



## Pemutakhiran Pengembangan Produk Menggunakan Kerangka kerja “*Integrated Conceptual Selection (ICS)*”

N. Fatchurrohman<sup>1✉</sup>, M. Ilham Adelino<sup>2</sup>, Meldia Fitri<sup>3</sup>

<sup>123</sup> Jurusan Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Putra Indonesia “YPTK” Padang

✉ [n.fatchurrohman@gmail.com](mailto:n.fatchurrohman@gmail.com)

### Abstract

In today's overwhelming competition, the knowledge on product development represents a very significant aspect for companies to survive in the market. Among these sectors is the automotive industry, where it is one of the fastest growing, highly demanding and stiff competition marketplaces. Intensive research in this field is targeted to produce light weight and high-performance components which can increase fuel efficiency and sustainability of an automobile. One of the recent avenues is the investigation of increased performance engineered materials to replace the conventional materials. In this study product development of engineered material - component is explored. To achieve a sound product development, new integrated product development framework which utilized simultaneous approach is developed. The framework is referred to as Integrated Conceptual Selection (ICS) which streamlines the phases in the product development process, including product investigation, product specification and conceptual design.

Keywords: product development, new framework, concurrent engineering, automotive component, engineering material

### Abstrak

Dalam persaingan yang luar biasa saat ini, pengetahuan tentang pengembangan produk merupakan aspek yang sangat penting bagi perusahaan untuk bertahan di pasar. Di antara sektor-sektor ini adalah industri otomotif, di mana ia adalah salah satu pasar persaingan yang paling cepat berkembang, sangat menuntut dan ketat. Penelitian intensif di bidang ini ditargetkan untuk menghasilkan komponen yang ringan dan berkinerja tinggi yang dapat meningkatkan efisiensi bahan bakar dan keberlanjutan sebuah mobil. Salah satu jalan baru-baru ini adalah penyelidikan peningkatan kinerja bahan rekayasa untuk menggantikan bahan konvensional. Dalam penelitian ini pengembangan produk bahan rekayasa - komponen dieksplorasi. Untuk mencapai pengembangan produk yang baik, dikembangkan kerangka pengembangan produk terintegrasi baru yang menggunakan pendekatan simultan. Kerangka kerja ini disebut sebagai Seleksi Konseptual Terpadu atau *Integrated Conceptual Selection (ICS)* yang merampingkan fase dalam proses pengembangan produk, termasuk penyelidikan produk, spesifikasi produk dan desain konseptual.

Kata kunci: pengembangan produk, kerangka baru, teknik konkurensi, komponen otomotif, bahan teknik

© 2021 JITEKIN

### 1. Pendahuluan

Konsekuensi globalisasi pada dasarnya telah mengubah sifat persaingan pasar dunia. Perusahaan unggul perlu menerapkan strategi pengembangan produk yang tepat agar tetap terdepan dalam persaingan. Mereka dituntut untuk menerapkan pengembangan produk yang dapat menghasilkan produk dengan kinerja tinggi dalam waktu yang singkat ke pasar, biaya kompetitif dan kualitas produk yang tinggi [1].

Pengembangan produk memainkan peran penting dalam keberhasilan perusahaan manufaktur dan banyak peneliti telah meningkatkan pemahaman mereka untuk mengelolanya secara strategis. Pengembangan produk berkaitan dengan Teknik Konkurensi atau *Concurrent Engineering (CE)* telah berjalan dan pada saat ini menjadi paradigma paling berpengaruh menggantikan strategi “*Over-The-Wall*” atau rekayasa sekuensial. CE mempromosikan pertimbangan paralel dari semua

parameter desain yang dianggap berurutan di masa lalu. Metode rekayasa yang lama yaitu metode sekuensial dianggap tidak efisien, karena menyebabkan waktu pengembangan yang lebih lama, biaya yang lebih tinggi, kualitas desain yang lebih rendah dan menghasilkan keuntungan yang lebih rendah [2]. Penilaian yang buruk, kesalahan dan proses yang tidak sistematis pada tahap awal pengembangan produk dapat menyebabkan perubahan yang mahal pada tahap akhir. Sementara itu, terdapat kekurangan pendekatan pengambilan keputusan yang terintegrasi dan sistematis yang digunakan untuk pemilihan parameter dalam pengembangan produk. Ini adalah kenyataan yang dikemukakan oleh banyak ahli di bidang industri dan faktor-faktor penting yang terkait dengan masalah ini seperti yang dikemukakan oleh Sinha dan Anand [3].

CE mencakup aktivitas desain dan aspek siklus hidup pengembangan produk lainnya dalam satu kerangka kerja. Dengan demikian hal ini akan mengarah pada

peningkatan kualitas produk, pengurangan biaya, siklus desain yang diperpendek, pengurangan waktu ke pasar dan pemenuhan harapan pelanggan. CE adalah pendekatan simultan dan sistematis untuk desain produk terintegrasi dan proses terkait, termasuk dukungan produk. Jadi CE membentuk dasar bagi para desainer dan insinyur untuk mengembangkan produk dengan memperhitungkan semua komponen siklus hidup produk dari konsepsi hingga pembuangan, termasuk kualitas, biaya, detail produksi, dan kebutuhan pengguna [4].

## 2. Metodologi Penelitian

### 2.1 Tinjauan Pustaka

Penelitian yang sedang berjalan dalam pengembangan produk dipicu oleh ekonomi global yang intens, dan dinamis. Perkembangan produk inovatif semakin menjadi titik fokus kompetisi. Beberapa perusahaan memiliki aspirasi untuk menciptakan produk yang sesuai dengan kebutuhan dan harapan pelanggan target dan kompetitif [5].

Cooper [6] berpendapat bahwa karena kondisi pasar global yang berlaku, industri manufaktur harus mampu bereaksi dengan cepat untuk memanfaatkan pemanfaatan sumber daya dalam pengembangan produk. Perkembangan produk telah berubah selama beberapa waktu terakhir karena biaya produk, kualitas dan waktu pemasaran menjadi semakin menjadi perhatian.

Sedangkan Loureiro et al., [7] menekankan bahwa produk perlu menghasilkan inovasi dan didorong oleh pasar untuk memaksimalkan profit bagi organisasi. Dalam upaya mereka untuk membangun hubungan yang lebih dekat antara pelanggan dan perusahaan, mereka telah memperkenalkan kerangka pengembangan produk yang terdiri dari tiga modul fungsional; modul manajemen informasi produk, modul penyesuaian produk dan pengambilan keputusan, dan modul sistem manajemen *database*.

Ciric et al., [8] beranggapan bahwa pengembangan produk adalah sebagai kegiatan untuk meningkatkan produk yang sudah ada atau konsep baru. Ini melibatkan proses pengambilan keputusan yang rumit dan dimulai dengan identifikasi kebutuhan produk kemudian diikuti dengan rangkaian aktivitas untuk mencari solusi yang optimal. Selain itu, pengembangan produk membutuhkan strategi dan metode yang lebih baik, fleksibel, sistematis, dan mendorong kesederhanaan. Kuncinya adalah penerapan strategi yang berfokus pada pengurangan risiko teknis dalam lingkungan yang terus berkembang [8].

Marodin et al., [9] mengemukakan bahwa kerangka pengembangan produk dan pengaruhnya terhadap inovasi dan kualitas produk. Penerapan model teoritis yang menjelaskan hubungan antara praktik

pengembangan produk utama dan kinerja yang diukur melalui inovasi dan kualitas produk [9].

Santos et al., [10] berpendapat bahwa penyesuaian produk oleh konsumen cenderung menjadi satu variabel dalam proses manufaktur. Pabrik pintar harus dapat menyesuaikan apa yang menjadi pertimbangan setiap pelanggan dan beradaptasi dengan preferensi. Salah satu ciri utama Industri 4.0 adalah mendukung integrasi dan virtualisasi desain manufaktur dan proses produksi menggunakan informasi dan internet untuk menciptakan produk pintar.

Tao et al., [11] telah meneliti dengan munculnya teknologi informasi generasi baru dalam industri dan desain produk, era desain produk berbasis data besar (*big data*) telah tiba di masa kini. Namun, desain produk berbasis data besar lebih menekankan pada analisis data fisik. Kemajuan digital, teknologi baru yang muncul dan berkembang pesat yang menghubungkan dunia fisik dan virtual, telah menarik banyak perhatian di seluruh dunia baru-baru ini.

Rindfleisch et al., (2017) berpendapat bahwa revolusi digital telah menciptakan lingkungan yang kaya data. Semakin banyak perusahaan yang mencari dan menganalisis berbagai data konsumen seperti belanja daring, media sosial, dan perilaku penjelajahan web untuk meningkatkan aktivitas inovasi mereka [12]. Pendekatan ini disebut "Inovasi dari Data". Pada saat yang sama, semakin banyak konsumen yang mendapatkan kemampuan untuk mengubah data digital menjadi produk fisik yang inovatif melalui penggunaan alat-alat baru.

Nunes et al., [13] berpendapat bahwa perubahan mengganggu yang diakibatkan oleh Industri 4.0 berdampak pada seluruh siklus hidup produk. Dengan munculnya alat digital canggih untuk pengembangan produk dan pembuatan prototipe yang terdiri dari platform komputasi canggih. Hal ini memungkinkan kombinasi prototipe digital dan fisik.

Salomone [14] berpendapat bahwa operasi sekuensial dari tahapan fungsional ini mengakibatkan waktu pengembangan yang lama dan banyak masalah kualitas. Hal ini karena kurangnya komunikasi dan pemahaman tentang desain produk yang berbeda, manufaktur dan persyaratan pelanggan. Sedikit interaksi antara berbagai pekerjaan, kompleksitas proses desain meningkat dan membuat proses sulit untuk dikelola. Ini seperti dinding imajiner yang ada di antara fungsi ketika rekayasa menyelesaikan desain, satu fungsi akan melemparkan gambar dan spesifikasi ke dinding sehingga perencanaan proses dapat dimulai.

Vendrell-Herrero et al., [15] aliran proses linier seperti itu dapat menyebabkan proyek pengembangan produk membengkak karena umpan balik pengujian tertunda, insinyur berpegang pada gagasan buruk lebih lama dari yang seharusnya, dan masalah tidak teridentifikasi

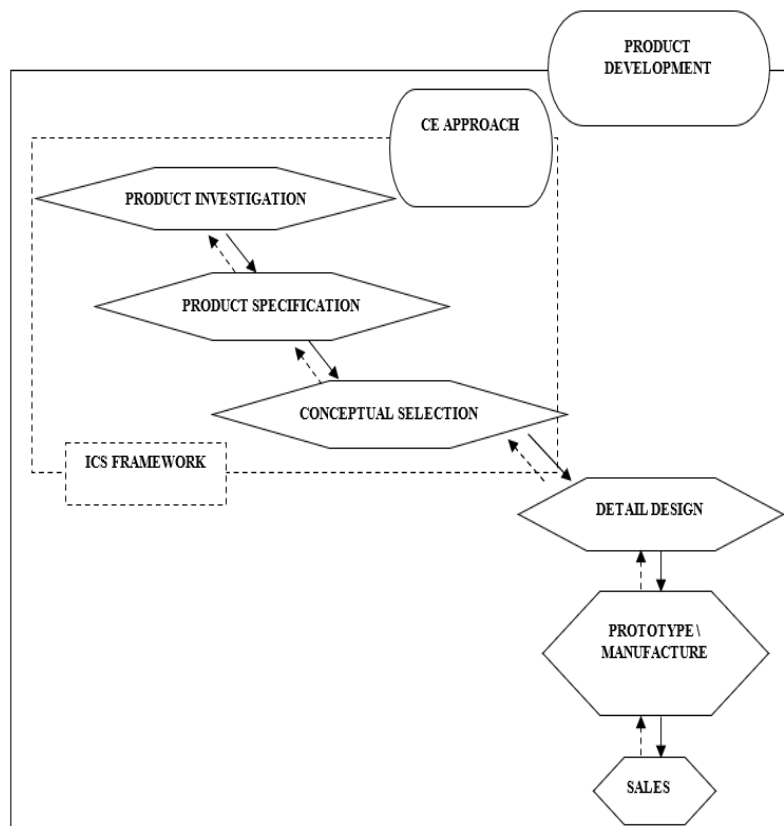
sampai mahal untuk menyelesaikannya pada fase selanjutnya.

Paczkowski [16] menganggap kesulitan ini meningkat seiring dengan material baru, proses manufaktur baru dan perhitungan teknik yang kompleks. Semuanya mengarah pada penciptaan spesialisasi dalam berbagai aspek pengembangan produk. Oleh karena itu, keperluan untuk mengelola konsep *Concurrent Engineering* (CE) dan mengembangkan pendekatan yang menggabungkan berbagai perspektif fungsional suatu produk pada tahap desain konseptual sangat penting.

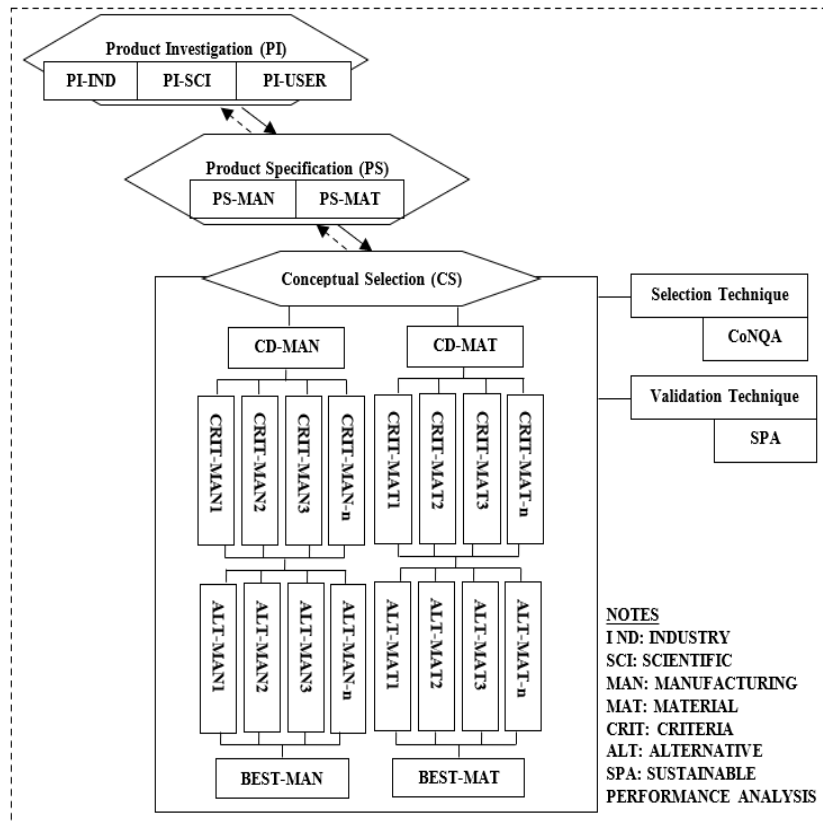
Hartley [17] berpendapat bahwa dengan CE akan secara bersamaan memeriksa masalah desain, produksi, pembelian, keuangan dan pemasaran. Dimulai dari tahap pertama perencanaan produk, pembuatan rekayasa bersamaan melakukannya dengan benar saat pertama kali menjalankan kegiatan pengembangan produk. Secara tradisional, pengembangan produk dipandang sebagai berbagai aktivitas fungsional yang dilakukan secara bertahap mulai dari pengembangan konsep hingga pengiriman produk. Pendekatan simultan adalah bagian dari CE ini adalah strategi yang melibatkan desain produk di mana perusahaan berusaha untuk mengurangi waktu yang diperlukan untuk membawa produk baru ke pasar dengan menggabungkan teknik desain, teknik manufaktur dan fungsi lainnya

Setti et al., [18] berpendapat bahwa pendekatan CE dapat mengurangi waktu tunggu pengembangan produk dan meningkatkan kualitas siklus hidup produk keseluruhan dengan menggabungkan desain dan aspek siklus hidup pengembangan produk lainnya ke dalam satu lingkungan. Hal ini dicapai dengan pertimbangan awal aspek siklus hidup pengembangan produk, yakni manufaktur, perakitan, pemeliharaan, dan pembuangan atau daur ulang. Selain itu, pendekatan CE terjadi pada aliran kerja bersamaan, aktivitas paralel dirangsang selama rilis awal informasi. Perencanaan produk, proses, dan jaminan manufaktur secara bersamaan menyangkut kemampuan manufaktur untuk dibahas dalam inovasi produk, kualitas dan harga premium dari desain akhir.

Jayaram dan Malhotra [19] meneliti bagaimana pendekatan simultan dalam strategi CE diimplementasikan melalui proses dan konkurensi produk serta pengaruhnya terhadap kinerja pengembangan produk dalam kondisi berikut lokasi produk dalam aliran keluarga, ukuran proyek, tahapan dalam siklus hidup produk, inovasi produk dan prediktabilitas permintaan pasar. Kayis et al., [20]) mengembangkan pendekatan untuk desain produk dan proses dalam proyek CE. Ini bertujuan untuk digunakan sebagai alat pendukung keputusan untuk memilih strategi mitigasi terbaik berdasarkan anggaran mitigasi yang tersedia dan tujuan proyek.



Gambar 1. Pengembangan Produk dengan Kerangka kerja ICS



Gambar 2. Detail Kerangka kerja ICS

## 2.2. Kerangka kerja Integrated Conceptual Selection (ICS)

Kerangka kerja pengembangan ini produk dibangun berdasarkan pendekatan CE di mana aktivitas paralel dirangsang dan mencakup seluruh siklus hidup produk. Pendekatan CE diterapkan secara efektif yang melibatkan produk dan proses manajemen data ditambah dengan pengetahuan teknik. Selain itu dengan menerapkan pendekatan CE, desain produk dan entitas manufaktur dikembangkan untuk membawa produk baru dengan cepat. Hal ini dapat mengurangi cacat dengan pertimbangan berulang dan substantif pada fase awal proses pengembangan produk. Melalui pertimbangan awal informasi produk, fase yang berbeda dari masalah dapat diatasi sementara pada saat yang sama parameter desain berkembang. Kerangka yang diusulkan disebut sebagai kerangka Seleksi Konseptual Terpadu atau *Integrated Conceptual Selection* (ICS). Kerangka ICS yang diusulkan digambarkan pada Gambar 1 dan Gambar 2 (detail).

## 3. Hasil dan Pembahasan

Pengembangan produk menggunakan kerangka kerja ICS mencakup fase awal dalam pengembangan produk dan sangat penting dalam menentukan keberhasilan suatu produk. Investigasi produk atau yang biasa dikenal dengan investigasi pasar adalah kegiatan mengambil informasi tren pelanggan saat ini dan masa

depan dan faktor eksternal seperti persaingan sebagai pertimbangan ketika membuat keputusan. Penggunaan informasi pasar memiliki konsekuensi positif pada pengembangan produk. Investigasi produk meliputi kegiatan mengumpulkan informasi dari tiga sumber terkemuka, ini termasuk investigasi produk di antara pengguna (PI-USER), investigasi produk dari industri (PI-IND) dan investigasi produk dari sumber ilmiah (PI-SCI).

Kasus studi dalam penelitian ini adalah; pengembangan produk rem cakram yang digunakan pada aplikasi otomotif. Investigasi produk di bawah ini diambil dari berbagai sumber yang terkait dengan rem cakram. Informasi dikumpulkan dari pengguna melalui tinjauan pendapat pelanggan tentang produk. Sedangkan informasi industri dikumpulkan melalui laporan teknis dan paten dari sektor industri. Informasi ilmiah disurvei dari makalah penelitian dan artikel dari komunitas ilmiah. Penyelidikan produk mengenai rem cakram melibatkan penelitian menyeluruh dari berbagai sumber termasuk laporan. Contoh kompilasi di bawah ini merangkum temuan dari kegiatan ini. Beberapa contoh disusun sesuai dengan petikan dan bahasa aslinya sehingga mudah untuk dikelompokkan.

”Severe friction between the brake discs and brake pads require the discs to resist fatigue cracks and deformation, improve the wear resistance.” [21]

“Brake disc weight is reduced by replacing the lightweight materials” [22]

“Develop stronger lightweight material which having high efficiency and performance.” [23]

“Poor corrosion resistance and excessive wear of brake disc material during service continue to be areas of concern.” [24]

“In order to address the diverse issues related to thermal, mechanical and structural performances of automobile disc brakes.” [25]

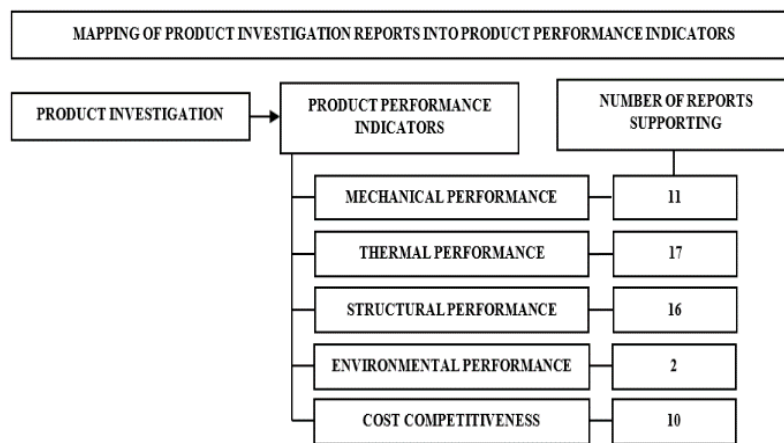
“The high wear resistance and thermal conductivity of aluminum MMC enable to substitute cast iron and steel in brake discs.”[26]

Informasi yang dikumpulkan dari investigasi produk diterjemahkan dan dipetakan ke dalam spesifikasi kinerja produk. Telah diidentifikasi lima indikator sebagai spesifikasi kinerja produk seperti yang diilustrasikan pada Gambar 3.

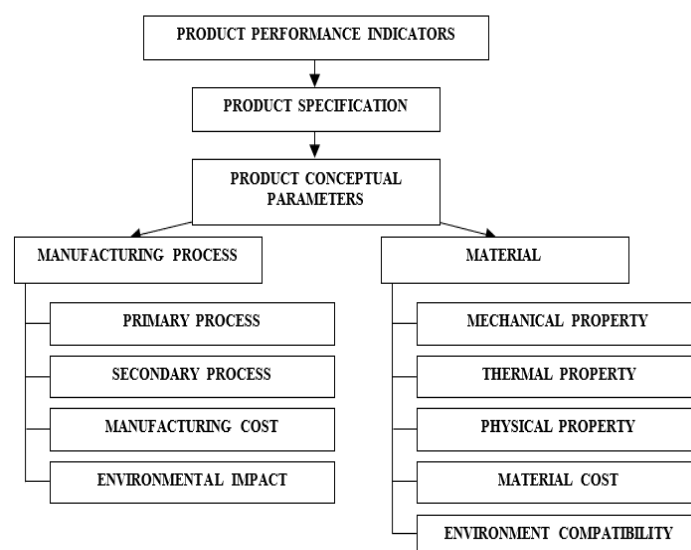
Pemetaan antara indikator kinerja produk ke dalam spesifikasi produk menunjukkan korelasi langsung dapat ditarik dan dengan demikian spesifikasi produk diidentifikasi setelah evaluasi penyelidikan produk. Itu dianggap sebagai dokumen teknis yang diatur di awal pengembangan produk yang bertindak sebagai standar persyaratan yang diperlukan untuk desain produk.

Spesifikasi desain produk dapat diklasifikasikan menjadi beberapa item, seperti, kinerja, lingkungan, pemeliharaan, dan masa pakai. Namun, dalam kerangka ini spesifikasi desain produk digabungkan dan diklasifikasikan menjadi dua parameter desain utama yang paling berpengaruh pada hasil desain konseptual.

Dengan mengidentifikasi spesifikasi produk, memungkinkan pertimbangan yang bersamaan dan komprehensif dari semua aspek desain. Dalam studi ini spesifikasi produk diterjemahkan ke dalam sembilan sub-parameter di bawah parameter konsep proses manufaktur dan bahan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 3 Pemetaan Spesifikasi Kinerja Produk



Gambar 4 Pemetaan Sub-parameter Spesifikasi Produk

#### 4. Kesimpulan

Tujuan studi ini dicapai melalui pemutakhiran pengembangan produk dengan kerangka kerja baru yang disebut sebagai Seleksi Konseptual Terpadu atau *Integrated Conceptual Selection* (ICS) yang melibatkan penyelidikan produk, spesifikasi produk dan studi konseptual. Selain itu, pendekatan Rekayasa Simultan atau *Concurrent Engineering* (CE) digunakan dalam kerangka untuk pertimbangan awal semua aspek desain. CE menggunakan aktivitas paralel untuk yang mencakup seluruh siklus hidup produk. Pendekatan CE diterapkan secara efektif yang melibatkan produk dan proses manajemen data ditambah dengan pengetahuan rekayasa. Kerangka kerja baru ICS ini menerapkan penyelidikan produk dan spesifikasi produk untuk mengekstrak semua informasi yang diperlukan untuk pengembangan produk. Kerangka kerja ini memberikan informasi mengenai kriteria atau spesifikasi teknis dan alternatif konsep untuk pengembangan produk. Kasus stufi dari ICS adalah pada pengembangan produk komponen otomotif. Dari kasus studi menunjukkan bahwa kerangka yang diusulkan menunjukkan kegunaannya dalam interpretasi kinerja produk ke dalam parameter desain konseptual. Kelanjutan dari penelitian ini adalah menggabungkan kerangka kerja ICS dengan Teknik Pengambilan Keputusan Multi Kriteria atau *Multi-criteria Decision Making* (MCDM). Teknik ini melibatkan kolaborasi antara *Concurrent Network* (CN), *Quality Function Deployment* (QFD) dan *Analytical Hierarchy Process* (AHP).

#### Daftar Rujukan

- [1] [1] Wu, L., Liu, H., & Su, K. (2020). Exploring the dual effect of effectuation on new product development speed and quality. *Journal of Business Research*, 106, 82-93.
- [2] [2] Sigsgaard, K. V., Agergaard, J. K., Mortensen, N. H., Hansen, K. B., Soleymani, I., & Khalid, W. (2020). Initiatives towards a concurrent maintenance process. *DS 101: Proceedings of Nord Design 2020*, Lyngby, Denmark, 12th-14th August 2020, 1-12.
- [3] [3] Sinha, A. K., & Anand, A. (2018). Development of Sustainable Supplier Selection Index for New Product Development Using Multi Criteria Decision Making. *Journal of Cleaner Production*, 197, 1587-1596. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.234>
- [4] [4] Benabdellah, A. C., Benghabrit, A., Bouhaddou, I., & Benghabrit, O. (2020). Design for relevance concurrent engineering approach: integration of IATF 16949 requirements and design for X techniques. *Research in Engineering Design*, 31(3), 323-351. <https://doi.org/10.1007/s00163-020-00339-4>
- [5] [5] Viswanadham, N. (2018). Performance analysis and design of competitive business models. *International Journal of Production Research*, 56 (1-2), 983-999. <https://doi.org/10.1080/00207543.2017.1406171>
- [6] [6] Cooper, R. G. (2019). The drivers of success in new-product development. *Industrial Marketing Management*, 76, 36-47. <https://doi.org/10.1016/j.indmarman.2018.07.005>
- [7] [7] Loureiro, G. B., Ferreira, J. C. E., & Messerschmidt, P. H. Z. (2020). Design structure network (DSN): a method to make explicit the product design specification process for mass customization. *Research in Engineering Design* 31, 197-220. <https://doi.org/10.1007/s00163-020-00331-y>
- [8] [8] Ciric, D., Lalic, B., Gracanin, D., Palcic, I., & Zivlak, N. (2018). Agile project management in new product development and innovation processes: challenges and benefits beyond software domain. In 2018 IEEE International Symposium on Innovation and Entrepreneurship (TEMS-ISIE), 1-9. <https://doi.org/10.1109/TEMS-ISIE.2018.8478461>
- [9] [9] Marodin, G., Frank, A. G., Tortorella, G. L., & Netland, T. (2018). Lean product development and lean manufacturing: Testing moderation effects. *International Journal of Production Economics*, 203, 301-310. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2018.07.009>
- [10] [10] Santos, K., Loures, E., Piechnicki, F., & Canciglieri, O. (2017). Opportunities assessment of product development process in Industry 4.0. *Procedia manufacturing*, 11, 1358-1365. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.07.265>
- [11] [11] Tao, F., Sui, F., Liu, A., Qi, Q., Zhang, M., Song, B., Guo, Z., Lu, S.C.Y. and Nee, A.Y.C., (2019). Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, 57, 3935-3953. <https://doi.org/10.1080/00207543.2018.1443229>
- [12] [12] Rindfleisch, A., O'Hern, M., & Sachdev, V. (2017). The digital revolution, 3D printing, and innovation as data. *Journal of Product Innovation Management*, 34, 681-690. <https://doi.org/10.1111/jpim.12402>
- [13] [13] Oliveira, J., Nunes, M., & Afonso, P. (2018, July). New product development in the context of industry 4.0: Insights from the automotive components industry. In *International joint conference on industrial engineering and operations management* (pp. 83-94). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-14973-4\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-14973-4_8)
- [14] [14] Salomone, T. A. (2019). *What every engineer should know about concurrent engineering*. Routledge.
- [15] [15] Vendrell-Herrero, F., Bustinza, O. F., & Opazo-Basaez, M. (2020). Information technologies and product-service innovation: The moderating role of service R&D team structure. *Journal of Business Research* 128, 673-687. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.01.047>
- [16] [16] Paczkowski, W. R. (2020). *Deep Data Analytics for New Product Development*. Routledge.
- [17] [17] Hartley, J. R. (2017). *Concurrent engineering: shortening lead times, raising quality, and lowering costs*. Routledge.
- [18] [18] Setti, P. H. P., Junior, O. C., & Estorilio, C. (2021). Integrated product development method based on Value Engineering and Design for Assembly concepts. *Journal of Industrial Information Integration*, 100199. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2020.100199>
- [19] [19] Jayaram, J. and Malhotra, M. K. (2010). The Differential and Contingent Impact of Concurrency on New Product Development Project Performance: A Holistic Examination. *Decision Sciences*, 41, 147-196. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5915.2009.00262.x>
- [20] [20] Kayis, B., Arndt, G., Zhou, M., Savci, S., Khoo, Y. B. and Rispler, A. (2006). Risk Quantification for New Product Design and Development in a Concurrent Engineering Environment. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55, 147-150. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60386-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60386-2)
- [21] [21] Li, W., Yang, X., Wang, S., Xiao, J., & Hou, Q. (2020). Comprehensive analysis on the performance and material of automobile brake discs. *Metals*, 10(3), 377. <https://doi.org/10.3390/met10030377>
- [22] [22] Maleque, M. A., Adebisi, A. A., & Shah, Q. H. (2012). Energy and cost analysis of weight reduction using composite brake rotor. *International Journal of Vehicle Structures & Systems*, 4(2), 69. <https://doi.org/10.4273/ijvss.4.2.06>
- [23] [23] Sharma, A. K., Bhandari, R., Aherwar, A., Rimašauskienė, R., & Pinca-Bretotean, C. (2020). A study of advancement in application opportunities of aluminum metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 26, 2419-2424. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.516>
- [24] [24] Aranke, O., Algenaid, W., Awe, S., & Joshi, S. (2019). Coatings for automotive gray cast iron brake discs: A review. *Coatings*, 9(9), 552. <https://doi.org/10.3390/coatings9090552>
- [25] [25] Afzal, A., & Mujeebu, M. A. (2019). Thermo-mechanical and structural performances of automobile disc brakes: A review of numerical and experimental studies. *Archives of*

- Computational Methods in Engineering, 26(5), 1489-1513.  
<https://doi.org/10.1007/s11831-018-9279-y>
- [26] [26] Romanov, I, Chernyshov, E., & Romanov, A. (2019). Assessment of the possibility for substituting cast iron in vehicle brake disc with Aluminum-Based Metal-matrix composite material produced by internal oxidation. Materials Today: Proceedings, 19, 2125-2128.  
<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.224>