

Towards a Framework for Early Cost Estimation Based on Process Complexity Index for Machined Components

Hendri D.S Budiono^{a,1}, Wahyu Purnawirawan^a, Jos Istiyanto^a, Gerry Liston Putra^a

^aProgram Studi Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Depok, 16424

¹hendri@eng.ui.ac.id

Abstract. Preliminary cost estimating is a pivotal element in ascertaining the competitive viability of manufacturing sectors. In the initial design phase, when comprehensive information on methods and standards remains significantly constrained, approximately 70–80% of overall manufacturing expenses are allocated. This paper presents a conceptual framework for preliminary cost assessment grounded in process complexity indices, specifically targeting machined components. The framework is constructed using a modular approach comprising three primary components: a CAD/CAM system, an analysis module, and a reference module. The CAD/CAM system module extracts geometric data from CAD models, classifies manufacturing aspects, and delineates product complexity attributes. The Analyzing Module encompasses manufacturability assessment, production duration estimation, cost calculation, and evaluations of product and process complexity. The Reference Module offers auxiliary databases, encompassing machine cost rates, labor expenses, tool specs, manufacturing process repositories, and complexity databases. The integration of these three modules facilitates more precise cost estimation, especially in the absence of specific production information. A literature analysis demonstrates that feature recognition methods—geometry-based, rule-based, graph-based, and hybrid—can be integrated to enhance this system. The suggested framework aims to enhance the reliability of early-stage design forecasts by incorporating complexity traits into cost estimates, thereby laying the groundwork for the development of more adaptive, automated cost estimation systems suited to contemporary manufacturing requirements.

Keywords: early cost estimation, process complexity, feature recognition

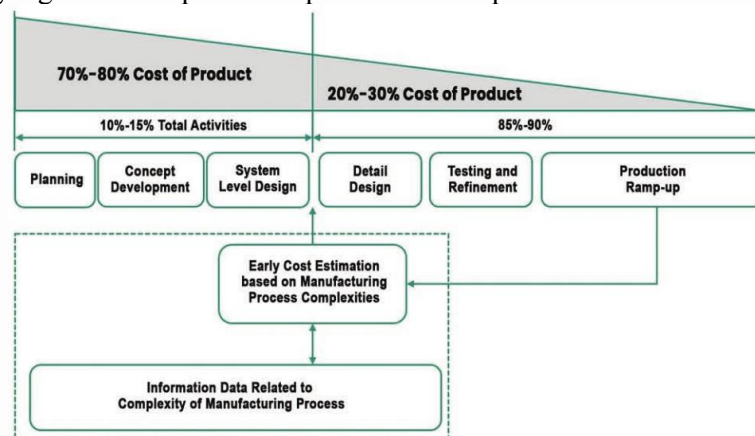
Received: 30 September 2025; **Presented:** 9 October 2025; **Publication:** 9 March 2026

DOI: <https://doi.org/10.71452/3s21w125>

PENDAHULUAN

Dalam industri manufaktur modern, kemampuan melakukan estimasi biaya secara akurat pada tahap awal pengembangan produk merupakan faktor krusial dalam menentukan daya saing perusahaan. Studi menunjukkan bahwa sekitar 70–80% dari total biaya produksi telah terkunci pada fase desain awal, sehingga keputusan yang diambil pada tahap ini

memiliki dampak signifikan terhadap profitabilitas produk. Ironisnya, justru pada fase awal pengembangan, informasi detail desain masih sangat terbatas, padahal kebutuhan akan estimasi biaya yang andal sangat mendesak untuk mendukung pengambilan keputusan strategis, sebagaimana dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1 Estimasi biaya awal yang mempertimbangkan kompleksitas proses manufaktur [1]

Tantangan utama dalam estimasi biaya tahap awal terletak pada kompleksitas dalam mengidentifikasi dan mengkuantifikasi faktor-faktor yang memengaruhi biaya manufaktur. Kompleksitas produk tidak hanya ditentukan oleh geometri komponen, melainkan juga

oleh interaksi antarfitur desain, proses manufaktur yang diperlukan, serta persyaratan teknis yang harus dipenuhi. Metode estimasi biaya konvensional—seperti analogi, parametrik, maupun pendekatan bottom-up—sering kali bergantung pada data historis

yang ekstensif atau informasi detail yang belum tersedia pada tahap awal desain.

Sebagai respons terhadap keterbatasan tersebut, berbagai pendekatan telah dikembangkan. Salah satunya adalah *feature-based costing*, yang memandang produk sebagai kumpulan fitur geometris dengan kontribusi biaya spesifik. Meskipun menjanjikan, implementasi praktis pendekatan ini masih menghadapi kendala, khususnya dalam otomatisasi pengenalan fitur serta pengembangan model kompleksitas yang komprehensif.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan suatu framework konseptual untuk estimasi biaya tahap awal komponen permesinan berbasis indeks kompleksitas proses. Lingkup pengembangannya mencakup:

1) Metode Feature Recognition: mengeksplorasi teknik pengenalan fitur otomatis dari model CAD, baik berbasis geometri, *graph-based*, *rule-based*, maupun pendekatan hibrid, dengan mempertimbangkan jenis fitur umum pada komponen permesinan serta tingkat akurasi yang dicapai.

2) Model Kompleksitas: menginvestigasi model kuantifikasi kompleksitas produk dan proses, mulai dari pendekatan entropi informasi hingga faktor kualitatif seperti tingkat kesulitan manufaktur dan kebutuhan keahlian khusus.

3) Integrasi Data CAD: mengevaluasi efektivitas berbagai format pertukaran data (STL, STEP, IGES, maupun format *proprietary*) dalam mengekstraksi informasi geometris dan topologis yang relevan untuk analisis kompleksitas.

4) Model Estimasi Biaya: merancang konsep estimasi yang mengintegrasikan indeks kompleksitas dengan komponen biaya langsung dan tidak langsung, menggunakan pendekatan regresi empiris, *machine learning*, ataupun model analitis.

Framework konseptual yang diusulkan diharapkan dapat menjadi landasan bagi pengembangan sistem estimasi biaya yang lebih adaptif terhadap kebutuhan industri manufaktur modern. Dengan mengintegrasikan analisis kompleksitas ke dalam estimasi biaya, prediksi yang dihasilkan akan lebih akurat dan dapat diandalkan, bahkan ketika informasi desain masih terbatas pada tahap awal.

METODOLOGI

Pengembangan framework konseptual untuk estimasi biaya tahap awal berbasis indeks kompleksitas proses dilakukan melalui pendekatan eksploratori dan analitis. Metodologi ini dirancang untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, serta mengintegrasikan berbagai komponen yang diperlukan dalam membangun framework yang komprehensif dan adaptif.

Studi Literatur dan Analisis Komparatif

Tahap awal penelitian melibatkan kajian mendalam terhadap literatur untuk mengidentifikasi metode dan model yang relevan. Analisis komparatif difokuskan pada tiga aspek utama:

a. Metode Feature Recognition

Beberapa pendekatan dievaluasi untuk menilai potensinya dalam mendukung pengenalan fitur otomatis, meliputi:

- Metode *slicing* dan *grouping* untuk model berbasis mesh (STL),
- Pendekatan *rule-based* dengan aturan eksplisit,
- Metode hibrid (kombinasi *graph-based* dan *rule-based*),
- Pendekatan geometris berbasis *Boundary Representation* (B-Rep),
- Metode berbasis AI dan *case-based reasoning*.

b. Model Kompleksitas [2]

Berbagai model kuantifikasi kompleksitas dievaluasi, antara lain:

- Model entropi informasi untuk mengukur total informasi produk,
- *Diversity ratio* untuk menilai variasi fitur,
- Koefisien kompleksitas relatif berdasarkan tingkat kesulitan manufaktur.

c. Teknik Estimasi Biaya

Pendekatan estimasi biaya yang ditinjau mencakup *feature-based costing* serta integrasinya dengan indeks kompleksitas, dengan fokus pada keterbatasan informasi pada tahap awal desain.

Pengembangan Framework Konseptual

Framework dikembangkan secara modular melalui tiga komponen utama:

a. Modul CAD/CAM System

- Identifikasi format data CAD yang optimal (STEP, IGES, STL),
- Perancangan struktur *Form Feature Library*,
- Konseptualisasi *Product Complexity Attributes*.

b. Modul Analisis

- Perancangan alur *Feature Manufacturability Analysis*,
- Pengembangan konsep *Manufacturing Time Estimation*,
- Formulasi *Product* dan *Process Complexity Analysis*.

c. Modul Referensi

- Penyusunan *Manufacturing Cost File Database*,

- Spesifikasi *Feature Manufacturing Process Library*,
- Perancangan *Complexity Database*.

Metodologi ini dirancang secara iteratif sehingga memungkinkan penyempurnaan berkelanjutan berdasarkan temuan di setiap tahap penelitian. Dengan demikian, framework konseptual yang dihasilkan diharapkan robust, fleksibel, serta mampu diadaptasi sesuai kebutuhan spesifik industri manufaktur komponen permesinan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Slicing dan Grouping

Metode *slicing* dan *grouping* merupakan salah satu pendekatan yang banyak digunakan untuk mengenali fitur pada model berbasis *mesh* (umumnya STL). Prinsip dasarnya adalah membagi model 3D ke dalam irisan (*slices*) menurut arah tertentu, biasanya searah dengan sumbu utama atau berdasarkan orientasi normal facet. Setiap facet pada model 3D memiliki vektor normal yang merepresentasikan orientasi permukaan. Facet-facet dengan arah normal yang serupa kemudian dikelompokkan (*grouping*) menjadi satu region. Metode *slicing* dan *grouping* pada model *mesh* umumnya dilakukan dengan prinsip *normal vector clustering* yang telah banyak digunakan dalam studi segmentasi *mesh* [3].

Tahap berikutnya adalah analisis hubungan antarregion. Hubungan ini ditentukan melalui topologi, misalnya dengan mengevaluasi sudut antarpermukaan yang bersebelahan. Jika sudut antarregion membentuk cekungan (*concave*), maka kemungkinan besar fitur tersebut adalah slot, pocket, atau depression. Sebaliknya, apabila sudutnya cenderung membentuk tonjolan (*convex*), maka fitur dapat diidentifikasi sebagai protrusion atau step. Dengan demikian, kombinasi *slicing* dan *grouping* mampu mengenali fitur prismatic seperti slot, step, atau pocket pada model berbasis triangular mesh.

Kelebihan metode ini terletak pada kesederhanaan representasi model STL dan efisiensi dalam mendeteksi fitur prismatic. Hal ini sesuai dengan kebutuhan di tahap awal desain, di mana data CAD sering tersedia dalam bentuk mesh hasil konversi atau pemindaian (*scanned model*). Namun, keterbatasannya adalah sensitivitas terhadap kualitas mesh: semakin kasar (*low-resolution mesh*), semakin besar kemungkinan terjadinya kesalahan deteksi fitur karena distorsi facet dan ambiguitas orientasi normal.

Rule-Based dalam Feature Recognition

Metode rule-based merupakan salah satu pendekatan paling awal dan paling luas digunakan dalam *feature recognition* (FR) untuk menghubungkan model desain

dengan informasi manufaktur. Prinsip dasar metode ini adalah mendefinisikan fitur melalui seperangkat aturan eksplisit (*if-then rules*) yang menghubungkan aspek geometri, seperti orientasi normal dan bentuk permukaan, dengan aspek topologi, yaitu hubungan antarpermukaan. Misalnya, sebuah slot dapat dikenali apabila terdapat satu permukaan dasar berbentuk planar yang bersebelahan dengan dua permukaan dinding sejajar yang memiliki arah normal tertentu. Demikian pula, sebuah hole dapat diidentifikasi jika terdapat permukaan silindris yang menembus permukaan planar dengan relasi konkav tertentu. Pendekatan deterministik semacam ini telah diperkenalkan sejak akhir 1980-an untuk mendukung konsep *design-by-feature* yang memungkinkan integrasi lebih erat antara CAD dan CAM [4].

Untuk mengimplementasikan aturan eksplisit tersebut, penelitian selanjutnya mengembangkan struktur data berbasis graf yang mampu merepresentasikan relasi antarpermukaan. Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah Base Explicit Feature Graph (BEFG), di mana simpul merepresentasikan permukaan (*faces*), sedangkan sisi merepresentasikan hubungan spasial antarpermukaan. Dengan mekanisme relasi *parent-child*, sistem dapat menelusuri kombinasi permukaan tertentu untuk memverifikasi apakah sesuai dengan definisi suatu fitur [5]. Dalam perkembangannya, varian graf lain yaitu Non-BEFG (NEFG), diperkenalkan untuk menyederhanakan representasi dengan mengurangi eksplisitasi relasi, sehingga lebih efisien ketika digunakan untuk mengevaluasi fitur kompleks. Pendekatan ini memungkinkan proses deteksi awal yang lebih cepat sebelum diverifikasi lebih lanjut melalui aturan yang lebih rinci [6].

Kelebihan utama metode *rule-based* adalah kemudahan implementasi dan fleksibilitasnya. Aturan yang digunakan dapat dirancang secara modular, sehingga memudahkan perluasan sistem untuk mengakomodasi jenis fitur baru. Dengan demikian, metode ini sangat cocok digunakan untuk fitur sederhana yang umum ditemukan pada komponen prismatic, seperti slot, pocket, step, atau hole [7]. Namun demikian, keterbatasan metode ini mulai terlihat ketika berhadapan dengan fitur yang lebih kompleks, terutama dengan kontur bebas (*freeform features*). Jumlah aturan yang diperlukan meningkat secara eksponensial, sehingga sistem menjadi sulit dikelola dan bergantung penuh pada kelengkapan serta konsistensi aturan yang telah ditentukan sejak awal [6]. Meskipun demikian, rule-based recognition tetap menjadi fondasi penting dalam pengembangan metode *feature recognition* modern, sekaligus menjadi titik awal bagi pendekatan berbasis graf maupun

kecerdasan buatan yang berkembang pesat dalam dekade terakhir.

Graph-based dan hybrid

Metode *graph-based* dalam *feature recognition* berkembang sebagai solusi terhadap keterbatasan pendekatan *rule-based* yang cenderung kaku dan sulit beradaptasi pada fitur kompleks. Inti dari metode ini adalah representasi model CAD dalam bentuk graf, di mana simpul (nodes) merepresentasikan entitas geometri seperti permukaan (*faces*) atau tepi (*edges*), sedangkan sisi (*edges of the graph*) merepresentasikan hubungan topologi seperti keterhubungan, kebertetanggaan, atau sudut antarpermukaan. Salah satu representasi paling umum adalah *Attributed Adjacency Graph* (AAG), di mana setiap simpul diberi atribut yang mendeskripsikan sifat geometri (planar, silindris, dsb.), dan setiap sisi diberi atribut yang menunjukkan jenis koneksi (concave, convex, atau tangential). Dengan cara ini, proses *feature recognition* menjadi masalah pencocokan subgraf (*subgraph isomorphism*), yaitu pencarian pola graf tertentu yang sesuai dengan definisi sebuah fitur [5, 8].

Kelebihan utama metode ini adalah fleksibilitas dan kemampuan dalam menangani fitur-fitur kompleks, termasuk interaksi antarfitur yang saling tumpang tindih. Namun demikian, tantangan utama terletak pada kompleksitas komputasi. Pencocokan subgraf pada AAG merupakan masalah NP-complete, sehingga waktu komputasi dapat meningkat tajam seiring dengan bertambahnya jumlah simpul dan sisi dalam model. Oleh karena itu, banyak penelitian mengusulkan algoritma optimasi dan heuristik untuk mempercepat proses pencarian pola graf, sehingga metode ini dapat diterapkan pada komponen industri nyata [6].

Metode *hybrid* lahir sebagai pendekatan yang menggabungkan keunggulan *rule-based* dan *graph-based*, dengan tujuan meningkatkan akurasi sekaligus menjaga efisiensi. Dalam metode ini, graf seperti AAG atau BEFG digunakan sebagai representasi dasar untuk menangkap relasi topologi dan geometri secara menyeluruh, sementara seperangkat aturan eksplisit digunakan untuk mempercepat proses verifikasi dan mengurangi beban pencocokan pola. Dengan cara ini, proses pengenalan fitur dilakukan secara dua tahap: pertama, sistem mengidentifikasi kandidat fitur melalui pencarian pola graf, kemudian kandidat tersebut diverifikasi melalui aturan deterministik untuk memastikan kesesuaiannya [6].

Pendekatan *hybrid* terbukti lebih efektif dalam menangani fitur interaktif maupun fitur yang kompleks, karena graf memberikan fleksibilitas tinggi dalam representasi, sementara aturan eksplisit memastikan hasil yang konsisten dan mudah ditafsirkan. Selain itu, beberapa penelitian mutakhir

juga mengintegrasikan metode berbasis kecerdasan buatan, seperti *case-based reasoning* dan *machine learning*, ke dalam kerangka hybrid untuk meningkatkan kemampuan adaptasi terhadap variasi desain dan fitur non-prismatik [9]. Dengan demikian, metode *hybrid* dianggap sebagai pendekatan transisi yang menghubungkan metode tradisional dengan generasi baru *feature recognition* yang semakin cerdas dan otomatis.

Geometry-based

Metode *geometry-based* merupakan pendekatan paling mendasar dalam *feature recognition* yang bekerja langsung pada representasi geometri model CAD, seperti *Boundary Representation* (B-Rep) atau *Constructive Solid Geometry* (CSG). Inti dari metode ini adalah mengidentifikasi fitur manufaktur dengan menganalisis atribut geometris permukaan, seperti bentuk (planar, silindris, konis, atau toroidal), arah normal, ukuran dimensi, serta hubungan spasial antarpermukaan. Sebagai contoh, sebuah *hole* dapat dikenali apabila sistem mendeteksi keberadaan permukaan silindris yang menembus permukaan planar, sementara sebuah slot diidentifikasi ketika terdapat kombinasi permukaan planar yang membentuk dinding sejajar dengan relasi konkav tertentu [10].

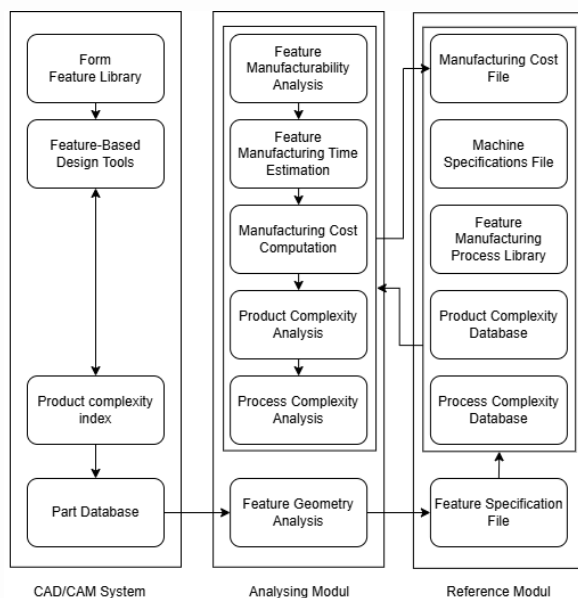
Pendekatan ini menekankan analisis langsung terhadap geometri tanpa perantara struktur data tambahan yang kompleks. Oleh karena itu, metode ini sering dianggap sebagai fondasi bagi perkembangan metode lainnya. Pada metode *rule-based*, atribut geometri dijadikan dasar untuk membangun seperangkat aturan eksplisit yang mendefinisikan fitur. Demikian pula pada metode *graph-based*, informasi geometris disimpan sebagai atribut simpul dalam graf, sedangkan hubungan topologis antarpermukaan didefinisikan melalui sisi graf [6]. Dengan kata lain, baik *rule-based* maupun *graph-based* sesungguhnya merupakan perluasan dari prinsip *geometry-based*, di mana logika aturan atau struktur graf ditambahkan untuk meningkatkan fleksibilitas representasi.

Kelebihan utama metode *geometry-based* adalah kesederhanaannya dalam mengenali fitur-fitur dasar seperti slot, hole, step, maupun pocket, serta kompatibilitasnya dengan format representasi CAD yang paling umum digunakan. Namun, metode ini juga memiliki keterbatasan signifikan. Ketika fitur semakin kompleks, terutama dengan kontur bebas (*freeform features*) atau fitur yang saling berinteraksi, metode ini kesulitan melakukan identifikasi karena hanya mengandalkan analisis langsung terhadap bentuk geometri. Hal ini menyebabkan potensi kebingungan dalam membedakan fitur yang mirip secara geometri tetapi berbeda dalam konteks manufaktur [9]. Meskipun demikian, metode *geometry-based* tetap

memainkan peran penting sebagai dasar konseptual dalam feature recognition, sekaligus sebagai titik awal untuk pengembangan pendekatan yang lebih canggih seperti *rule-based*, *graph-based*, dan *hybrid*.

Conceptual Framework

Gambar 1 menunjukkan rancangan framework konseptual estimasi biaya tahap awal berbasis indeks kompleksitas proses, diadaptasi berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Ou-Yang [11], yang terdiri atas tiga modul utama: *CAD/CAM System*, *Analysing Module*, dan *Reference Module*. Ketiga modul ini saling terhubung dan membentuk alur integratif mulai dari data geometris produk hingga keluaran berupa estimasi biaya manufaktur.



Gambar 1 *Conceptual Framework Model Estimasi Biaya*

1) Modul CAD/CAM System

a) Identifikasi Format Data CAD yang Optimal (STEP, IGES, STL)

STEP (ISO 10303):

Merupakan format standar internasional untuk pertukaran data produk. STEP menyimpan informasi geometri, topologi, dan atribut non-geometri (misalnya toleransi, material, serta relasi antarfitur). STEP dianggap format paling komprehensif untuk mendukung feature recognition karena mampu menyimpan Boundary Representation (B-Rep) secara lengkap.

IGES (Initial Graphics Exchange Specification):

Format lama yang masih digunakan, terutama untuk transfer geometri kurva dan permukaan. IGES memiliki keterbatasan karena kurang baik dalam

menyimpan relasi topologi antarpermukaan, sehingga tidak selalu optimal untuk analisis kompleksitas.

STL (Stereolithography):

Format berbasis triangular mesh yang umum digunakan dalam rapid prototyping dan additive manufacturing. STL hanya menyimpan informasi facet segitiga (normal, vertex), tanpa data topologi yang kaya. Namun, tetap berguna untuk metode *slicing & grouping* dalam analisis fitur prismatic pada model facet.

STEP dipilih sebagai format utama untuk integrasi CAD/CAM dalam framework ini, dengan IGES dan STL sebagai format pendukung sesuai kebutuhan aplikasi tertentu.

b) Perancangan Struktur Form Feature Library

Form Feature Library adalah kumpulan fitur geometris standar yang didefinisikan berdasarkan bentuk dasar (slot, pocket, hole, step, cylinder, notch, depression, dll.) beserta parameter atributnya (panjang, lebar, diameter, kedalaman, toleransi).

Perpustakaan ini berfungsi sebagai referensi formal untuk melakukan *mapping* antara data CAD dengan kategori fitur manufaktur [12].

Struktur library dirancang secara hierarkis, misalnya:

- Class I – *Rotational Features*: step, cylinder
- Class II – *Prismatic Features*: slot, stair
- Class III – *Slab Features*: pocket, notch, depression
- Class IV – *Revolving Features*: hole

Setiap entri dalam library tidak hanya berisi definisi geometri, tetapi juga atribut manufaktur terkait, seperti jenis proses (*milling*, *drilling*, *turning*), alat potong yang digunakan, serta estimasi waktu operasi standar.

c) Konseptualisasi *Product Complexity Attributes*

Atribut kompleksitas produk (*Product Complexity Attributes*) merupakan indikator kuantitatif yang digunakan untuk mengukur tingkat kesulitan manufaktur suatu desain.

Konsep ini dibangun dari beberapa dimensi utama:

- *Shape*: berdasarkan jumlah permukaan, jenis geometri, dan tingkat variasi kontur.
- *Dimension*: berdasarkan rasio dimensi fitur (misalnya panjang/diameter, kedalaman/lebar).
- *Tolerance*: berdasarkan tingkat akurasi geometris yang dituntut (mengacu pada standar ISO 2768).
- *Process Complexity*: berdasarkan jumlah setup, jenis operasi, dan urutan proses yang diperlukan.

Setiap atribut diberi bobot tertentu sehingga dapat digabungkan menjadi indeks kompleksitas produk (*Product Complexity Index*, PCI). Indeks ini menjadi parameter utama untuk menghubungkan model CAD dengan estimasi biaya manufaktur pada tahap awal desain.

2) Analysing Module

a) *Feature Manufacturability Analysis*

Analisis ini bertujuan mengevaluasi sejauh mana sebuah fitur dapat diproduksi dengan proses manufaktur yang tersedia. Tahapan analisis meliputi:

- Mapping Fitur ke Proses: Setiap fitur yang diidentifikasi dari CAD (misalnya *hole*, *slot*, *pocket*) dipetakan ke proses manufaktur standar (*drilling*, *milling*, *turning*, dsb.).
- Evaluasi Keterbatasan Mesin: Analisis dilakukan terhadap kemampuan mesin (dimensi meja kerja, kecepatan spindel, feed rate) untuk menentukan kelayakan produksi fitur tersebut.
- Analisis *Tool Accessibility*: Mengevaluasi apakah fitur dapat dicapai oleh alat potong tanpa mengalami interferensi.
- Output: Fitur diklasifikasikan sebagai *feasible*, *difficult*, atau *non-feasible*, sehingga memberikan umpan balik dini kepada perancang.

b) *Feature Manufacturing Time Estimation*

Modul ini menghitung estimasi waktu yang dibutuhkan untuk memproduksi setiap fitur. Estimasi dilakukan dengan mempertimbangkan:

- Parameter geometri: Dimensi fitur seperti panjang, lebar, kedalaman, atau diameter yang menentukan waktu pemotongan.
- Parameter Proses: Kecepatan potong (*cutting speed*), laju pemakanan (*feed rate*), dan kedalaman potong.
- Tool Path dan Setup Time: Waktu persiapan (*tool setup*, *workpiece setup*) serta panjang lintasan pemotongan.
- Model Perhitungan: Waktu total = waktu pemotongan + waktu pergantian alat + waktu setup.

Hasil analisis berupa estimasi waktu tiap fitur yang kemudian dijumlahkan untuk memperoleh waktu manufaktur total produk.

c) *Manufacturing Cost Computation*

Berdasarkan hasil estimasi waktu, biaya manufaktur dihitung melalui integrasi komponen biaya langsung dan tidak langsung:

- Biaya Tenaga Kerja: dihitung dari waktu proses $\times$ tarif upah tenaga kerja per jam.

- Biaya Mesin: dihitung dari waktu penggunaan mesin $\times$ tarif biaya mesin per jam (termasuk listrik, depresiasi).
- Biaya Tooling: mempertimbangkan umur pahat, frekuensi penggantian, dan harga per unit pahat.

Dengan cara ini, modul menyediakan estimasi biaya awal meskipun detail teknis produksi belum sepenuhnya tersedia.

d) *Product Complexity Analysis*

Analisis ini bertujuan mengukur indeks kompleksitas produk (*Product Complexity Index*, CI) berdasarkan atribut fitur yang telah diidentifikasi:

- *Shape Score*: dihitung dari variasi bentuk geometri.
- *Dimension Score*: berbasis rasio panjang, lebar, kedalaman, atau diameter fitur.
- *Tolerance Score*: ditentukan oleh tingkat akurasi geometris yang disyaratkan.
- *Entropy Score*: berbasis diversitas informasi (jumlah variasi fitur dalam satu produk).

Hasil analisis ini berupa nilai CI yang mencerminkan tingkat kesulitan produk dari sisi geometri dan spesifikasi teknis.

e) *Process Complexity Analysis*

Selain kompleksitas produk, modul juga mengevaluasi kompleksitas proses (*Process Complexity Index*, PI). Indeks ini mengukur seberapa rumit proses manufaktur yang diperlukan, dengan indikator:

- Jumlah Setup: semakin banyak pergantian posisi benda kerja, semakin tinggi kompleksitas.
- Jumlah dan Variasi Proses: kombinasi *milling*, *drilling*, *turning*, dsb.
- Tool Variety: jumlah dan jenis pahat yang diperlukan.

Nilai PI membantu menilai apakah produk dapat diproduksi dengan efisien atau memerlukan strategi manufaktur yang lebih kompleks.

3) *Reference Module*

Reference Module berfungsi sebagai basis data dan sumber pengetahuan yang mendukung seluruh proses analisis dalam framework. Modul ini memastikan bahwa setiap estimasi waktu, biaya, maupun kompleksitas didasarkan pada data aktual dan parameter teknis yang valid. Komponen utama dalam *Reference Module* meliputi:

a) *Manufacturing Cost File*

File ini menyimpan data biaya dasar yang diperlukan dalam perhitungan estimasi, antara lain:

- Tarif biaya mesin per jam: mencakup depresiasi mesin, biaya energi listrik, serta perawatan rutin.
- Upah tenaga kerja per jam: mengacu pada standar UMR/UMP lokasi pabrik.
- Biaya tooling: meliputi harga pahat, umur pakai rata-rata, serta biaya per siklus pemotongan.

Dengan adanya file ini, sistem dapat melakukan cost computation yang lebih realistis pada tahap awal desain.

b) *Machine Specifications File*

File ini memuat parameter teknis mesin yang digunakan dalam proses manufaktur, antara lain:

- Kapasitas mesin (dimensi meja kerja, kecepatan spindel, daya motor).
- Batasan teknis (maksimum *feed rate*, kedalaman potong, sudut pahat yang kompatibel).
- Tingkat presisi dan akurasi mesin.

Data ini menjadi acuan dalam *Feature Manufacturability Analysis*, sehingga sistem dapat mengevaluasi apakah fitur dapat diproduksi oleh mesin tertentu atau membutuhkan peralatan khusus.

c) *Feature Manufacturing Process Library*

Merupakan perpustakaan proses manufaktur yang menghubungkan jenis fitur dengan proses yang sesuai. Misalnya:

- *Hole* → *Drilling, Boring*
- *Slot* → *Milling (end milling/side milling)*
- *Pocket* → *Face milling, Pocket milling*
- *Cylinder/Step* → *Turning (lathe operation)*

Library ini juga memuat parameter standar proses seperti kecepatan potong, *feed rate*, dan jenis pahat. Dengan demikian, setiap fitur yang dikenali dapat langsung dipetakan ke proses manufaktur spesifik.

d) *Product Complexity Database*

Database ini menyimpan nilai kompleksitas produk dari berbagai studi kasus atau komponen sebelumnya. Informasi ini digunakan untuk:

- Kalibrasi perhitungan *Product Complexity Index (PCI)*.
- Benchmarking antara produk baru dan produk yang sudah pernah diproduksi.
- Validasi konsistensi hasil analisis kompleksitas.

e) *Process Complexity Database*

Database ini berfungsi untuk mendukung analisis kompleksitas proses. Isinya berupa data historis terkait:

- Jumlah setup rata-rata untuk jenis fitur tertentu.
- Variasi proses yang umum digunakan untuk kombinasi fitur.
- Kebutuhan fixture atau perlengkapan tambahan.

Data ini memungkinkan sistem menghitung *Process Complexity Index (PI)* dengan mempertimbangkan pengalaman manufaktur nyata.

f) *Feature Specification File*

File ini menyimpan spesifikasi teknis untuk setiap fitur, termasuk:

- Dimensi standar (misalnya toleransi lubang, kedalaman slot).
- Persyaratan kualitas permukaan (misalnya *surface roughness*).
- Standar ISO terkait toleransi geometris.

Dengan adanya file ini, analisis toleransi dan kualitas dapat dilakukan secara sistematis pada tahap perhitungan kompleksitas.

Secara keseluruhan, diagram ini menunjukkan bagaimana integrasi antara data CAD, analisis kompleksitas, dan basis data manufaktur dapat menghasilkan sistem estimasi biaya tahap awal yang komprehensif. Framework ini tidak hanya mendukung pengambilan keputusan yang lebih cepat pada fase desain awal, tetapi juga membantu meningkatkan akurasi prediksi biaya meskipun detail teknis proses produksi belum sepenuhnya tersedia.

KESIMPULAN

Penelitian ini mengusulkan sebuah framework konseptual untuk estimasi biaya tahap awal berbasis indeks kompleksitas proses pada komponen permesinan. Framework dikembangkan secara modular, terdiri atas tiga blok utama: CAD/CAM System, Analysing Module, dan Reference Module, yang saling terintegrasi untuk menghasilkan estimasi biaya yang lebih akurat meskipun informasi desain pada tahap awal masih terbatas.

Hasil kajian literatur menunjukkan bahwa metode *feature recognition* - baik *geometry-based*, *rule-based*, *graph-based*, maupun *hybrid* - dapat diintegrasikan ke dalam sistem untuk mengidentifikasi fitur manufaktur secara otomatis dari model CAD. Selanjutnya, atribut kompleksitas produk dan proses didefinisikan melalui dimensi bentuk, ukuran, toleransi, serta jumlah setup dan variasi operasi, yang kemudian dirumuskan ke dalam indeks kompleksitas. Integrasi indeks ini dengan perhitungan waktu dan biaya manufaktur memungkinkan estimasi awal yang lebih representatif terhadap kondisi nyata.

Framework yang diusulkan bersifat fleksibel, adaptif, dan dapat diperluas sesuai dengan kebutuhan spesifik industri. Dengan menggabungkan analisis kompleksitas ke dalam estimasi biaya, pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan akurasi prediksi, mendukung pengambilan keputusan strategis pada tahap desain awal, serta memberikan landasan bagi pengembangan sistem estimasi biaya yang lebih cerdas dan otomatis di masa depan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terima kasih kepada Fakultas Teknik Universitas Indonesia (FTUI) melalui program Seed Funding yang telah memberikan dukungan pendanaan dalam penelitian ini.

KONTRIBUSI PENULIS

Hendri D.S. Budiono: menggagas ide penelitian dan memberikan supervisi selama proses penelitian dan penulisan. Wahyu Purnawirawan: melakukan analisis, menyusun metodologi, serta menulis draf paper. Jos Istiyanto: Memberikan review khususnya berkaitan dengan alternatif metode yang banyak digunakan, memberikan koreksi, serta menyempurnakan naskah untuk publikasi. Gerry Liston Putra: Memberikan review dari sisi perancangan dan masukan dalam penelitian serta penulisan paper.

DANA PENELITIAN

Penelitian ini didukung oleh Seed Funding Fakultas Teknik Universitas Indonesia (FTUI) melalui skema pendanaan riset internal. Dukungan ini sangat membantu dalam pelaksanaan penelitian.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. D. S. Budiono, G. Kiswanto, and T. P. Soemardi, "Method and Model Development for Manufacturing Cost Estimation during the Early Design Phase Related to the Complexity of the Machining Processes," *International Journal of Technology*, vol. 5, no. 2, 2014, doi: 10.14716/ijtech.v5i2.402.
- [2] W. H. ElMaraghy, & Urbanic, R. J., "Modelling of Manufacturing Systems Complexity," *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, vol. 52(1), pp. p. 363-366, 2003.
- [3] X. Zhang and L. Huang, "Automatic recognition of features from CAD models for mesh generation," *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, Article vol. 46, no. 1, pp. 322-327, 2012.
<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-84874526711&partnerID=40&md5=b13d00ed9efebc7db7930f9246d83a56>.
- [4] J. J. Shah and M. T. Rogers, "Functional Requirements And Conceptual Design Of The Feature-Based Modelling System," *Computer-aided engineering journal*, Article vol. 5, no. 1, pp. 9-15, 1988, doi: 10.1049/cae.1988.0004.
- [5] J. H. Vandenbrande and A. A. G. Requicha, "Spatial Reasoning for the Automatic Recognition of Machinable Features in Solid Models," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Article vol. 15, no. 12, pp. 1269-1285, 1993, doi: 10.1109/34.250845.
- [6] J. Han, M. Pratt, and W. C. Regli, "Manufacturing feature recognition from solid models: A status report," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Article vol. 16, no. 6, pp. 782-796, 2000, doi: 10.1109/70.897789.
- [7] S. K. Gupta and D. S. Nau, "Systematic approach to analysing the manufacturability of machined parts," *Computer-Aided Design*, Article vol. 27, no. 5, pp. 323-342, 1995, doi: 10.1016/0010-4485(95)96797-P.
- [8] S. Joshi and T. C. Chang, "Graph-based heuristics for recognition of machined features from a 3D solid model," *Computer-Aided Design*, Article vol. 20, no. 2, pp. 58-66, 1988, doi: 10.1016/0010-4485(88)90050-4.
- [9] S. Subrahmanyam and M. Wozny, "An overview of automatic feature recognition techniques for computer-aided process planning," *Computers in Industry*, Article vol. 26, no. 1, pp. 1-21, 1995, doi: 10.1016/0166-3615(95)80003-4.
- [10] J. M. Shah, M., *Parametric and Feature-Based CAD/CAM: Concepts, Techniques, and Applications*. New York: Wiley-Interscience, 1995.
- [11] C. Ou-Yang, Lin, T.S., "Developing an Integrated Framework for Feature-based Early Manufacturing Cost Estimation," *International Journal Advanced Manufacturing Technology*, vol. 13, pp. 618-629, 1997. Springer-Verlag London Limited.
- [12] J. Y. Jung, "Manufacturing Cost Estimation for Machined Parts Based on Manufacturing Features," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 13, no. 4, pp. 227-238, 2002, doi: 10.1023/A:1016092808320.