

Modifikasi Mesin Mixing Komposit Hybrid Mechanic dan Magnetic untuk Pencampuran Komposit Bagian: Integrasi Mechanical dan Magnetic Stirrer

Abdullah Azzam Ayyasy^{1*}, Muslimin², Dhiya Luqyana³

¹⁻³ Program Studi Teknik Mesin Jurusan Teknik Mesin Politeknik Negeri Jakarta

*Corresponding email: abdullah.azzam.ayyasy.tm23@stu.pnj.ac.id

Abstrak: Penelitian ini bertujuan merancang *stirrer* multifungsi yang mengintegrasikan sistem pengadukan magnetik dan mekanis untuk pencampuran komposit skala laboratorium. Metode penelitian menggunakan *Quality Function Deployment* (QFD) dengan bantuan *House of Quality* (HOQ) menggunakan SolidWorks 2020. Hasil QFD Fase I menunjukkan prioritas utama berupa material komponen sebesar 23,80%, ukuran alat 21,31%, kemudahan pembongkaran 19,32%, sistem pengaman 18,34%, dan torsi motor 17,24%. QFD Fase II menetapkan rangka sebagai komponen kritis utama sebesar 26,82%, sedangkan QFD Fase III menempatkan perakitan sebagai proses produksi prioritas dengan bobot 494,70. Perhitungan teknik menghasilkan kecepatan pengadukan 6 rpm, torsi 2,01 N·m, diameter *impeller* 59,8 mm, diameter minimum poros 5,50 mm, dan daya pemanas teoritis 20,89 W. Rancangan dilengkapi *hot plate*, *housing*, dan *filter box* untuk mendukung fleksibilitas, kemudahan perawatan, serta keselamatan penggunaan pada proses pencampuran bahan berviskositas berbeda dan bahan kimia volatil dalam wadah maksimum 250 mL secara lebih aman.

Kata kunci: *filter box*, *magnetic stirrer*, *mechanical stirrer*, QFD, *stirrer* multifungsi

Abstract: This study aimed to design a multifunctional stirrer integrating magnetic and mechanical stirring systems for laboratory-scale composite mixing. The research employed an *Quality Function Deployment* (QFD) with the *House of Quality* (HOQ) using SolidWorks 2020. QFD Phase I identified component material as the highest priority at 23.80%, followed by equipment size at 21.31%, ease of disassembly at 19.32%, safety system at 18.34%, and motor torque at 17.24%. QFD Phase II determined the frame as the main critical component at 26.82%, while QFD Phase III placed assembly as the highest-priority production process with a weight of 494.70. Technical calculations produced a stirring speed of 6 rpm, torque of 2.01 N·m, impeller diameter of 59.8 mm, minimum shaft diameter of 5.50 mm, and theoretical heater power of 20.89 W. The design incorporates a hot plate, housing, and filter box to improve flexibility, maintainability, and overall operational safety.

Keywords: *filter box*, *magnetic stirrer*, *mechanical stirrer*, QFD, multifunctional stirrer

PENDAHULUAN

Proses pencampuran merupakan tahapan penting dalam kegiatan praktikum, penelitian kimia, pengembangan material, serta pembuatan komposit karena menentukan keseragaman distribusi komponen di dalam campuran (Suarsana & Budiarsa, 2022). Homogenitas yang tidak tercapai dapat menghasilkan perbedaan konsentrasi, distribusi temperatur, karakteristik fisik, serta mutu material pada setiap bagian campuran (Baskara et al., 2020). Keberhasilan proses tersebut dipengaruhi oleh karakteristik fluida, volume bahan, bentuk wadah, jenis *impeller*, kecepatan putaran, waktu pengadukan, serta kemampuan sistem penggerak dalam mempertahankan putaran ketika menerima beban (Christianto et al., 2026). Peralatan pengaduk laboratorium karena itu perlu memiliki pengaturan kecepatan yang stabil, waktu operasi yang terkontrol, serta konfigurasi pengaduk yang sesuai dengan karakteristik bahan. Pengembangan *overhead stirrer* terkini juga menunjukkan bahwa pengendalian kecepatan dan durasi pengadukan diperlukan untuk meningkatkan konsistensi proses pencampuran pada kegiatan laboratorium (Rosyidi et al., 2025).

Magnetic stirrer menjadi salah satu peralatan yang banyak digunakan pada skala laboratorium karena memiliki konstruksi ringkas, mudah dioperasikan, serta tidak memerlukan poros pengaduk yang menembus bagian atas wadah (Kurniawan & Wibowo, 2026). Sistem tersebut bekerja melalui interaksi medan magnet antara magnet penggerak di bawah wadah dan *stir bar* yang berada di dalam fluida. Putaran *stir bar* membentuk sirkulasi dan pusaran yang membantu mendistribusikan komponen larutan (Zaifuddin et al., 2021). Sejumlah *magnetic stirrer* juga telah terintegrasi dengan *hot plate* sehingga pemanasan dan pengadukan dapat dilakukan secara bersamaan. Cherepanova et al. (2025) menunjukkan bahwa posisi perangkat,

konfigurasi wadah, dan kondisi pengadukan magnetik dapat menghasilkan variasi proses yang memengaruhi reproduktibilitas reaksi kimia. Temuan tersebut menegaskan bahwa penggunaan *magnetic stirrer* tidak cukup hanya didasarkan pada nilai kecepatan putaran, tetapi juga memerlukan pengendalian kestabilan dan kesesuaian sistem terhadap karakteristik bahan yang diaduk.

Peningkatan viskositas menyebabkan tahanan fluida terhadap gerakan pengaduk semakin besar sehingga kebutuhan torsi pada sistem penggerak turut meningkat (Zaifuddin et al., 2021). Kondisi tersebut dapat menyebabkan *stir bar* kehilangan sinkronisasi terhadap magnet penggerak, berpindah dari pusat wadah, berputar tidak stabil, atau berhenti ketika beban pengadukan melampaui kemampuan kopling magnet (Kurniawan & Wibowo, 2026). Sistem pengadukan mekanis lebih sesuai untuk menghadapi kondisi tersebut karena putaran motor disalurkan secara langsung melalui poros menuju impeller. Pemilihan bentuk impeller harus disesuaikan dengan pola aliran, viskositas, serta tujuan pencampuran. Amirah et al. (2021) menemukan bahwa impeller *dual helical ribbon* mampu meningkatkan efisiensi pencampuran fluida *shear thinning* dan menurunkan viskositas semu selama proses pengadukan. Penelitian tersebut juga memperlihatkan bahwa peningkatan kecepatan impeller tidak selalu meningkatkan kinerja pencampuran karena pembentukan pusaran statis dapat menghambat homogenisasi. Hasil tersebut menunjukkan pentingnya penentuan kecepatan, torsi, geometri impeller, serta waktu pencampuran secara terintegrasi.

Pengadukan material berviskositas tinggi juga menimbulkan kebutuhan untuk menyeimbangkan waktu homogenisasi dan konsumsi energi (Christianto et al., 2026). Delaplace et al. (2023) menjelaskan bahwa evaluasi peralatan pencampur tidak seharusnya hanya didasarkan pada kemampuan menghasilkan putaran, tetapi perlu mempertimbangkan hubungan antara waktu pencampuran, daya yang digunakan, pola gerakan pengaduk, serta karakteristik reologi bahan. Sistem pengadukan mekanis mampu menghasilkan torsi lebih besar, tetapi umumnya memiliki konstruksi yang lebih kompleks dibandingkan *magnetic stirrer*. Sebaliknya, pengadukan magnetik lebih praktis untuk fluida dengan viskositas rendah sampai sedang, tetapi memiliki keterbatasan ketika digunakan pada bahan kental (Christianto et al., 2026). Perbedaan karakteristik tersebut menunjukkan bahwa kedua sistem mempunyai fungsi yang saling melengkapi dan berpotensi diintegrasikan dalam satu perangkat laboratorium yang lebih fleksibel.

Aspek keselamatan menjadi pertimbangan penting karena proses pencampuran dapat melibatkan bahan kimia volatil, salah satunya kloroform (Agussalim et al., 2026). Kloroform merupakan cairan jernih, tidak berwarna, mudah menguap, berbau khas, serta masih digunakan sebagai pelarut dan bahan antara dalam kegiatan laboratorium maupun industri (Agussalim et al., 2026). Paparan dapat terjadi melalui inhalasi uap, kontak kulit, atau kontak mata. Paparan melalui inhalasi dapat menimbulkan pusing, mengantuk, gangguan pernapasan, serta gangguan sistem saraf pusat, sedangkan paparan akut yang berat dapat diikuti kerusakan hati dan ginjal (Atarodang et al., 2020). Paparan jangka panjang juga berhubungan dengan kerusakan hati sehingga pengendalian uap perlu menjadi bagian dari rancangan peralatan yang digunakan untuk menangani kloroform.

Putaran pengaduk yang terlalu tinggi dapat membentuk pusaran dalam, meningkatkan ketidakstabilan wadah, serta memperbesar kemungkinan percikan dan tumpahan. Proses pemanasan juga perlu dikendalikan karena kloroform memiliki volatilitas tinggi sehingga pelepasan uap ke ruang kerja harus diminimalkan (Nurhayati et al., 2025). Upaya keselamatan tidak cukup hanya dilakukan melalui pengaturan kecepatan, tetapi perlu didukung stabilisasi gelas kimia, pelindung area pengadukan, pengurangan bukaan langsung menuju pengguna, serta sistem pengendalian uap. Karbon aktif dapat dipertimbangkan sebagai media adsorben karena struktur mikroporinya mampu mengadsorpsi molekul kloroform. Yoshikawa et al. (2021) memperlihatkan mekanisme adsorpsi kloroform pada mikropori serat karbon aktif

berbasis *pitch*, yang menunjukkan bahwa karakteristik ukuran dan struktur pori memengaruhi proses penjerapan. Penerapan karbon aktif dalam perangkat pengendalian uap tetap memerlukan penyesuaian terhadap debit udara, ketebalan media, kapasitas adsorpsi, serta kondisi kejenuhan agar fungsi pengendalian tidak hanya bersifat konstruktif, tetapi juga dapat dievaluasi secara terukur.

Pengembangan alat laboratorium multifungsi membutuhkan metode perancangan yang mampu menghubungkan kebutuhan pengguna dengan keputusan teknis. *Quality Function Deployment* (QFD) merupakan pendekatan yang digunakan untuk menerjemahkan *Voice of Customer* menjadi karakteristik teknis, target rancangan, komponen kritis, serta prioritas proses produksi (Ramdhani et al., 2025). Shen et al. (2022) juga menunjukkan bahwa integrasi *Voice of Customer* dalam QFD dapat membantu menentukan prioritas karakteristik rekayasa secara lebih sistematis dan berorientasi pada kebutuhan pengguna. Penerapan QFD relevan dalam pengembangan stirrer multifungsi karena rancangan harus menyeimbangkan tuntutan keselamatan, performa pengadukan, kemudahan penggunaan, ketahanan komponen, dimensi alat, serta kelayakan proses manufaktur.

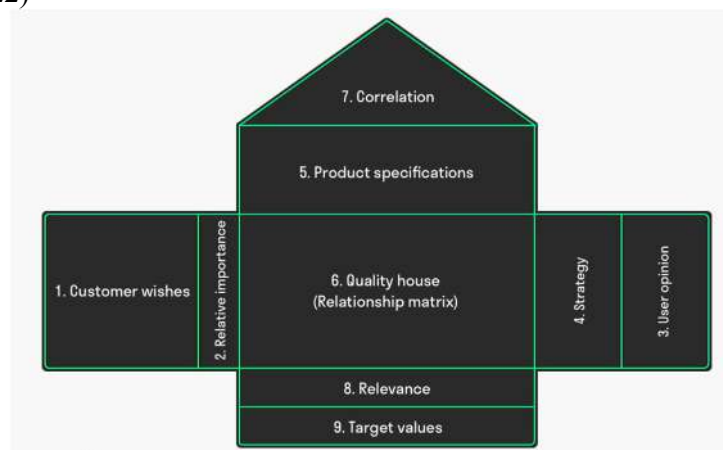
Kebaruan penelitian terletak pada pengembangan rancangan stirrer multifungsi yang mengintegrasikan dua prinsip pengadukan dalam satu konstruksi, yaitu kopling magnet untuk bahan berviskositas rendah sampai sedang dan sistem poros–impeller untuk bahan yang membutuhkan torsi lebih besar. Rancangan dilengkapi *hot plate*, pengaturan kecepatan putaran dan temperatur, penyangga wadah, serta *housing* pengendalian uap. Penentuan rancangan tidak hanya didasarkan pada pemilihan komponen yang tersedia secara komersial, tetapi juga menggunakan QFD fase *House of Quality*, *part deployment*, dan *process planning* serta perhitungan teknik yang mencakup RPM, torsi, dimensi impeller, diameter poros, dan daya pemanas. Pendekatan tersebut membedakan penelitian ini dari pengembangan stirrer yang hanya berfokus pada kontrol putaran atau sistem pengadukan tunggal.

Penelitian ini bertujuan merancang stirrer multifungsi yang mengintegrasikan *magnetic stirrer* dan *mechanical stirrer* untuk proses pencampuran skala laboratorium, menentukan desain serta spesifikasi komponen utama berdasarkan kebutuhan pengguna dan perhitungan teknik, serta menghasilkan rancangan yang mendukung keselamatan kerja melalui penerapan sistem pengendalian uap. Hasil penelitian diharapkan memberikan dasar teknis bagi pengembangan perangkat pencampur yang ringkas, fleksibel, mudah dirawat, mampu menangani bahan dengan karakteristik viskositas berbeda, serta lebih aman digunakan dalam proses yang melibatkan bahan kimia volatil.

METODE

Penelitian ini menggunakan menggunakan pendekatan *Quality Function Deployment* (QFD) dengan bantuan *House of Quality* (HOQ) untuk menerjemahkan kebutuhan pengguna (*Voice of Customer*) menjadi karakteristik teknis yang digunakan sebagai dasar dalam proses modifikasi dan perancangan mesin *mixing* komposit *hybrid mechanic* dan *magnetic stirrer*. Hasil prioritas karakteristik teknis selanjutnya digunakan sebagai acuan dalam menentukan konsep integrasi komponen dan spesifikasi teknis alat. Tahapan penyelesaian masalah dalam penelitian ini terdiri atas identifikasi kebutuhan pengguna, penyusunan *House of Quality* (HOQ), penerjemahan prioritas teknis ke dalam rancangan, serta perhitungan dan penentuan spesifikasi teknis. Data primer diperoleh melalui observasi, diskusi dengan pengguna, dan kuesioner *Google Form*, sedangkan data sekunder berasal dari jurnal ilmiah, buku teknik, standar, dan spesifikasi komponen. Identifikasi kebutuhan pengguna dilakukan menggunakan *Voice of Customer* (VOC) karena informasi tersebut menjadi dasar untuk memahami fungsi, keamanan, dan karakteristik produk yang diharapkan. VOC selanjutnya dapat dipetakan menjadi spesifikasi teknis melalui proses QFD yang melibatkan pertimbangan perancang dan ahli teknis (Li et al., 2025).

Responden penelitian terdiri atas tiga orang yang dipilih menggunakan teknik *expert sampling* berdasarkan pengetahuan dan pengalaman yang relevan dengan proses pencampuran dan penggunaan peralatan laboratorium. Kuesioner menggunakan skala kepentingan 1–5 untuk menilai lima atribut VOC, yaitu tahan terhadap korosi, mudah dirawat, aman digunakan, mampu mengaduk bahan kental, serta memiliki ukuran ringkas. Keterlibatan ahli diperlukan karena penyusunan QFD membutuhkan penilaian teknis untuk menghubungkan kebutuhan pengguna dengan karakteristik rekayasa produk (Maisano et al., 2024). Nilai *importance rating* setiap atribut ditentukan berdasarkan rata-rata skor ketiga responden sebagaimana prosedur pengolahan VOC dalam laporan penelitian. Analisis data dilakukan menggunakan QFD melalui tiga fase, yaitu *House of Quality*, *Part Deployment*, dan *Process Planning*. QFD merupakan metode pengembangan produk yang menghubungkan kebutuhan pelanggan dengan keputusan pada bidang perancangan, rekayasa, manufaktur, produksi, pengujian, dan pelayanan. Penerapan QFD memungkinkan informasi kebutuhan pengguna diterjemahkan secara bertahap menjadi karakteristik teknis, komponen, dan tindakan pengembangan produk (Shen et al., 2022)



Gambar 1. House of Quality QFD

Sumber: Mulder, 2026

QFD Fase I dilakukan melalui penyusunan matriks *House of Quality* (HOQ) untuk menerjemahkan VOC sebagai *WHATs* menjadi *technical response* sebagai *HOWs*. Karakteristik teknis yang dianalisis meliputi material komponen, ukuran alat, kemudahan pembongkaran, sistem pengaman, dan torsi motor. Hubungan antara VOC dan karakteristik teknis diberi bobot berdasarkan tingkat keterkaitannya, kemudian dihitung nilai *absolute importance* dan *relative importance*. HOQ berfungsi menggabungkan bobot kebutuhan pengguna dan kekuatan hubungan kebutuhan tersebut dengan karakteristik rekayasa untuk menentukan prioritas teknis (Maisano et al., 2024). Nilai prioritas yang lebih tinggi menunjukkan karakteristik teknis yang harus lebih dahulu diperhatikan dalam pengembangan desain (Dewi et al., 2024).

QFD Fase II atau *Part Deployment* digunakan untuk menerjemahkan karakteristik teknis prioritas menjadi komponen kritis. Komponen yang dianalisis meliputi rangka, poros, motor listrik, *housing* pelindung, impeller, serta sistem sambungan. Hubungan antarkomponen dinilai untuk menentukan bobot, tingkat kesulitan, dan *degree of importance*. QFD Fase II menjadikan hasil karakteristik teknis pada Fase I sebagai masukan untuk mengidentifikasi komponen yang paling berpengaruh terhadap pemenuhan kebutuhan pengguna (Ginting et al., 2025). Penerapan QFD Fase I dan II pada produk mixer juga menunjukkan bahwa karakteristik teknis prioritas dapat diterjemahkan menjadi komponen kritis yang memerlukan perbaikan desain (Harahap et al., 2026).

QFD Fase III atau *Process Planning* dilakukan untuk menerjemahkan komponen kritis menjadi prioritas proses produksi. Tahap ini menghubungkan komponen terpilih dengan proses pemotongan, pengeboran, pengelasan, perakitan, dan *finishing*. Bobot kepentingan proses diperoleh melalui perkalian antara bobot relatif komponen dan nilai hubungan komponen dengan setiap proses (Ginting et al., 2025). Proses dengan bobot terbesar ditetapkan sebagai proses kritis karena mempunyai kontribusi paling besar terhadap kualitas komponen dan rancangan akhir. Perhitungan bobot relatif komponen dan prioritas proses mengacu pada prosedur QFD Fase III dalam laporan penelitian. Hasil prioritas QFD digunakan sebagai dasar integrasi *magnetic stirrer*, *mechanical stirrer*, sistem pemanas, dan sistem pengendalian uap. Perhitungan teknik meliputi kecepatan putaran impeller, laju geser, viskositas efektif, bilangan Reynolds, *power number*, kebutuhan daya, torsi pengadukan, dimensi impeller, diameter poros, dan daya pemanas. Perhitungan tersebut digunakan untuk menentukan spesifikasi motor, poros, impeller, dan pemanas yang sesuai dengan kapasitas alat serta karakteristik bahan yang diaduk. Penentuan RPM, torsi, dimensi stirrer, dan daya pemanas mengikuti tahapan perhitungan teknik pada laporan penelitian.

Rancangan tiga dimensi dibuat menggunakan SolidWorks 2020 untuk menilai susunan komponen, dimensi, ruang gerak poros, kestabilan wadah, kemudahan pembongkaran, serta integrasi seluruh sistem. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan rancangan terhadap atribut VOC, prioritas karakteristik teknis, komponen kritis, dan hasil perhitungan teknik. Rancangan dinyatakan sesuai apabila mampu mengintegrasikan kedua sistem pengadukan, mendukung pemanasan, mempermudah perawatan, serta meningkatkan keselamatan pengguna. Penggunaan QFD sebagai dasar redesain membantu memastikan alternatif rancangan tetap mengacu pada kebutuhan operator dan kondisi teknis di lapangan (Rasyid et al., 2025).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan data menghasilkan tiga keluaran utama, yaitu prioritas karakteristik teknis melalui QFD Fase I, prioritas komponen melalui QFD Fase II, serta prioritas proses produksi melalui QFD Fase III. Hasil QFD kemudian digunakan sebagai dasar perhitungan kecepatan putaran, torsi, dimensi impeller, diameter poros, serta kebutuhan daya pemanas. Urutan tersebut sesuai dengan prinsip QFD yang menerjemahkan kebutuhan pengguna secara bertahap menjadi karakteristik rekayasa, komponen kritis, dan pengendalian proses produksi.

Tabel 1. Ringkasan Hasil Utama

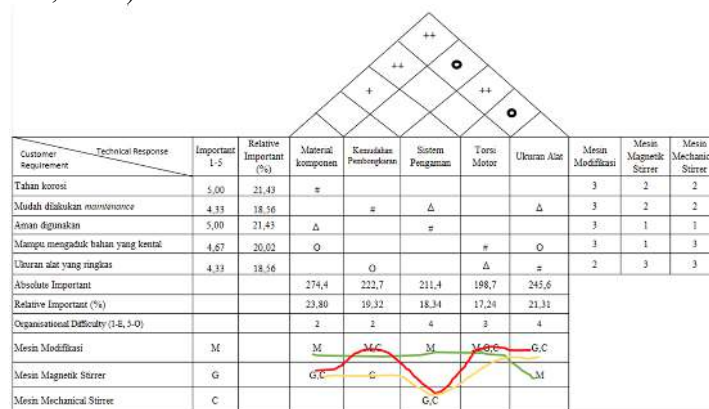
Tahap analisis	Hasil utama
<i>Voice of Customer</i>	Tahan korosi 5,00; aman digunakan 5,00; mampu mengaduk bahan kental 4,67; mudah dirawat 4,33; ukuran ringkas 4,33
Prioritas <i>technical response</i>	Material komponen 23,80%; ukuran alat 21,31%; kemudahan pembongkaran 19,32%; sistem pengaman 18,34%; torsi motor 17,24%
Prioritas <i>critical parts</i>	Rangka 26,82%; poros 20,86%; <i>housing</i> pelindung 19,87%; motor DC 18,21%; sambungan baut 14,24%
Parameter pengadukan	Putaran 6 rpm; viskositas efektif 1.999 Pa·s; Reynolds number 0,000203; daya 1,26 W; torsi 2,01 N·m
Dimensi pengaduk	Diameter impeller 59,8 mm; lebar bilah 5,98 mm; <i>clearance</i> 2,6 mm; <i>pitch</i> 59,8 mm; diameter minimum poros 5,50 mm
Parameter pemanasan	Massa bahan 0,276 kg; perubahan temperatur 30°C; energi 12.535 J; daya pemanas ideal 20,89 W
Prioritas proses	Perakitan 494,70; pengelasan 261,25; pengeboran 232,80; <i>finishing</i> 205,65; pemotongan 160,93

QFD Fase I: House of Quality

Identifikasi *Voice of Customer* menghasilkan lima kebutuhan utama, yaitu alat tahan korosi, mudah dirawat, aman digunakan, mampu mengaduk bahan kental, serta memiliki ukuran yang ringkas. Penilaian tiga responden menunjukkan bahwa atribut tahan korosi dan

aman digunakan memperoleh bobot tertinggi, masing-masing sebesar 5,00. Kemampuan mengaduk bahan kental memperoleh bobot 4,67, sedangkan kemudahan perawatan dan ukuran ringkas masing-masing memperoleh bobot 4,33. Hasil tersebut menunjukkan bahwa rancangan tidak hanya dituntut memiliki kinerja pengadukan, tetapi juga perlu memberikan perlindungan terhadap pengguna dan mempertahankan ketahanan komponen selama pemakaian. Penempatan VOC sebagai dasar perancangan sejalan dengan QFD yang mengolah kebutuhan pengguna menjadi masukan terstruktur bagi pengembangan karakteristik produk (Shen et al., 2022; Zhou et al., 2024).

Kebutuhan pengguna tersebut diterjemahkan menjadi lima *technical response*, yaitu material komponen, kemudahan pembongkaran, sistem pengaman, torsi motor, dan ukuran alat. Hubungan setiap VOC dengan *technical response* dimasukkan ke dalam matriks HOQ menggunakan tingkat hubungan sangat kuat, kuat, dan lemah. Pengolahan nilai *absolute importance* dan *relative importance* menghasilkan material komponen sebagai prioritas pertama sebesar 23,80%, diikuti ukuran alat sebesar 21,31%, kemudahan pembongkaran sebesar 19,32%, sistem pengaman sebesar 18,34%, dan torsi motor sebesar 17,24%. Perhitungan berbobot pada HOQ digunakan untuk menunjukkan besarnya kontribusi setiap karakteristik rekayasa terhadap pemenuhan kebutuhan pengguna, sehingga karakteristik dengan nilai relatif tertinggi memperoleh prioritas lebih besar pada tahap desain (Maisano et al., 2024; Dewi et al., 2024).



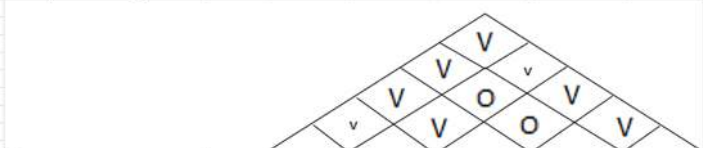
Gambar 2. House of Quality (HOQ) Fase I

Target material ditetapkan menggunakan stainless steel 316 pada komponen yang dirancang, sedangkan target kemudahan pembongkaran diwujudkan melalui pengurangan jumlah titik sambungan baut. Sistem keselamatan ditargetkan menggunakan pelindung fisik dan *filter box*. Torsi motor ditetapkan sekurang-kurangnya 2,01 N·m dengan diameter poros minimum 5,50 mm, sedangkan dimensi alat ditetapkan sekitar 250 × 250 × 550 mm. Penetapan nilai target diperlukan karena atribut seperti aman, mudah dirawat, dan ringkas perlu diubah menjadi parameter yang dapat digunakan untuk memilih komponen serta mengevaluasi rancangan. Penelitian HOQ sebelumnya juga menegaskan bahwa hasil pemetaan kebutuhan perlu diteruskan menjadi spesifikasi desain yang terukur, bukan berhenti pada urutan preferensi pengguna (Dewi et al., 2024; Ginting et al., 2025).

Material komponen menjadi prioritas tertinggi karena berkaitan langsung dengan ketahanan korosi, umur penggunaan, dan keamanan alat ketika berada di lingkungan laboratorium. Pemilihan SS316 dapat mendukung kebutuhan tersebut, tetapi ketahanannya tetap dipengaruhi jenis bahan kimia, konsentrasi, temperatur, kondisi permukaan, dan kualitas sambungan. Penelitian mengenai SS316L menunjukkan bahwa material ini mempunyai ketahanan korosi yang baik, meskipun paparan lingkungan asam atau ion agresif tetap dapat meningkatkan laju korosi dan merusak lapisan pasifnya (Shah et al., 2022).

QFD Fase II: Part Deployment

QFD Fase II menghasilkan lima komponen kritis, yaitu rangka, poros, motor listrik DC, *housing* pelindung yang dilengkapi ventilasi dan filter, serta sistem sambungan baut. Hasil perhitungan *degree of importance* menempatkan rangka pada peringkat pertama sebesar 26,82%, diikuti poros sebesar 20,86%, *housing* pelindung sebesar 19,87%, motor listrik DC sebesar 18,21%, serta sistem sambungan baut sebesar 14,24%. Penerjemahan karakteristik teknis menjadi komponen kritis merupakan fungsi utama QFD Fase II karena tahap tersebut menunjukkan bagian fisik yang paling menentukan keberhasilan produk dalam memenuhi kebutuhan pengguna (Ginting et al., 2025; Masta et al., 2023).



Critical Parts	Customer Important	Rangka	Poros	Motor Listrik (DC)	Housing Pelindung (Ventilasi & Filter)	Sistem sambungan (baut)
Material komponen	2	3	9	1	3	3
Kemudahan Pembongkaran	2	9	1	1	3	9
Sistem Pengaman	4	3	1	3	9	3
Torsi Motor	3	3	9	9	0	1
Ukuran Alat	4	9	3	3	3	1
Level of Difficulty		5	3	4	3	5
Degree of Importance		26.82%	20.86%	18.21%	19.87%	14.24%

Gambar 3. House of Quality (HOQ) Fase II

Analisis hubungan antarkomponen menghasilkan bobot 15 pada rangka, 10 pada poros, 12 pada motor listrik DC, 8 pada *housing* pelindung, serta 15 pada sistem sambungan. Konversi bobot tersebut menghasilkan tingkat kesulitan level 5 pada rangka dan sambungan baut, level 4 pada motor listrik DC, serta level 3 pada poros dan *housing* pelindung. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa komponen dengan tingkat kesulitan tertinggi tidak selalu mempunyai *degree of importance* tertinggi karena tingkat kesulitan menggambarkan kompleksitas keterkaitan atau pengerjaan, sedangkan *degree of importance* menunjukkan kontribusinya terhadap karakteristik teknis. Penelitian QFD pada desain produk juga memisahkan kedua ukuran tersebut agar prioritas fungsi tidak disamakan secara langsung dengan kompleksitas pengembangan komponen (Ginting et al., 2025; Dewi et al., 2024).

Rangka memperoleh *degree of importance* tertinggi karena menopang motor, poros, sistem pengaduk magnetik, *hot plate*, dan *housing* pelindung dalam satu konstruksi. Poros berada pada urutan kedua karena meneruskan torsi motor menuju impeller, sedangkan *housing* pelindung berada pada urutan ketiga karena berhubungan dengan kebutuhan keselamatan. Kedudukan komponen tersebut menunjukkan bahwa integrasi sistem tidak hanya ditentukan kemampuan motor, tetapi juga keselarasan posisi, kekakuan konstruksi, akses perawatan, serta perlindungan area kerja. Penelitian penerapan QFD pada desain mesin menunjukkan bahwa komponen kritis perlu dipilih berdasarkan pengaruhnya terhadap fungsi keseluruhan dan hubungan antarkomponen, bukan berdasarkan ukuran atau biaya komponen semata (Masta et al., 2023; Ginting et al., 2025).

Perhitungan teknik menghasilkan kecepatan impeller sekitar 6 rpm untuk waktu pencampuran 10 menit. Laju geser diperoleh sebesar $2,997 \text{ s}^{-1}$, sedangkan viskositas efektif bahan sebesar $1.999 \text{ Pa}\cdot\text{s}$. Nilai Reynolds sebesar 0,000203 menempatkan kondisi pengadukan dalam kategori aliran laminar berdasarkan klasifikasi yang digunakan pada perhitungan penelitian. Daya pengadukan diperoleh sebesar 1,26 W dan kebutuhan torsi sebesar $2,01 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Hasil tersebut memperlihatkan bahwa putaran yang rendah tetap memerlukan torsi relatif besar ketika bahan mempunyai viskositas tinggi. Evaluasi pengadukan bahan kental memang perlu mempertimbangkan hubungan antara viskositas, torsi, waktu pencampuran, daya, dan geometri pengaduk secara bersamaan (Delaplace et al., 2023; Amiraftabi et al., 2021).

Dimensi impeller yang diperoleh meliputi diameter 59,8 mm, lebar bilah 5,98 mm, *clearance* 2,6 mm, dan *pitch* 59,8 mm untuk gelas kimia berdiameter 65 mm. Diameter minimum poros berdasarkan tegangan geser yang diizinkan diperoleh sebesar 5,50 mm. Perbandingan diameter impeller dan wadah menunjukkan konfigurasi pengaduk dengan jarak relatif dekat terhadap dinding bejana, sehingga ketepatan sentralitas poros dan dimensi impeller perlu dijaga agar tidak terjadi kontak mekanis. Penelitian mengenai *helical ribbon impeller* menunjukkan bahwa geometri impeller dan kecepatan putaran memengaruhi sirkulasi, distribusi kecepatan, viskositas semu, dan efisiensi pencampuran fluida non-Newtonian (Delaplace et al., 2023; Amiraftabi et al., 2021).

Perhitungan pemanasan menghasilkan massa material sebesar 0,276 kg, kalor jenis sebesar 1.514 J/kg·°C, serta perubahan temperatur dari 30°C menjadi 60°C. Energi panas yang diperlukan sebesar 12.535 J untuk waktu pemanasan 600 detik, sehingga daya pemanas teoritis diperoleh sebesar 20,89 W. Nilai tersebut merupakan kebutuhan ideal berdasarkan energi sensibel material dan belum memasukkan kehilangan panas menuju gelas kimia, udara, rangka, serta komponen lain. Evaluasi daya pemanas pada prototipe karena itu perlu mempertimbangkan efisiensi perpindahan panas dan kestabilan temperatur aktual selama pengadukan, mengingat performa pencampuran juga dapat dipengaruhi distribusi temperatur dan perubahan sifat reologi bahan (Delaplace et al., 2023; Amiraftabi et al., 2021).

QFD Fase III: Process Planning

QFD Fase III menerjemahkan lima komponen kritis menjadi lima proses produksi, yaitu pemotongan bahan baku, pengelasan, pengeboran, perakitan, dan *finishing*. Hubungan komponen dengan proses diberi nilai 9 untuk hubungan kuat, 3 untuk hubungan sedang, 1 untuk hubungan lemah, serta 0 apabila tidak terdapat hubungan. Tahapan tersebut mengikuti prinsip *process planning* QFD, yaitu menggunakan keluaran komponen kritis pada fase sebelumnya untuk menentukan proses manufaktur yang membutuhkan perhatian dan pengendalian lebih besar (Masta et al., 2023).

Perhitungan bobot kepentingan menempatkan perakitan sebagai prioritas pertama dengan nilai 494,70. Pengelasan menempati prioritas kedua sebesar 261,25, pengeboran prioritas ketiga sebesar 232,80, *finishing* prioritas keempat sebesar 205,65, sedangkan pemotongan menjadi prioritas kelima sebesar 160,93. Perakitan memperoleh nilai tertinggi karena berkaitan dengan seluruh komponen utama, terutama rangka, poros, motor listrik, *housing*, dan sistem sambungan. Penelitian QFD pada pengembangan komponen teknik juga menunjukkan bahwa fase proses dapat mengarahkan perhatian pada tahapan manufaktur yang paling menentukan ketercapaian spesifikasi komponen kritis (Masta et al., 2023; Zhou et al., 2024).

Critical Process Plan		Critical Parts					Nilai Kepentingan	Bobot Kepentingan	Bobot Relatif (%)
		Pemotongan bahan baku	Pengelasan	Pengeboran	Perakitan	Finishing			
Rangka	3	9	1	3	1		0,268	81	26,82
Poros	1			3			0,209	63	20,86
Motor Listrik (DC)				1	9		0,182	55	18,21
Housing Pelindung (Ventilasi & Filter)	3		3	9	9		0,199	60	19,87
Sistem sambungan (tutup)				9	9		0,142	43	14,24
Bobot Kepentingan		160,93	261,25	232,8	494,7	205,65		302	100%
Prioritas		5	2	3	1	4			

Gambar 4. House of Quality (HOQ) Fase III

Prioritas perakitan menunjukkan bahwa kualitas akhir alat sangat dipengaruhi ketepatan penggabungan seluruh subsistem. Posisi motor harus sejajar terhadap poros, impeller perlu ditempatkan pada pusat wadah, *magnetic stirrer* dan *hot plate* harus memiliki dudukan stabil, sedangkan *housing* perlu dipasang tanpa menghambat pengoperasian maupun perawatan. Ketidaktepatan perakitan dapat mengubah *clearance* impeller, mengganggu putaran, serta menurunkan kestabilan wadah. Penelitian QFD pada proses pembuatan *die* juga menempatkan fase fabrikasi dan perakitan sebagai penghubung antara spesifikasi komponen dan kemampuan produk akhir memenuhi kebutuhan pengguna (Masta et al., 2023).

Pengelasan menjadi prioritas kedua karena menentukan kekakuan dan kesesuaian geometri rangka. Distorsi selama pengelasan dapat menyebabkan perubahan posisi dudukan motor, poros, dan unit pengaduk, sedangkan pengeboran menjadi penting untuk menjamin kesesuaian lubang baut serta kemudahan pembongkaran. *Finishing* berkaitan dengan kerapian dan perlindungan permukaan, sementara pemotongan menjadi dasar pencapaian ukuran bahan sebelum proses berikutnya. Penentuan prioritas tersebut konsisten dengan fungsi QFD Fase III yang mengidentifikasi proses paling berpengaruh terhadap karakteristik komponen, sehingga pengawasan proses dapat difokuskan pada tahapan yang berisiko memengaruhi kualitas akhir (Masta et al., 2023)

Pembahasan

Hasil QFD Fase I memperlihatkan bahwa material komponen menjadi karakteristik teknis terpenting, meskipun keamanan penggunaan memperoleh nilai VOC yang sama tingginya dengan ketahanan korosi. Kondisi tersebut terjadi karena pemilihan material mempunyai hubungan dengan beberapa kebutuhan sekaligus, meliputi ketahanan korosi, keamanan, perawatan, dan umur penggunaan. Ukuran alat menempati urutan kedua karena integrasi sistem magnetik, mekanis, pemanas, dan pelindung harus dilakukan tanpa menghasilkan konstruksi yang terlalu besar. Hasil ini memperlihatkan keunggulan HOQ karena prioritas akhir tidak hanya ditentukan skor kebutuhan, tetapi juga jumlah serta kekuatan hubungan setiap kebutuhan dengan karakteristik rekayasa (Maisano et al., 2024; Dewi et al., 2024).

Integrasi *magnetic stirrer* dan *mechanical stirrer* memberikan fleksibilitas pemilihan metode pengadukan berdasarkan karakteristik material. Sistem magnetik dapat digunakan pada bahan yang masih dapat digerakkan secara stabil melalui kopling magnet, sedangkan sistem mekanis menyediakan penyaluran torsi langsung melalui poros dan impeller untuk bahan yang lebih kental. Kebutuhan sistem alternatif tersebut relevan karena performa pengadukan magnetik dapat dipengaruhi posisi wadah, pola pergerakan *stir bar*, bentuk wadah, serta distribusi medan magnet. Cherepanova et al. (2025) menemukan bahwa perubahan posisi wadah pada permukaan *magnetic stirrer* dapat menghasilkan perbedaan dinamika pengadukan dan hasil reaksi, sehingga posisi serta kestabilan sistem perlu dikendalikan untuk menjaga reproduktibilitas (Cherepanova et al., 2025; Amiraftabi et al., 2021).

Kebutuhan torsi sebesar 2,01 N·m pada kecepatan sekitar 6 rpm menunjukkan bahwa rancangan lebih diarahkan pada pengadukan lambat bertorsi tinggi daripada putaran cepat. Kondisi tersebut sesuai dengan karakteristik bahan berviskositas tinggi yang membutuhkan gaya lebih besar untuk membentuk sirkulasi, tetapi tidak selalu memperoleh peningkatan homogenitas melalui penambahan kecepatan putaran. Amiraftabi et al. (2021) menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan impeller tidak selalu memperbaiki kinerja pencampuran karena dapat membentuk daerah aliran yang kurang efektif, sedangkan Delaplace et al. (2023) menegaskan bahwa peralatan pengaduk bahan kental perlu dibandingkan berdasarkan kombinasi waktu pencampuran dan konsumsi energi (Amiraftabi et al., 2021; Delaplace et al., 2023).

Penggunaan *helical ribbon impeller* dengan diameter 59,8 mm pada wadah 65 mm mendukung pencampuran dekat dinding bejana, tetapi *clearance* sebesar 2,6 mm menuntut ketepatan manufaktur dan perakitan. Penyimpangan posisi poros, ketidakrataan rangka, atau deformasi sambungan berpotensi menyebabkan impeller menyentuh wadah. Temuan tersebut menjelaskan keterkaitan hasil QFD Fase II dan Fase III: poros mempunyai *degree of importance* tinggi, sementara perakitan dan pengelasan menjadi proses produksi terpenting. Penelitian mengenai impeller pita heliks juga menunjukkan bahwa dimensi impeller, jarak terhadap dinding, dan kecepatan rotasi menentukan pola aliran serta efektivitas pencampuran fluida berviskositas tinggi (Amiraftabi et al., 2021; Delaplace et al., 2023).

Karbon aktif pada *filter box* memiliki dasar ilmiah sebagai media adsorpsi kloroform. Yoshikawa et al. (2021) menemukan bahwa molekul kloroform dapat teradsorpsi secara efektif pada mikropori sempit karbon aktif dan membentuk kelompok molekul pada tahap awal adsorpsi. Efektivitas rancangan tetap perlu diuji karena kapasitas penjerapan dipengaruhi ukuran pori, jumlah adsorben, konsentrasi uap, debit udara, waktu kontak, dan kondisi kejenuhan media. Konsekuensinya, keberadaan karbon aktif dalam desain belum dapat langsung diartikan sebagai bukti bahwa konsentrasi uap telah memenuhi batas aman tanpa pengujian konsentrasi sebelum dan sesudah filtrasi (Yoshikawa et al., 2021)

Hasil penelitian secara keseluruhan menunjukkan keterhubungan antarfase QFD. Fase I menetapkan material, ukuran, kemudahan pembongkaran, sistem pengaman, dan torsi motor sebagai prioritas teknis. Fase II menerjemahkannya menjadi rangka, poros, motor, *housing*, dan sambungan, sedangkan Fase III menunjukkan bahwa perakitan, pengelasan, dan pengeboran menjadi proses paling penting. Pola tersebut sesuai dengan konsep QFD berantai, yaitu keluaran satu matriks digunakan sebagai masukan bagi matriks berikutnya agar kebutuhan pengguna tetap dapat ditelusuri sampai tahap proses produksi (Masta et al., 2023; Zhou et al., 2024).

Rancangan masih memerlukan pengujian prototipe untuk memastikan kesesuaian hasil perhitungan dengan performa aktual. Pengujian yang diperlukan meliputi kestabilan RPM, kemampuan motor mempertahankan torsi, waktu pencapaian homogenitas, konsumsi daya, kenaikan temperatur, getaran, ketepatan *clearance*, serta kemampuan sistem filtrasi mengurangi uap. Kebutuhan pengujian tersebut penting karena performa pengadukan tidak dapat ditentukan hanya melalui nilai kecepatan dan daya teoritis, sedangkan kestabilan pengadukan magnetik maupun mekanis dipengaruhi kondisi pemasangan serta karakteristik material yang diproses (Cherepanova et al., 2025; Delaplace et al., 2023).

SIMPULAN

Penelitian ini menghasilkan rancangan stirrer multifungsi skala laboratorium yang mengintegrasikan *mechanical stirrer* dan *magnetic stirrer* dalam satu perangkat berkapasitas maksimum 250 mL. Rancangan dilengkapi sistem pengaturan kecepatan, *hot plate*, serta *housing* dan *filter box* sebagai sistem pengendalian uap. Pemodelan keseluruhan komponen dilakukan menggunakan SolidWorks 2020. Penerapan QFD Fase I menghasilkan lima karakteristik teknis prioritas, yaitu material komponen sebesar 23,80%, ukuran alat sebesar 21,31%, kemudahan pembongkaran sebesar 19,32%, sistem pengaman sebesar 18,34%, serta torsi motor sebesar 17,24%. QFD Fase II menetapkan rangka sebagai komponen kritis utama sebesar 26,82%, diikuti poros sebesar 20,86%, *housing* pelindung sebesar 19,87%, motor listrik DC sebesar 18,21%, serta sambungan baut sebesar 14,24%. QFD Fase III menunjukkan bahwa perakitan menjadi proses produksi utama dengan bobot 494,70, disusul pengelasan, pengeboran, *finishing*, dan pemotongan.

Perhitungan teknik menghasilkan kecepatan pengadukan sekitar 6 rpm, kebutuhan torsi 2,01 N·m, diameter impeller 59,8 mm, lebar bilah 5,98 mm, *clearance* 2,6 mm, *pitch* 59,8 mm, serta diameter minimum poros 5,50 mm. Kebutuhan daya pemanas teoritis diperoleh sebesar

20,89 W. Hasil tersebut menjadi dasar penentuan spesifikasi motor, poros, impeller, dan sistem pemanas. Komponen standar seperti unit *magnetic stirrer* dan *hot plate* dipilih berdasarkan kesesuaian spesifikasi produk komersial karena tidak dirancang ulang. Secara keseluruhan, pendekatan QFD mampu menghubungkan kebutuhan pengguna, karakteristik teknis, komponen kritis, serta proses produksi dalam pengembangan stirrer multifungsi yang ringkas, mudah dirawat, dan mempertimbangkan keselamatan pengguna.

Penelitian selanjutnya perlu merealisasikan rancangan dalam bentuk prototipe serta melakukan pengujian eksperimental terhadap kestabilan RPM, kemampuan torsi, tingkat homogenitas campuran, waktu pencampuran, konsumsi daya, kestabilan temperatur, getaran, dan ketahanan komponen. Pengujian sistem pengendalian uap juga diperlukan melalui pengukuran debit udara, kebocoran *housing*, serta konsentrasi uap sebelum dan sesudah melewati *filter box*. Pengembangan berikutnya dapat mencakup analisis kekuatan rangka, umur pakai dan keandalan komponen, penambahan sistem kontrol otomatis, serta penerapan kapasitas wadah yang berbeda. Variasi jenis impeller dan bahan dengan tingkat viskositas berbeda juga perlu diuji untuk menentukan batas penggunaan sistem pengadukan magnetik dan mekanis secara lebih terukur.

DAFTAR PUSTAKA

- Agussalim, H., Almur, F., Kartika, A. E., Negara, S. P. J., Bunyamin, A. B. N., & Afni, N. (2026). *Implementasi Prinsip Kimia Hijau untuk Mewujudkan Proses Kimia Berkelanjutan*. Nasya Expanding Management.
- Amirafitab, M., Khiadani, M., Mohammed, H. A., & Arshad, A. (2021). CFD-PBM and experimental investigation of a shear thinning fluid in a gas-liquid tank agitated by a helical ribbon impeller. *Separation and Purification Technology*, 272, 118855. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.118855>
- Atarodang, B. L., Rollando, & Susanto, H. (2020). Tingkat Pengetahuan Mahasiswa Program Studi Farmasi dan Kimia di Universitas Ma Chung terhadap Bahaya Senyawa Kimia. *Jurnal Ilmiah SAINSBERTEK*, 1(1).
- Baskara, I. B. B., Suhendra, L., & Wrsiati, L. P. (2020). Pengaruh Suhu Pencampuran dan Lama Pengadukan terhadap Karakteristik Sediaan Krim. *Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Agroindustri*, 8(2).
- Cherepanova, V. A., Gordeev, E. G., & Ananikov, V. P. (2025). Magnetic Stirring May Cause Irreproducible Results in Chemical Reactions. *JACS Au*, 5(8), 3789–3798. <https://doi.org/10.1021/jacsau.5c00412>
- Christianto, B. W., Rohim, N. T. N., & Nugroho, D. (2026). Tinjauan Literatur tentang optimasi Desain Sistem Pengaduk pada Proses Pengolahan Molten Aluminum. *Jurnal Ilmiah Kajian Multidisipliner*, 10(6).
- Delaplace, G., Xiao, J., Buendia, F., Jeantet, R., & Chen, X. D. (2023). Framework for choosing energy efficient mixing equipment whatever motions it induces: Example of application for planetary and helical ribbon mixers. *Chemical Engineering Research and Design*, 198, 173–183. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.08.042>
- Dewi, D. R. S., Rahaju, D. E. S., Angela, M., Karijadi, I., & Asrini, L. J. (2024). Determining Optimal Design Specification in the House of Quality. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 11(6), 1611–1618. <https://doi.org/10.18280/mmep.110622>
- Ginting, R., Napitupulu, H., Ishak, A., & Supranata, S. (2025). Bitewing Holder and Support Product Design Using Quality Function Deployment . *International Journal of Technology*, 16(2), 551. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v16i2.6577>
- Harahap, A. G. A., Ginting, R., & Ishak, A. (2026). Perancangan ulang produk mixer dengan Metode Quality Function Deployment. *Productum: Jurnal Desain Produk (Pengetahuan Dan Perancangan Produk)*, 9(1), 43–52. <https://doi.org/10.24821/productum.v9i1.17546>

- Kurniawan, R. adi, & Wibowo, K. mukti. (2026). Rancang Bangun Magnetic Stirrer Dual Position dengan Kontrol Kecepatan dan Waktu Independen Berbasis Mikrokontroler yang Terintegrasi IoT. *CYCLOTRON*, 9(01), 87–94. <https://doi.org/10.30651/ct.v9i01.30077>
- Li, X., Wang, Y., Wu, C. H., & Mo, D. Y. (2025). Mapping customer needs to product technical specifications in quality function deployment using graphical convolutional networks. *Enterprise Information Systems*, 19(7–8). <https://doi.org/10.1080/17517575.2025.2510346>
- Maisano, D. A., Carrera, G., Mastrogiacomio, L., & Franceschini, F. (2024). A new method to prioritize the QFDs' engineering characteristics inspired by the Law of Comparative Judgment. *Research in Engineering Design*, 35(4), 343–353. <https://doi.org/10.1007/s00163-024-00436-8>
- Masta, M. Al, Luqyana, D., Muhamad, A. M., & Rosyidi, C. N. (2023). Application of Quality Function Deployment (QFD) in Die Redesign to Lowering Rework of Stamping Parts. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 14(3), 257–270. <https://doi.org/10.24867/IJIEEM-2023-3-337>
- Nurhayati, Rahayu, T. E. P. S., Nugroho, D. H., & Rahmanto, D. E. (2025). *Teknologi Pengelolaan Limbah*. CV. Hei Publishing Indonesia.
- Ramdhani, R., Fanani, I., & Nurhayaty, M. (2025). Quality Function Deployment (QFD) untuk Peningkatan Kualitas Produk Sepatu PT. X. *Jurnal Media Teknologi*, 12(1), 182–188. <https://doi.org/10.25157/jmt.v12i1.5262>
- Rasyid, F. A., Pratiwi, A. I., & Zahrotul W, A. (2025). Penerapan Metode QFD untuk Redesain Rak Jig pada Proses Die Change di Perusahaan Produksi Otomotif. *Ranah Research : Journal of Multidisciplinary Research and Development*, 7(6), 4344–4355. <https://doi.org/10.38035/rj.v7i6.1797>
- Rosyidi, M. A. I., Harsoyo, I. T., & Olla, P. K. (2025). Heavy Dusty Over Head Stirrer Design and Construction. *Journal of Engineering, Electrical and Informatics*, 5(2), 96–102. <https://doi.org/10.55606/jeei.v5i2.4715>
- Shah, M., Ayob, M. T. M., Yaakob, N., Embong, Z., & Othman, N. K. (2022). Effect of hydrogen sulfide and chloride on the passive film structures of stainless-steel type 316 L. *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 53(2), 201–207. <https://doi.org/10.1002/mawe.202100212>
- Shen, Y., Zhou, J., Pantelous, A. A., Liu, Y., & Zhang, Z. (2022). A voice of the customer real-time strategy: An integrated quality function deployment approach. *Computers & Industrial Engineering*, 169, 108233. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108233>
- Suarsana, I. K., & Budiarsa, I. N. (2022). *Komposit Hybrid: Metal Matriks, Polimer Matriks, Keramik Matriks, Serat Alami, Partikel Powder*. Mega Press Nusantara.
- Wicaksono, C. A. L., Lawi, A., & Mardiansyah, Y. (2025). Analisis Quality Function Deployment (Qfd) Untuk Pengembangan Sistem Electro Pneumatic Berbasis Programmable Logic Controller (Plc) Pada Mesin Semi Otomatis Tester Coding Battery. *Teknosia*, 19(1), 13–24. <https://doi.org/10.33369/teknosia.v19i1.41182>
- Yoshikawa, Y., Teshima, K., Futamura, R., Tanaka, H., Iiyama, T., & Kaneko, K. (2021). Structural adsorption mechanism of chloroform in narrow micropores of pitch-based activated carbon fibres. *Carbon*, 171, 681–688. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2020.08.020>
- Zaifuddin, Ibadillah, A., Alfita, R., & Laksono, D. T. (2021). Hotplace Magnetic Stirrer Automatic Heat Control and Water Velocity Based on PID (Proportional Integral Derivative). *Procedia of Engineering and Life Science*, 1(1). <https://doi.org/10.21070/pels.v1i1.766>

Zhou, J., Shen, Y., Pantelous, A. A., & Liu, Y. (2024). Quality Function Deployment: A Bibliometric-Based Overview. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 71, 1180–1201. <https://doi.org/10.1109/TEM.2022.3146534>