi	Qty.
1	Dinamo motor 12v	1
2	Impeller	1
3	Baterai 18650	2
4	Switch On/Off	1
5	HEPA Filter	1
6	Tabung Penyimpanan Debu	1
7	Seal Filter	1
8	Cover Depan Aksesoris	1
9	Cover Belakang Aksesoris	1
10	Rumah Dinamo	1
11	Modul Vakum 7,4V	1

12	Cover Body Kanan	1
13	Cover Body Kiri	1
14	Cover Switch	1
15	Kabel	1
16	Cover Impeller	1
17	Katup Tabung	1

Hasil identifikasi menunjukkan *vacuum cleaner portable* XYZ terdiri dari 18 komponen utama. Bodi *casing* kanan dan kiri terbuat dari bahan ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) dengan warna putih. Ukuran bodi *casing* ini adalah panjang ±230 mm, lebar ±75 mm, dan tinggi ±80 mm serta ketebalan dinding rata-rata 2,5 mm. Motor DC memiliki diameter luar ±42 mm dan panjang ±55 mm. Impeller sentrifugal terbuat dari bahan polimer termoplastik, PP atau PA66. Memiliki diameter luar ±58 mm, diameter *inlet* ±22 mm, dan tinggi ±28 mm. Sistem baterai menggunakan dua buah sel Li-ion 18650 yang dihubungkan secara paralel dengan tegangan nominal 4V.

Gambar 6. *Vacuum Cleaner Portable* XYZ Setelah Proses Pembongkaran

3.2. Analisis Desain Awal (DFMA)

Analisis DFMA pada desain awal dilakukan terhadap 18 komponen dengan total waktu perakitan 94,19 detik. Beberapa komponen menunjukkan kode penanganan tinggi yang memerlukan penyesuaian posisi sebelum pemasangan, yaitu *Switch* On/Off dan Modul Vakum (kode 31) serta *Cover Switch* (kode 21), dengan waktu penanganan tertinggi mencapai 2,25 detik. Dari seluruh komponen, 13 di antaranya tergolong komponen minimum yang tidak dapat dihilangkan atau digabungkan menurut kriteria Boothroyd-Dewhurst, sedangkan lima komponen bernilai *minimum part* nol yaitu Tabung Penyimpan, *Cover* Depan Aksesoris, *Cover* Belakang Aksesoris, *Cover Switch*, dan *Cover Impeller* yang mengindikasikan adanya potensi penyederhanaan desain.

Pada analisis DFA untuk keseluruhan produk yang terdiri dari 15 komponen, diperoleh nilai efisiensi perakitan awal sebesar 41,4%, ini masih di bawah standar efisiensi yang ideal yaitu 50%. Total waktu perakitan tercatat sebesar 87,46 detik dengan biaya perakitan Rp. 1.313. Nilai efisiensi yang rendah ini menunjukkan bahwa desain awal masih memiliki banyak ruang perbaikan, terutama pada komponen-komponen non-kritis yang dapat disederhanakan atau diintegrasikan[21].

Tabel 2. Analisis Desain Awal *Control Assembly*

Komponen		Analisis Handling			Analisis Insersi		Hasil	
Nama Item	Jml	Kode Handling	Waktu Handling (s)	Min. Part	Kode Insersi	Waktu Insersi (s)	Total Op. (s)	Deskripsi
Dinamo motor 12v	1	0	1,13	1	50	6	7,13	Seat motor into internal housing
Impeller	1	0	1,13	1	50	6	7,13	Press-fit impeller onto motor shaft
Baterai 18650	2	0	1,13	1	16	8	9,13	Install batteries into compartment
Switch On/Off	1	31	2,25	1	0	1,5	3,75	Snap-fit switch into control panel
HEPA Filter	1	0	1,5	1	8	8	9,5	Insert filter into retainer frame
Tabung Penyimpan	1	0	1,13	0	0	1,5	2,63	Position dust canister onto main unit
Seal Filter	1	0	1,13	0	16	8	9,13	Add and set rubber seal around filter
Cover Depan Acc	1	30	1,95	1	0	1,5	3,45	Add and align front accessory cover
Cover Belakang Ac	1	30	1,95	1	0	1,5	3,45	Add and align rear accessory cover
Rumah Dinamo	1	0	1,13	0	30	2	3,13	Secure motor housing cover
Modul Vakum 7,4V	1	31	2,25	1	50	6	8,25	Place PCB module onto mounting posts
Cover Body Kanan	1	30	1,95	1	0	1,5	3,45	Add and snap-fit right main housing
Cover Body Kiri	1	30	1,95	1	0	1,5	3,45	Add and snap-fit left main housing
Cover Switch	1	21	2,1	0	0	1,5	3,6	Add switch button/actuator cover
Kabel	1	2	1,88	1	50	6	7,88	Route and connect internal wiring
Cover Impeller	1	10	1,5	0	40	4,5	6	Secure impeller protective shroud (perlu dipegang saat pasang)
Katup Tabung	1	0	1,13	0	30	2	3,13	Insert flap valve into inlet port
TOTAL	18	—	—	13	—	—	94,19	DFA Efficiency = (13 × 3) / 94,19 = 41,4%

Tabel 3. *Design For Assembly* (Sebelum)

Komponen		Kriteria Min. Part		Hasil	
Nama Item	No.	Theoretical Part Time	Keterangan	Assembly Time (s)	Assembly Cost (Rp)
Dinamo motor 12v	1	1	Bergerak relatif terhadap part lain	7,13	107
Impeller	1	1	Bergerak relatif, harus berbeda material	7,13	107
Cover Impeller	1	0	Dapat digabung, tapi butuh dipegang saat pasang	6	90
Baterai 18650	2	1	Perlu diganti, beda material dengan housing	9,13	137
Switch On/Off	1	0	Dapat diintegrasikan ke housing	3,75	56
HEPA Filter	1	0	Dapat diintegrasikan ke tabung	9,5	143
Seal Filter	1	0	Dapat digabung ke HEPA Filter	9,13	137
Tabung Penyimpanan Debu	1	0	Dapat diintegrasikan ke body utama	2,63	39
Cover Depan Aksesoris	1	0	Dapat digabung ke cover body	3,45	52
Cover Belakang Aksesoris	1	0	Dapat digabung ke cover body	3,45	52
Modul Vakum 7,4V	1	1	Komponen elektronik mandiri, wajib terpisah	8,25	124
Cover Body Kanan	1	1	Struktur utama, tidak bisa digabung	3,45	52
Cover Body Kiri	1	1	Struktur utama, tidak bisa digabung	3,45	52
Kabel	1	1	Wajib terpisah (fleksibel, beda material)	7,88	118
Katup Tabung	1	0	Dapat diintegrasikan ke tabung	3,13	47
TOTAL — Desain Awal	15	7	Nm = 7 part minimum teoritis	87,46	1.313

3.3. Pengujian Daya Hisap Sebelum Modifikasi

Pengujian awal dilakukan sebanyak 30 kali pada kondisi *filter* bersih dan baterai terisi penuh untuk memperoleh data performa *vacuum cleaner* dalam kondisi aslinya, di mana baterai belum dilengkapi BMS sehingga tegangan *output* tidak stabil. Hasil pengujian menunjukkan rata-rata kecepatan aliran udara sebesar 9,73 m/s (rentang 8,9–10,3 m/s) tergolong rendah untuk *vacuum cleaner portable* yang umumnya berada di atas 15 m/s [15][22]. Dengan luas penampang *inlet* A = 0,001018 m², diperoleh kapasitas hisap rata-rata Q = 0,3503 m³/s dan daya hisap rata-rata 0,017 Watt; nilai yang sangat rendah ini mengindikasikan defisiensi pada sistem kelistrikan[4]. Ketidakstabilan suplai tegangan akibat tidak adanya BMS menjadi penyebab utama RPM motor tidak terjaga pada nilai nominalnya, sehingga berdampak langsung pada penurunan kapasitas dan daya hisap[3].

3.4. Identifikasi Kelemahan dan Modifikasi

Berdasarkan analisis performa awal dan DFMA, ditemukan dua kelompok kelemahan utama. Pada sistem kelistrikan: (1) tidak adanya modul BMS sehingga tegangan *drop* signifikan di bawah beban; (2) kapasitas baterai rendah yang memperpendek durasi operasional efektif;

dan (3) tidak adanya proteksi *over-discharge* yang berpotensi memperpendek umur siklus baterai[23]. Pada sistem mekanik dan assembly*: (1)* cover impeller *menggunakan pengikatan konvensional yang memperlambat perakitan; (2)* seal filter *dan HEPA* filter *dirancang terpisah padahal dapat diintegrasikan; serta (3) beberapa komponen non-kritis seperti* cover aksesoris masih dipisahkan dari bodi utama.

Menanggapi temuan tersebut, dilakukan dua tindakan modifikasi utama. Pertama, pada aspek kelistrikan, baterai diganti dengan unit berkapasitas lebih tinggi dan ditambahkan modul BMS untuk menstabilkan tegangan *output* ke motor sejalan dengan konsep *portable power module* pada paten Philips (CN 216060342 U) yang mengintegrasikan rangkaian kontrol elektronik untuk menjaga performa optimal[24]. Kedua, pada aspek desain *assembly*, *cover* impeller diredesain dengan sistem *snap-fit* agar pemasangan tanpa alat bantu, serta *seal filter* diintegrasikan dengan HEPA *filter* menjadi satu unit sehingga jumlah part berkurang dari 15 menjadi 14 komponen[25].

(a) **(b)**

Gambar 7. Sistem Baterai Sebelum & Setelah Modifikasi (Dengan BMS)

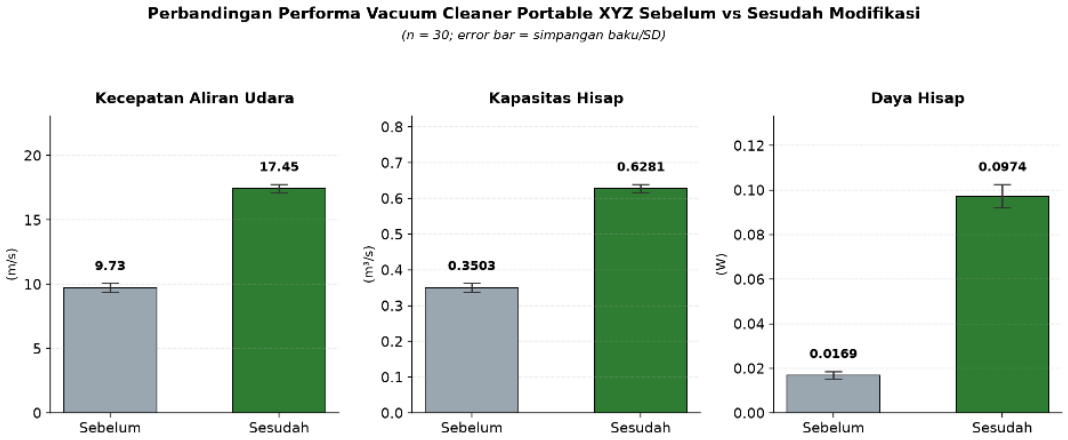
3.5. Hasil Pengujian Setelah Modifikasi

Pengujian performa vacuum cleaner portable XYZ dilakukan sebanyak 30 ulangan pada masing-masing kondisi (sebelum dan sesudah modifikasi) untuk tiga parameter utama, yaitu kecepatan aliran udara, kapasitas hisap, dan daya hisap. Hasil pengujian menunjukkan adanya peningkatan performa yang konsisten pada seluruh parameter setelah dilakukan modifikasi melalui penerapan *reverse engineering* dan penambahan modul *Battery Management System* (BMS). Kecepatan aliran udara meningkat dari rata-rata 9,73 m/s menjadi 17,45 m/s (+79,3%), kapasitas hisap meningkat dari 0,3503 m^3/s menjadi 0,6281 m^3/s (+79,3%), dan daya hisap meningkat dari 0,0169 W menjadi 0,0974 W (±476%). Rangkuman hasil pengujian beserta uji signifikansinya disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan performa sebelum vs sesudah modifikasi (mean ± SD, n = 30)

Parameter	Sebelum (mean ± SD)	Sesudah (mean ± SD)	Peningkatan	t	p-value
Kecepatan aliran udara (m/s)	9,73 ± 0,34	17,45 ± 0,31	79,30%	92,5	< 0,001
Kapasitas hisap (m^3/s)	0,3503 ± 0,0121	0,6281 ± 0,0111	79,30%	92,5	< 0,001
Daya hisap (W)	0,0169 ± 0,0017	0,0974 ± 0,0052	±476%	81	< 0,001

Secara visual, perbandingan performa pada ketiga parameter ditampilkan pada Gambar 8. Grafik tersebut memperlihatkan perbedaan nilai rata-rata yang mencolok antara kondisi sebelum dan sesudah modifikasi, dengan *error bar* yang relatif pendek pada seluruh parameter sehingga menggambarkan sebaran data yang sempit dan pengukuran yang konsisten.

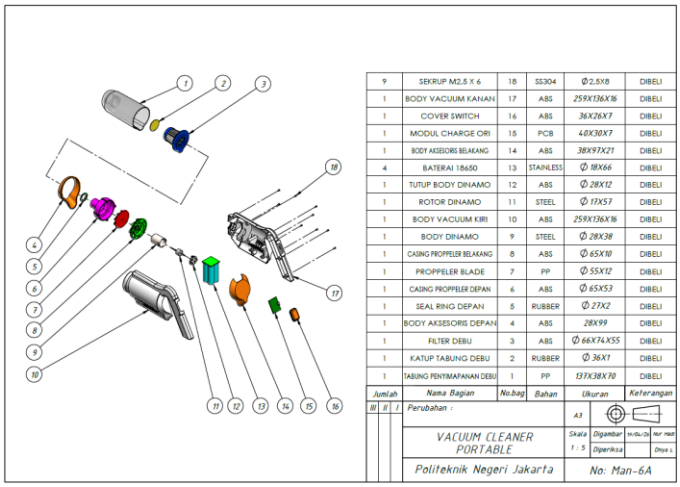


Gambar 8. Perbandingan performa vacuum cleaner portable XYZ sebelum dan sesudah modifikasi (n = 30; error bar menunjukkan simpangan baku)

Untuk memastikan bahwa peningkatan tersebut bukan akibat variasi acak, dilakukan uji-t dua sampel independen (*Welch's t-test*) dengan taraf signifikansi $\alpha = 0{,}05$. Hasil uji-t menunjukkan bahwa peningkatan pada ketiga parameter performa signifikan secara statistik ($p < 0{,}001$), dengan nilai t masing-masing 92,5 (kecepatan aliran udara), 92,5 (kapasitas hisap), dan 81,0 (daya hisap). Simpangan baku yang kecil (SD kecepatan $\leq 0{,}34$ m/s pada kedua kondisi) menunjukkan konsistensi pengukuran yang tinggi sepanjang 30 ulangan, sekaligus mengonfirmasi bahwa penambahan modul BMS berhasil menstabilkan suplai tegangan ke motor[26].

Tingkat presisi data juga tergolong tinggi, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai ketidakpastian baku rata-rata ($u = s/\sqrt{n}$) yang kecil pada seluruh parameter. Pada parameter kecepatan aliran udara, nilai ketidakpastian sebesar ±0,061 m/s (sebelum) dan ±0,057 m/s (sesudah); pada kapasitas hisap sebesar ±0,0022 m^3/s (sebelum) dan ±0,0020 m^3/s (sesudah); serta pada daya hisap sebesar ±0,0003 W (sebelum) dan ±0,0009 W (sesudah). Nilai ketidakpastian yang kecil ini memperkuat keandalan data dan menunjukkan bahwa hasil pengukuran dapat dianggap representatif terhadap kondisi sebenarnya.

Peningkatan daya hisap yang sangat besar (±476%) dapat dijelaskan melalui hubungan teoretis antara daya dan kecepatan aliran udara. Daya hisap berbanding lurus dengan pangkat tiga dari kecepatan aliran udara ($P propto v^3$), sehingga peningkatan kecepatan sebesar 79,3% (faktor 1,793) menghasilkan peningkatan daya sebesar $1{,}793^3 = 5{,}76$kali, atau setara dengan kenaikan sekitar 476%. Hubungan ini sejalan dengan hasil pengukuran dan menegaskan bahwa perbaikan pada aspek kecepatan aliran udara memberikan dampak paling besar terhadap peningkatan daya hisap. Dengan demikian, modifikasi yang dilakukan terbukti efektif meningkatkan performa vacuum cleaner portable XYZ, baik secara statistik maupun secara teknis.



Gambar 9. *Redesign Vacuum Cleaner Portable* XYZ Setelah Modifikasi dan Pengujian

3.6. Hasil Analisis DFMA Setelah Modifikasi

Penerapan modifikasi desain *assembly* menghasilkan perubahan yang terukur pada seluruh parameter DFMA. Dengan menggabungkan *seal filter* dengan HEPA filter dan penerapan sistem *snap-fit* pada *cover impeller* berhasil mengurangi jumlah komponen dari 15 menjadi 14 komponen. Meskipun hanya ada pengurangan satu komponen, dapat mempengaruhi efisiensi proses perakitan yang cukup berarti.

Tabel 5. Analisis *Redesign Controller Assembly*

Komponen		Analisis Handling			Analisis Insersi		Hasil	
Nama Item	Jml	Kode Handling	Waktu Handling (s)	Min. Part	Kode Insersi	Waktu Insersi (s)	Total Op. (s)	Ket.
Dinamo motor 12v	1	0	1,13	1	50	6	7,13	Seat motor into internal housing
Impeller	1	0	1,13	1	50	6	7,13	Press-fit impeller onto motor shaft
Baterai 18650	2	0	1,13	1	16	8	9,13	Install batteries into compartment
Switch On/Off	1	31	2,25	1	0	1,5	3,75	Snap-fit switch into control panel
HEPA Filter + SEAL TERINTEGRASI	1	0	1,5	1	8	8	9,5	Insert filter into retainer frame
Tabung Penyimpanan Debu	1	0	1,13	0	0	1,5	2,63	Add and set rubber seal around filter
Cover Depan Aksesoris	1	30	1,95	1	0	1,5	3,45	Add and align front accessory cover
Cover Belakang Aksesoris	1	30	1,95	1	0	1,5	3,45	Add and align rear accessory cover
Rumah Dinamo	1	0	1,13	0	30	2	3,13	Secure motor housing cover
Modul Vakum 7,4V	1	31	2,25	1	50	6	8,25	Place PCB module onto mounting posts
Cover Body Kanan	1	30	1,95	1	0	1,5	3,45	Add and snap-fit right main housing
Cover Body Kiri	1	30	1,95	1	0	1,5	3,45	Add and snap-fit left main housing
Cover Switch	1	21	2,1	0	0	1,5	3,6	Add switch button/actuator cover
Kabel	1	2	1,88	1	50	6	7,88	Route and connect internal wiring
Cover Impeller SNAP-FIT	1	0	1,13	0	0	1,5	2,63	Secure impeller snap-fit protective shroud
Katup Tabung	1	0	1,13	0	30	2	3,13	Insert flap valve into inlet port
TOTAL — Desain Final	17	—	—	13	—	—	**81,7**	DFA Eff = (13×3)/81,69 = **47,7%**

Tabel 6. *Design For Assembly* (Setelah)

Komponen		Kriteria Min. Part		Hasil	
Nama Item	No.	Theoretical Part Time	Keterangan	Assembly Time (s)	Assembly Cost (Rp)
Dinamo motor 12v	1	1	Bergerak relatif terhadap part lain	7,13	107
Impeller	1	1	Bergerak relatif, harus berbeda material	7,13	107
Cover Impeller SNAP-FIT	1	0	Material ringan, sekali klik	2,63	39
Baterai 18650	2	1	Perlu diganti, beda material dengan housing	9,13	137
Switch On/Off	1	0	Dapat diintegrasikan ke housing	3,75	56
HEPA Filter + SEAL	1	0	Seal sudah menyatu di frame filter dari pabrik	9,5	143
Tabung Penyimpanan Debu	1	0	Dapat diintegrasikan ke body utama	2,63	39
Cover Depan Aksesoris	1	0	Dapat digabung ke cover body	3,45	52
Cover Belakang Aksesoris	1	0	Dapat digabung ke cover body	3,45	52
Modul Vakum 7,4V	1	1	Komponen elektronik mandiri, wajib terpisah	8,25	124
Cover Body Kanan	1	1	Struktur utama, tidak bisa digabung	3,45	52
Cover Body Kiri	1	1	Struktur utama, tidak bisa digabung	3,45	52
Kabel	1	1	Wajib terpisah (fleksibel, beda material)	7,88	118
Katup Tabung	1	0	Dapat diintegrasikan ke tabung	3,13	47
TOTAL — Desain Final	14	7	Nm = 7; 1 part dieliminasi	74,96	1125

Tabel 7. Perbandingan Hasil DFMA Sebelum dan Setelah Modifikasi

Parameter	Sebelum Modifikasi	Setelah Modifikasi	Perubahan
Jumlah komponen	15	14	-1 komponen
Total waktu perakitan (detik)	87,46	74,96	-14,30%
Biaya perakitan (Rp)	1.313	1.125	-14,30%
Efisiensi DFA (%)	41,40%	47,70%	+6,3 poin

Waktu total perakitan turun dari 87,46 detik menjadi 74,96 detik, sekaligus menurunkan biaya perakitan dari Rp1.313 menjadi Rp1.125 (masing-masing turun ±14,3%). Efisiensi DFA meningkat dari 41,4% menjadi 47,7%, meski masih di bawah standar ideal 50%. Hal ini menunjukkan bahwa modifikasi berhasil meningkatkan efisiensi *assembly*, namun masih menyisakan ruang perbaikan desain lebih lanjut. Temuan ini sejalan dengan Ginting dan Silalahi[25] yang menekankan bahwa optimasi desain komponen melalui pendekatan DFA dapat meningkatkan efisiensi secara berarti meski tidak selalu mencapai kondisi ideal dalam satu iterasi modifikasi.

3.7. Pembahasan

Penelitian ini mempertegas bahwa kelemahan performa *vacuum cleaner portable* XYZ bersumber dari sistem kelistrikan terutama ketiadaan BMS bukan dari kerusakan komponen mekanik. Melalui pendekatan *reverse engineering* yang sistematis, akar masalah dapat ditemukan secara akurat sehingga modifikasi yang dilakukan tepat sasaran dan menghasilkan peningkatan performa yang signifikan.

Dibandingkan dengan *state of the art*, produk hasil modifikasi telah melampaui batas minimum performa kategori menengah pada parameter kecepatan aliran udara, namun masih berjarak cukup jauh dari produk premium yang menggunakan motor *brushless* DC berkecepatan tinggi, *cyclone separator*, dan *filter* HEPA multi-lapisan[27]. Karena itu, pengembangan ke depan dapat diarahkan pada area-area tersebut sebagaimana terdokumentasi dalam paten EP 4 039 153 B1 (Black & Decker) dan CN 216060342 U (Philips)[28][24].

Pada aspek *assembly*, efisiensi DFA sebesar 47,7% yang masih di bawah ambang ideal 50% menunjukkan perlunya iterasi desain lanjutan, antara lain penggabungan *cover* aksesori depan dan belakang dengan bodi utama, penyederhanaan mekanisme *snap-fit* pada bodi *casing*, serta pengurangan titik pengikatan internal. Dengan rekomendasi tersebut, efisiensi DFA diperkirakan dapat melampaui ambang 50% sebagai standar desain *assembly* yang baik[9].

4. KESIMPULAN

Penelitian *reverse engineering* terhadap *vacuum cleaner portable* XYZ ini berhasil mengidentifikasi penyebab utama penurunan performa alat, yaitu tidak adanya modul *Battery Management System* (BMS) pada sistem kelistrikan. Ketiadaan modul tersebut menyebabkan tegangan motor tidak stabil selama alat digunakan. Setelah dilakukan modifikasi berupa penggantian baterai berspesifikasi sama yang diintegrasikan dengan modul BMS, performa alat meningkat secara signifikan. Kecepatan aliran udara meningkat 79,3% (dari 9,73 m/s menjadi 17,45 m/s), kapasitas hisap meningkat 79,3% (dari 0,3503 m^3/s menjadi 0,6282 m^3/s), dan daya hisap meningkat 476,3% (dari 0,017 W menjadi 0,097 W).

Penerapan prinsip DFMA melalui redesain *cover impeller* dengan sistem *snap-fit* serta integrasi *seal filter* dengan HEPA *filter* berhasil mengurangi waktu perakitan sebesar 14,3% (dari 87,46 detik menjadi 74,96 detik) dan biaya perakitan sebesar 14,3% (dari Rp1.313 menjadi Rp1.125), serta meningkatkan efisiensi DFA dari 41,4% menjadi 47,7%. Dengan demikian, penelitian ini mengonfirmasi bahwa integrasi *reverse engineering* dan DFMA merupakan pendekatan yang efektif dan berbasis data untuk meningkatkan performa fungsional sekaligus efisiensi manufaktur *vacuum cleaner portable*.

Penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan: (1) hanya menggunakan satu unit sampel sehingga generalisasi antar-unit terbatas; (2) analisis material dilakukan secara visual dan belum melalui uji laboratorium (misalnya FTIR/DSC); (3) akuisisi geometri dilakukan melalui pengukuran manual (jangka sorong dan penggaris baja) yang memadai untuk geometri sederhana namun kurang optimal untuk komponen berkontur kompleks; serta (4) efisiensi DFA hasil modifikasi (47,7%) masih di bawah ambang ideal 50% karena baru dilakukan satu iterasi desain. Oleh karena itu, penelitian lanjutan disarankan mengkaji adopsi motor *brushless* DC, penerapan sistem *cyclone separator*, pemanfaatan teknologi 3D scanning yang terintegrasi dengan CAD untuk meningkatkan akurasi dan kecepatan rekonstruksi model [12][13], serta iterasi DFMA tambahan untuk melampaui ambang efisiensi 50%.

5. REFERENSI

[1] V. Subramaniam, B. Kumar, M. K, and M. G, “Design and Development of a Low Cost Handheld Vacuum Cleaner,” *Int. J. Trend Sci. Res. Dev.*, vol. 6, no. 7, pp. 639–644, 2022.

[2] A. Anwardi, Melfa Yola, Muhammad Ihsan Hamdy, and Asa Nurjannah, “Desain Gagang Penyedot Debu dalam Upaya Mengurangi Gangguan Musculoskeletal Disorder Pada Pembersih Sajadah,” *J. Rekayasa Ind.*, vol. 5, no. 2, pp. 85–98, 2023, doi: 10.37631/jri.v5i2.912.

[3] D. M. Nurlaili, Bela Veronika, Orizha Cantika, “Daya Hisap Vacum Cleaner Sederhana,” *J. Pendidik. Fis. dan Sains*, vol. 1, no. 1, pp. 24–26, 2018.

[4] S. Triwijaya and A. Pradipta, “Battery Management Optimization Considers The State Of Charge Using The Coulomb Counting Method,” *J. Geuthee Eng. Energy*, vol. 2, no. 1, pp. 01–07, 2023, doi: 10.52626/joge.v2i1.14.

[5] R. Suganya, L. M. I. L. Joseph, and S. Kollem, “Understanding lithium-ion battery management systems in electric vehicles: Environmental and health impacts, comparative study, and future trends: A review,” *Results Eng.*, vol. 24, no. September, p. 103047, 2024, doi: 10.1016/j.rineng.2024.103047.

[6] T. A. Dwinandana P., “Peran aktivitas reverse engineering pada Jurusan Teknik dan Desain di perguruan tinggi,” *Prod. J. Desain Prod. (Pengetahuan dan Peranc. Produk)*, vol. 5, no. 2, pp. 101–106, Nov. 2022, doi: 10.24821/productum.v5i2.7749.

[7] B. Debnath, Z. Pourfarash, B. Ghorpade, and S. Raman, “Integrating Reverse Engineering for Digital Model Reconstruction and Remanufacturing of Mechanical Components: A Systematic Review,” *Metrology*, vol. 5, no. 4, pp. 1–35, 2025, doi: 10.3390/metrology5040066.

[8] P. Wang, J. Yang, Y. Hu, J. Huo, and X. Feng, “Innovative design of a helmet based on

reverse engineering and 3D printing," *Alexandria Eng. J.*, vol. 60, no. 3, pp. 3445–3453, 2021, doi: 10.1016/j.aej.2021.02.006.

[9] W. A. K. Geoffrey Boothroyd, Peter Dewhurst, *Product Design for Manufacture and Assembly*, 3rd Editio. Boca Raton: CRC Press, 2010. doi: https://doi.org/10.1201/9781420089288.

[10] Rosnani Ginting and M. Ghassan Fattah, "OPTIMISASI PROSES MANUFAKTUR MENGGUNAKAN DFMA PADA PT. XYZ," *J. Sist. Tek. Ind.*, vol. 21, no. 1, pp. 42–50, Jan. 2019, doi: 10.32734/jsti.v21i1.902.

[11] C. L. C. Roxas *et al.*, "Design for Manufacturing and Assembly (DfMA) and Design Challenges , Trends and Developments," *Buildings*, vol. 13, no. 5, p. 1164, 2023.

[12] A. J. Muminović *et al.*, "Enhancing Furniture Manufacturing with 3D Scanning," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 10, p. 4112, May 2024, doi: 10.3390/app14104112.

[13] J. Bushra, M. H. Rahman, H. D. Budinoff, and M. Shafae, "Reverse engineering of additively manufactured parts: integrating 3D scanning and simulation-driven distortion compensation," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 32, no. 6, pp. 1300–1318, Feb. 2026, doi: 10.1108/RPJ-06-2024-0267.

[14] F. J. Daywin, D. W. Utama, W. Kosasih, and K. Wiliam, "Perancangan Mesin 3D Printer Dengan Metode Reverse Enginering," *J. Ilm. Tek. Ind.*, vol. 7, no. 2, pp. 79–89, 2019.

[15] J. Lin *et al.*, "Performance Testing of Cordless Handheld Vacuum Cleaners," *Aerosol Air Qual. Res.*, vol. 24, no. 10, p. 240082, 2024, doi: 10.4209/aaqr.240082.

[16] K. Julianto and R. Hanifi, "Perancangan Alat Vacuum Cleaner Menggunakan Energi Udara Bertekanan Jaringan Pipa Distribusi Udara Pabrik," *J. Mech. Eng. Manuf. Mater. ENERGY*, vol. 5, no. 1, pp. 34–47, May 2021, doi: 10.31289/jmemme.v5i1.4160.

[17] J. C. F. G. I. Metrology, "Evaluation of measurement data — Guide to the expression of uncertainty in measurement," *Int. Organ. Stand. Geneva ISBN*, vol. 50, no. September, p. 134, 2008, [Online]. Available: http://www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html

[18] L. Bernardini, M. O. McLinden, X. Yang, and M. Richter, "How Accurate are Your Experimental Data? A More Accessible GUM-Based Methodology for Uncertainty Evaluation," *Int. J. Thermophys.*, vol. 45, no. 11, p. 164, Nov. 2024, doi: 10.1007/s10765-024-03446-9.

[19] G. C. R. Douglas C. Montgomery, *Applied Statistics and Probability for Engineers, 7th Edition*, vol. 2. 2018.

[20] I. GHOZALI, *Aplikasi analisis multivariate dengan program IBM SPSS 26*. Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro, 2021.

[21] M. M. Firmansyah and R. B. Jakaria, "Implementasi Design For Assembly (DFA) Pada Desain Produk Oven," *J. PASTI (Penelitian dan Apl. Sist. dan Tek. Ind.*, vol. 17, no. 2, p. 271, 2023, doi: 10.22441/pasti.2023.v17i2.012.

[22] X. Zhao, Y. Guo, R. Liang, D. Zhang, Y. Yang, and Y. Song, "The innovative design direction of portable vacuum cleaner," *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, pp. 873–876, 2022, doi: 10.1145/3548608.3559326.

[23] T. Chen, H. Jin, C. Zhang, and H. Wang, "Lithium-ion battery remaining useful life prediction for portable medical device safety: a VMD-RVM based approach," *Appl. Energy Combust. Sci.*, vol. 25, no. August 2025, p. 100432, Mar. 2026, doi: 10.1016/j.jaecs.2025.100432.

[24] B. L. Rubbers, M.H., Keiper, "Cordless Dry-Wet Dual-Use Stick Vacuum Cleaner System," CN 216060342 U, 2022

[25] R. Ginting and R. Silalahi, "Redesign of iron for assembly cost and time reduction using DFA," *J. Achiev. Mater. Manuf. Eng.*, vol. 117, no. 1, pp. 15–24, Mar. 2023, doi: 10.5604/01.3001.0053.5954.

[26] G. Krishna *et al.*, "Advanced battery management system enhancement using IoT and ML for

predicting remaining useful life in Li-ion batteries," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. 30394, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-80719-1.

[27] C. Park, S. Jun, K. Park, S. Lee, and K. Chang, "Methodology for system-level analysis of a fan–motor design for a vacuum cleaner," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 231, no. 20, pp. 3840–3854, Oct. 2017, doi: 10.1177/0954406216651650.

[28] O. Sergyeyenko, A. S. Baskar, and S. Liu, "Vacuum Cleaner Having a Retractable Nozzle," EP 4 039 153 B1, 2025