

Perhitungan Kompleksitas Proses *Sand Casting* dengan Pembuatan *Core* secara Otomatis melalui Perangkat Lunak Sederhana berbasis *Labview* untuk Otomasi Perhitungan Studi kasus: Komponen Pompa

Ridani Faulika^{1,a*}, Hendri Dwi Saptioratri Budiono^{1,b}

¹Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia, Depok 16424, Indonesia

^aridani.faulika@live.com, ^bhendri@eng.ui.ac.id

Abstrak

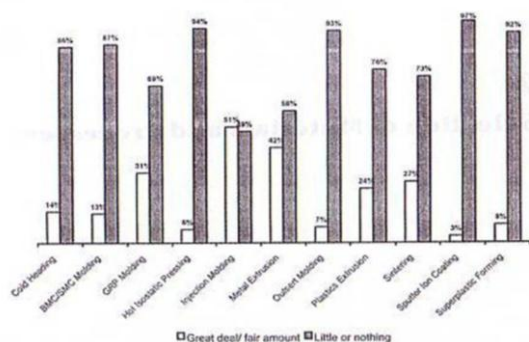
Perkembangan teknologi manufaktur saat ini telah melahirkan banyak jenis proses yang dapat digunakan dalam memproduksi suatu produk. Hal ini memberi manfaat tersendiri kepada para desainer, sehingga terdapat banyak alternatif yang dapat digunakan untuk memproduksi produk rancangan mereka. Akan tetapi, menurut Boothroyd, terdapat kecenderungan bahwa para perancang tersebut hanya menggunakan pilihan proses manufaktur yang familiar. Sebagai konsekuensinya, berbagai jenis proses manufaktur lain yang jauh lebih ekonomis menjadi terabaikan. Untuk mempermudah para perancang tersebut dalam menentukan proses manufaktur yang akan digunakan pada produk rancangan mereka, para perancang tersebut dapat mengacu kepada tingkat kerumitan dari setiap proses manufaktur tersebut. Pada penelitian ini dihitung kompleksitas proses *sand casting* yang menggunakan *core* dalam prosesnya dan dilakukan pengembangan hasil penelitian menjadi sebuah perangkat lunak sederhana berbasis *Labview* yang digunakan untuk otomasi perhitungan kompleksitas proses berdasarkan sebuah rancangan produk yang akan diproduksi. Selain itu, diteliti pula bobot dari setiap subproses pada proses *sand casting* yang dilakukan, sehingga dapat diketahui subproses beserta parameter yang paling berpengaruh pada tingkat kerumitan proses pembuatan produk secara keseluruhan. Dari hasil penelitian diperoleh bahwa parameter yang paling berpengaruh pada proses *sand casting* yang diteliti adalah jumlah *core* yang digunakan pada proses.

Kata kunci : *sand casting*, *core*, kompleksitas proses, parameter, perangkat lunak sederhana, *Labview*

Pendahuluan

Perkembangan yang terjadi pada dunia industri saat ini telah memberikan tuntutan baru kepada para perancang dan pelaku industri lainnya. Saat ini, perancang dituntut untuk dapat menciptakan suatu produk dalam waktu yang singkat, kualitas bagus, dan dengan biaya yang serendah-rendahnya. Untuk memenuhi tuntutan tersebut, tentu perancang harus menguasai seluruh aspek dalam perancangan produk, salah satunya dalam proses pemilihan proses manufaktur dan pemilihan material.

Boothroyd [3] menyatakan bahwa para perancang cenderung untuk memilih proses manufaktur dan material yang akan digunakan untuk produk rancangannya hanya berdasarkan jenis proses dan material yang familiar bagi mereka. Sebagai konsekuensinya, berbagai jenis proses manufaktur dan material lain yang jauh lebih ekonomis menjadi terabaikan. Berdasarkan survey kepada para perancang dari berbagai sektor industri di Inggris, lebih dari 50% perancang mengaku hanya memiliki sedikit pengetahuan, atau tidak mengetahui sama sekali mengenai *metal extrusion*. Dua pertiga dari mereka mengaku hanya sedikit mengetahui mengenai *glass-reinforced molding*, dan lebih dari tiga perempat dari perancang tersebut tidak mengetahui mengenai *plastic extrusion*, *technical blow molding*, dan *sintering*. Sedangkan untuk proses-proses lain yang memang kurang begitu umum, hanya 6% dari para perancang yang mengetahui proses *hot isostatic pressing*, 7% mengetahui mengenai *outsert molding*, dan 8% mengetahui mengenai *superplastic forming*. Hal ini tentu menjadi salah satu penghambat dalam proses



Gambar 1. Survey terhadap pengetahuan perancang mengenai proses manufaktur (sumber: Boothroyd, 2002)

pemenuhan tuntutan yang telah disebutkan sebelumnya.

Untuk menyaingi kurangnya pengetahuan perancang mengenai jenis-jenis proses manufaktur tersebut, Maraghy [1] membentuk sebuah model perhitungan kompleksitas proses untuk menghitung tingkat kerumitan suatu proses manufaktur berdasarkan parameter fisik dan parameter nonfisik yang berpengaruh pada jalannya suatu proses manufaktur. Hasil dari perhitungan ini memberikan batasan-batasan mengenai peralatan apa saja yang dapat digunakan oleh perancang dalam memproduksi produk rancangannya, serta menjadi alat bantu baru yang mempermudah perancang dalam memilih proses manufaktur untuk produk rancangannya.

Terdapat berbagai macam proses manufaktur dan diklasifikasikan menjadi beberapa bagian berdasarkan metode pembentukan material, yaitu *solidification*, *particulate*, *deformation*, dan *material removal process*. Proses sand casting termasuk ke dalam *solidification process*, dengan kategori *expandable mold* dan *permanent pattern*. Di dalam proses *sand casting*, material berupa logam cair dituangkan ke dalam *mold cavity* yang nantinya akan membentuk produk akhir yang diinginkan. Pada proses *sand casting*, *mold* terbuat dari pasir, sehingga proses ini tergolong ke dalam kategori *expandable mold*. Dalam prosesnya, seringkali *mold* tidak dapat langsung membentuk produk yang diinginkan, terutama jika produk tersebut berongga, sehingga dibutuhkan komponen tambahan berupa *core* untuk membentuk rongga yang terdapat pada produk.

Core yang digunakan untuk membentuk rongga ini juga terbuat dari pasir, dan termasuk ke dalam salah satu komponen *mold*. Sehingga, *core* nantinya juga akan dihancurkan setelah proses solidifikasi selesai. Proses pembuatan *core* pada umumnya dilakukan secara manual, dengan cara mencetak pasir ke dalam *core box* tertentu. Akan tetapi, telah berkembang proses pembuatan *core* dengan cara otomatis, yaitu dengan menggunakan Shell Machine. Proses ini dikatakan otomatis karena semua tahapannya dimulai dari pencetakan pasir ke dalam *core box* hingga proses pengerasannya dilakukan oleh Shell Machine. Pada metode ini, proses pengerasan *core* dilakukan pada temperatur yang tinggi, yaitu 290-320°C. Proses pembuatan *core* secara otomatis ini pada umumnya digunakan untuk membuat produk dengan laju produksi yang tinggi, karena proses pembuatan *core* berlangsung dalam waktu yang singkat, hanya membutuhkan waktu 60-120 detik untuk membuat 1 buah *core*.

Penelitian ini dilakukan untuk menghitung indeks kompleksitas proses *sand casting* dengan

proses pembuatan *core* secara otomatis dan pengembangan perangkat lunak sederhana untuk otomasi perhitungan berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan.

Metodologi Penelitian

Penelitian ini dilakukan pada sebuah perusahaan yang bergerak di bidang manufaktur pembuatan pompa dan menggunakan proses *sand casting* dalam pembuatannya.

Observasi. Proses observasi dilakukan untuk mengkarakterisasi proses *sand casting* dan memperoleh data mengenai parameter-parameter fisik maupun nonfisik yang dapat berpengaruh pada kompleksitas proses. Data mengenai parameter-parameter tersebut diperoleh dari pengamatan jalannya proses produksi, wawancara dengan operator yang bersangkutan, maupun dengan mengumpulkan standar-standar produksi yang dimiliki oleh perusahaan tersebut. Produk yang menjadi objek penelitian ini adalah komponen-komponen pompa berupa Casing, Bearing Housing, dan Casing Cover.

Identifikasi Parameter. Parameter yang berpengaruh pada kompleksitas proses manufaktur terbagi menjadi dua, yaitu parameter fisik dan parameter nonfisik.

Parameter Fisik. Parameter fisik adalah parameter yang berasal dari komponen fisik, atau peralatan yang digunakan dalam sebuah proses manufaktur. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh El-Maraghy [3], parameter fisik dari sebuah proses manufaktur dapat diklasifikasikan sebagai *fixture*, *tools*, *gauges*, dan *machines*.

Parameter Nonfisik. Parameter nonfisik pada perhitungan kompleksitas proses terbagi menjadi dua, yaitu *in-process feature* dan *in-process specification*. *In-process feature* adalah parameter yang ditambahkan ke dalam proses untuk membentuk produk secara *shape*, *geometry*, dan *tolerance* dengan kualitas standar. Sedangkan *in-process specification* adalah parameter yang ditambahkan ke dalam proses dengan tujuan bahwa produk yang dibuat memiliki nilai lebih dibandingkan dengan kualitas standar.

Pengolahan Data. Perhitungan kompleksitas proses dari parameter fisik dan parameter nonfisik dilakukan secara terpisah. Data parameter fisik yang diperoleh diolah menjadi H dan D_R . H atau jumlah elemen informasi dihitung dengan persamaan:

$$H = \log_2(N + 1) \dots (1)$$

Sedangkan D_R atau rasio keragaman adalah:

$$D_R = \frac{n}{N} \quad \dots (2)$$

dimana N adalah jumlah informasi dan n adalah jumlah informasi yang unik.

Pengolahan data parameter nonfisik dimulai dengan penyeragaman nilai dengan pembobotan dengan menggunakan metode normalisasi. Hal tersebut dilakukan karena data parameter yang diperoleh memiliki satuan yang berbeda-beda, sehingga agar dapat dihitung, data tersebut diseragamkan terlebih dahulu. Proses pembobotan ini menghasilkan F_{CF} dan S_{CF} yang diperoleh dengan persamaan:

$$F_{CF} = \frac{\sum_{j=1}^J factor_level_j}{J} \quad \dots (3)$$

$$S_{CF} = \frac{\sum_{k=1}^K factor_level_k}{K} \quad \dots (4)$$

Hasil perhitungan tersebut kemudian digunakan untuk menghitung $c_{f,feature}$ atau koefisien kompleksitas *feature* relatif, yang merupakan deskripsi dari fitur-fitur yang diinginkan beserta usaha-usaha yang dilakukan untuk membentuk fitur tersebut.

$$c_{f,feature} = \frac{F_{CF} * F_N + S_{CF} * S_N}{F_N + S_N} \quad \dots (5)$$

Setelah itu, dapat dihitung koefisien kompleksitas relatif dengan persamaan:

$$C_{process,x} = \sum_{f=1}^F x_f * c_{f,feature} \quad \dots (6)$$

Berdasarkan persamaan (1), (2), dan (6) dapat dihitung nilai kompleksitas proses dengan persamaan sebagai berikut:

$$pc_x = (D_{R_{process,x}} + c_{process,x}) \times H_{process,x} \quad \dots (7)$$

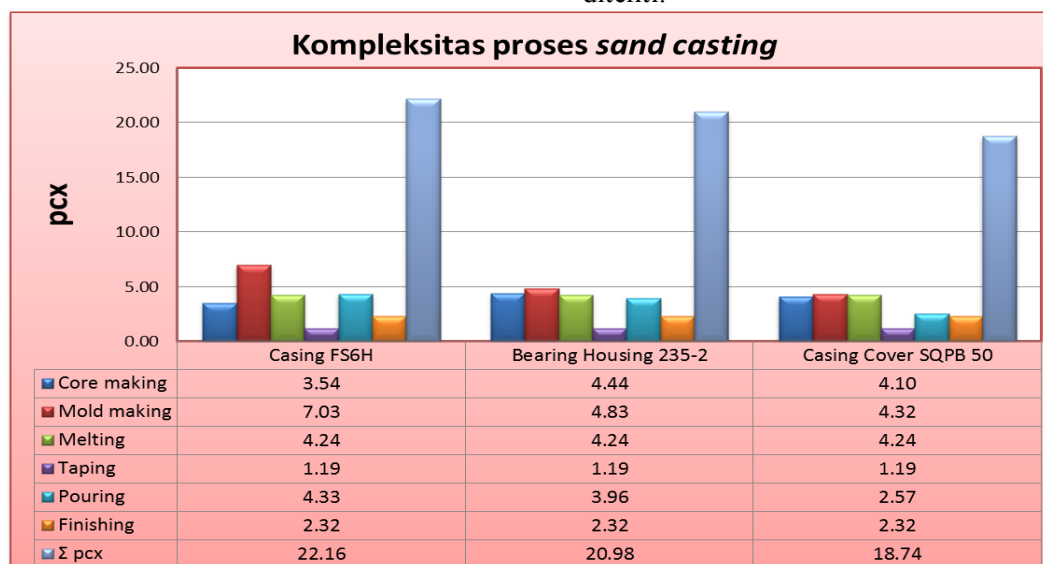
Persamaan tersebut digunakan untuk menghitung nilai kompleksitas subproses *sand casting*. Shabrina Fadhilah [16] menyatakan bahwa nilai kompleksitas proses atau $\sum pc_x$ adalah penjumlahan jumlah dari seluruh subproses di dalamnya. Dalam penelitian ini, komponen atau subproses dari proses *sand casting* adalah *core making*, *mold making*, *melting*, *taping*, *pouring*, dan *finishing*. Sehingga, kompleksitas proses *sand casting* dapat ditulis dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \sum pc_x = & pc_x \text{ core making} \\ & + pc_x \text{ mold making} \\ & + pc_x \text{ melting} + pc_x \text{ taping} + pc_x \text{ pouring} \\ & + pc_x \text{ finishing} \quad \dots (8) \end{aligned}$$

Pengembangan Perangkat Lunak Sederhana. Hasil perhitungan kompleksitas yang diperoleh tersebut kemudian dikembangkan untuk membuat sebuah perangkat lunak sederhana. Perangkat lunak ini digunakan untuk otomatisasi perhitungan kompleksitas proses *sand casting* yang menggunakan 2-4 buah *core* dalam prosesnya. Perangkat lunak yang dikembangkan menggunakan *platform* Labview sebagai basis dasar. Nantinya, para perancang dapat mengetahui kompleksitas proses dari produk yang dirancangnya hanya dengan memasukkan dimensi dari produk yang dirancang.

Hasil dan Pembahasan

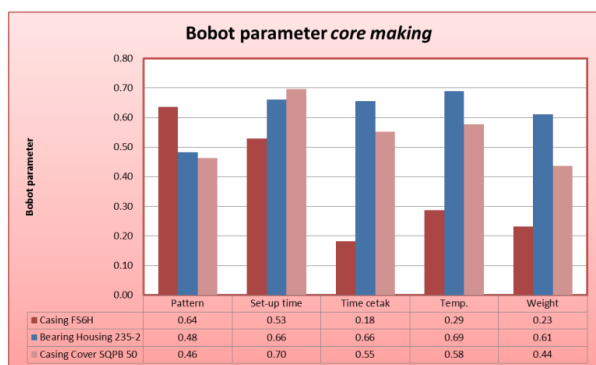
Perhitungan secara Teoritis. Hasil perhitungan secara teoritis dilakukan dengan metode yang dikemukakan oleh El-Maraghy. Perhitungan ini dilakukan secara manual dengan bantuan *software* Microsoft Excel. Berikut ini merupakan hasil perhitungan kompleksitas proses *sand casting* dari masing-masing produk yang diteliti:



Gambar 2. Hasil perhitungan kompleksitas proses *sand casting*

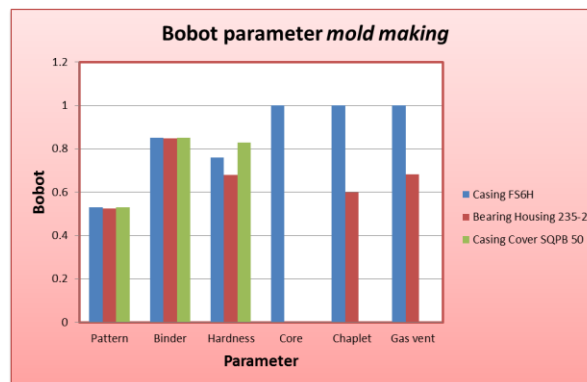
Grafik di atas menunjukkan hasil perhitungan kompleksitas proses *sand casting* beserta nilai kompleksitas masing-masing subprosesnya. Pada grafik terlihat bahwa produk Casing FS6H memiliki nilai kompleksitas proses tertinggi, yaitu 22,16. Produk ini menggunakan 4 buah *core* dalam pembuatannya.

Grafik tersebut juga menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah *core* yang digunakan, akan semakin besar kompleksitas proses manufakturnya. Pada subproses *core making* terlihat bahwa produk Casing FS6H memiliki nilai kompleksitas subproses terendah. Hal tersebut dikarenakan semakin banyak jumlah *core* yang digunakan, semakin kecil dimensi dari masing-masing *core*. Akan tetapi, pengaruh dari penggunaan jumlah *core* akan terlihat dari nilai kompleksitas subproses *mold making*.



Gambar 3. Bobot parameter nonfisik pada subproses *core making*

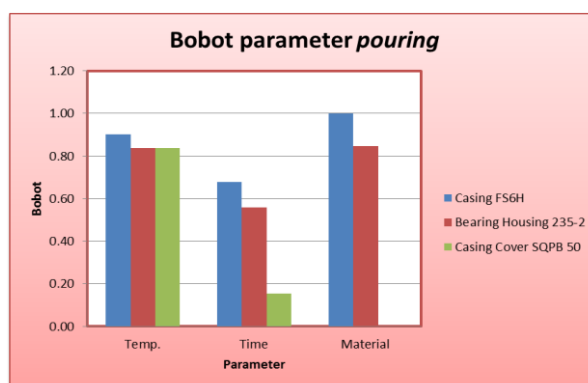
Dari tiga komponen pompa yang dijadikan objek penelitian, terdapat 6 buah *core* yang dibuat untuk memproduksi ketiga produk tersebut. Produk Casing FS6H menggunakan 4 buah *core*, yaitu *volute*, *suction*, *flange*, dan *ring*, sedangkan produk Bearing Housing 235-2 dan Casing Cover SQPB 50 masing-masing menggunakan 2 buah *core*, yaitu *body* dan *center*. Grafik pada Gambar 3 menunjukkan bobot dari parameter nonfisik yang berpengaruh pada subproses *core making* untuk masing-masing produk.



Gambar 4. Bobot parameter nonfisik pada subproses *mold making*

Pada subproses ini terdapat sebuah tahapan penyusunan *core* ke dalam *mold cavity*, dan pada tahapan inilah jumlah *core* yang digunakan memiliki andil yang besar dalam nilai kompleksitas proses yang dihasilkan.

Ketiga produk yang diteliti ini menggunakan material logam yang sama, yaitu material *cast iron* dengan tipe FC200. Kesamaan material yang digunakan ini berkaitan dengan kesamaan nilai kompleksitas pada subproses *melting* dan *taping* pada ketiga produk. Perbedaan nilai kompleksitas subproses mulai terlihat lagi pada subproses *pouring*. Parameter yang paling berpengaruh dalam subproses ini adalah kuantitas atau berat material yang dituangkan ke dalam *mold cavity*. Parameter ini kemudian memberi pengaruh pada bobot parameter-parameter lain dalam subproses *pouring* seperti yang terlihat pada grafik di bawah ini:



Gambar 5. Bobot parameter nonfisik pada subproses *pouring*

Sedangkan pada subproses *finishing*, tidak terdapat parameter yang ditambahkan ke dalam proses, sehingga tidak terdapat parameter nonfisik pada subproses ini. Penilaian kompleksitas subproses *finishing* hanya dilakukan dari parameter fisik dan diperoleh nilai yang sama untuk ketiga produk, yaitu 2,32.

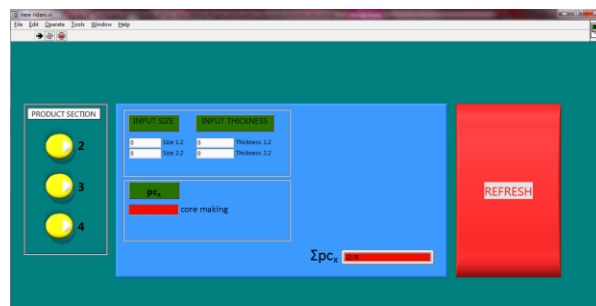
Perhitungan dengan Perangkat Lunak.

Setelah dilakukan perhitungan secara teoritis, dilakukan pengembangan perangkat lunak sederhana yang digunakan untuk otomatisasi perhitungan kompleksitas proses *sand casting*. Perangkat lunak yang dikembangkan menggunakan platform *Labview*. Untuk mengembangkan hasil perhitungan teoritis menjadi sebuah perangkat lunak sederhana, dibentuk suatu persamaan matematis yang mewakili hubungan antara parameter dimensi (*pattern*) dengan parameter nonfisik lainnya. Pembentukan persamaan matematis ini dilakukan agar perangkat lunak yang dikembangkan dapat digunakan untuk menghitung kompleksitas proses *sand casting* dari produk-produk yang masih dalam bentuk rancangan. Untuk menghitung kompleksitas proses dari produk yang masih dalam bentuk rancangan atau gambar, satu-satunya informasi yang dimiliki hanyalah dimensi produk, sehingga informasi tersebut yang dimanfaatkan untuk mengetahui kompleksitas proses dari produk yang bersangkutan. Pembentukan persamaan matematis dilakukan dengan mencari korelasi antara bobot parameter dimensi dengan bobot parameter nonfisik lainnya, menggunakan metode *least square*. Persamaan-persamaan tersebut yang kemudian dimasukkan ke dalam algoritma dari perangkat lunak sederhana yang dikembangkan.

Tabel 1. Tabel korelasi antara bobot dimensi dengan parameter nonfisik lainnya

Pattern	Set up	Pattern	Time	Pattern	Temp	Pattern	Weight
0.53	0.32	0.53	0.00	0.53	0.00	0.53	0.05
0.62	0.32	0.62	0.10	0.62	0.00	0.62	0.00
0.63	0.58	0.63	0.16	0.63	0.34	0.63	0.13
0.80	0.89	0.80	0.47	0.80	0.68	0.80	0.75

Perhitungan dengan perangkat lunak sederhana dilakukan dengan memilih jumlah *core* yang ingin digunakan, lalu memasukkan nilai *size* dan *thickness* dan produk yang diteliti. Dari kedua input tersebut langsung dihitung p_{cx} *core making* dan Σp_{cx} dari masing-masing produk. Berikut ini merupakan tampilan dari perangkat lunak sederhana yang dihasilkan beserta tabel hasil perhitungan dengan menggunakan perangkat lunak tersebut:



Gambar 6. Tampilan perangkat lunak

Tabel 2. Hasil perhitungan kompleksitas proses dengan perangkat lunak sederhana

Produk	p_{cx} <i>core making</i>	Σp_{cx}
Casing FS6H	4.05	22.33
Bearing Housing 235-2	5.76	20.59
Casing Cover SQPB 50	5.42	20.25

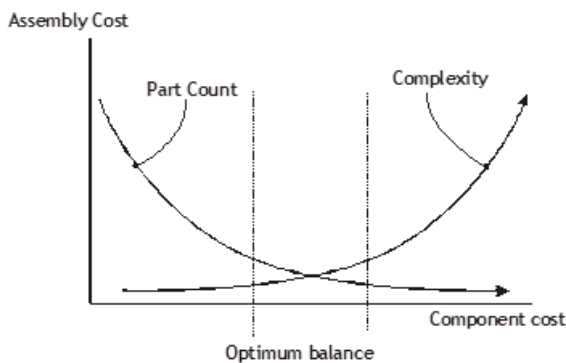
Perbandingan Hasil Perhitungan.

Perbandingan Hasil Perhitungan dengan Harga Produk. Perbandingan hasil perhitungan kompleksitas dengan harga produk dilakukan sebagai salah satu metode untuk memvalidasi hasil perhitungan yang dilakukan. Dari perbandingan tersebut terlihat bahwa harga produk meningkat seiring dengan meningkatnya indeks kompleksitas produk.



Gambar 7. Perbandingan kompleksitas proses dengan harga produk

Dari grafik di atas terlihat bahwa harga produk meningkat seiring dengan peningkatan nilai kompleksitas proses. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa kompleksitas proses manufaktur suatu produk akan berpengaruh terhadap harga dari produk yang bersangkutan.



Gambar 8. Grafik pengaruh kompleksitas pada component cost [14]

Carlos Rodriguez-Toro [14] dalam tulisannya mengemukakan sebuah grafik yang menjelaskan korelasi antara kompleksitas dengan *component cost*. Grafik tersebut menyatakan bahwa semakin tinggi kompleksitas, semakin mahal pula *component cost* dari suatu produk. Sehingga, perhitungan kompleksitas yang dilakukan telah memenuhi teori yang dikemukakan oleh Carlos Rodriguez-Toro tersebut.

Perbandingan Hasil Perhitungan secara Analitis dengan Perhitungan Menggunakan Perangkat Lunak Sederhana. Dari perhitungan yang dilakukan baik secara analitis maupun dengan menggunakan perangkat lunak sederhana, terlihat bahwa terdapat sedikit perbedaan di antara keduanya. Perbedaan ini disebabkan oleh beberapa penyesuaian yang dilakukan dalam pembuatan algoritma untuk menghasilkan perangkat lunak tersebut. Penyesuaian yang dilakukan adalah dengan membentuk beberapa persamaan yang diperoleh dengan membandingkan dimensi produk sebagai input pada perangkat lunak, dengan parameter-parameter lainnya yang berpengaruh pada perhitungan kompleksitas proses *sand casting*. Persamaan-persamaan yang terbentuk sebagian besar merupakan persamaan yang linear, tetapi data yang digunakan tidak 100% linear. Hal tersebut yang menyebabkan adanya perbedaan hasil perhitungan di antara kedua metode yang dilakukan. Penyesuaian data parameter tersebut juga dilakukan karena pada akhirnya, perangkat lunak sederhana ini akan digunakan untuk menghitung indeks kompleksitas produk yang masih dalam bentuk rancangan, sehingga informasi yang dimiliki hanya dimensi berupa *size* dan *thickness*. Untuk itu, perlu dilakukan penyesuaian tersebut agar perancang dapat memperkirakan indeks kompleksitas proses dari produk yang dirancang dengan informasi tersebut.

Kesimpulan

Indeks kompleksitas proses *sand casting* dengan pembuatan *core* secara otomatis yang dihitung secara analitis yaitu:

- Σp_{cx} casing FS6H: 22,16
- Σp_{cx} bearing housing 235-2: 20,98
- Σp_{cx} casing cover SQPB 50: 18,74

Hasil perhitungan tersebut dibandingkan dengan harga produk dan diperoleh hasil bahwa indeks kompleksitas proses berbanding lurus dengan harga produk.

Subproses *mold making* memiliki pengaruh terbesar pada indeks kompleksitas proses *sand casting* secara keseluruhan. Jumlah *core* yang digunakan pada proses *sand casting* berbanding terbalik dengan kompleksitas subproses *core making*. Semakin banyak jumlah *core* yang digunakan, semakin kecil dimensi masing-masing *core*, maka semakin kecil pula nilai p_{cx} subproses *core making*. Akan tetapi, penggunaan *core* tersebut berbanding lurus dengan kompleksitas subproses *mold making*. Semakin banyak jumlah *core* yang digunakan, semakin besar nilai p_{cx} subproses *mold making*.

Parameter-parameter yang paling berpengaruh pada indeks kompleksitas proses *sand casting* adalah:

- *Core making*: dimensi, berat *core*, dan waktu pencetakan
- *Mold making*: jumlah *core*, penggunaan *chaplet*, dan jumlah *gas vent*
- *Melting*: pengaruh parameter nonfisik pada subproses ini sama pada ketiga produk
- *Taping*: pengaruh parameter nonfisik pada subproses ini sama pada ketiga produk
- *Pouring*: berat material yang digunakan dan waktu penuangan
- *Finishing*: tidak ada parameter nonfisik yang berpengaruh pada subproses ini

Hasil perhitungan indeks kompleksitas proses *sand casting* dengan menggunakan perangkat lunak sederhana adalah:

- Σp_{cx} casing FS6H: 22,33
- Σp_{cx} bearing housing 235-2: 20,59
- Σp_{cx} casing cover SQPB 50: 20,25

Perbedaan hasil perhitungan disebabkan oleh beberapa penyesuaian yang dilakukan untuk membuat perangkat lunak tersebut. Penyesuaian yang dimaksud adalah pembentukan beberapa persamaan berdasarkan data dimensi produk yang dibandingkan dengan parameter-parameter lain yang berpengaruh dalam proses *sand casting*.

Referensi

- [1] ElMaraghy, W. H. & Urbanic, R. Jill. 2003. *Modeling of manufacturing systems complexity*. Intelligent Manufacturing

- Systems (IMS) Centre, Faculty of Engineering, University of Windsor: Windsor, Ontario, Canada.
- [2] Kalpakjian, Serope & Schmid, Steven. 2006. *Manufacturing Engineering and Technology*, 5th Edition. Prentice Hall: New Jersey.
- [3] Boothroyd, Geoffrey. 2002. *Product Design for Manufacture and Assembly*. Marcel Dekker, Inc.: New York.
- [4] Ulrich, Karl T. & Eppinger, Steven D. 2000. *Product Design and Development 2nd edition*. McGraw-Hill.
- [5] William D Callister, Jr. 2007. *Material Science and Engineering An Introduction*.
- [6] Seventh Ed. Department of Metallurgical Engineering The University of
- [7] Utah. United States of America.
- [8] Handout kuliah Proses Manufaktur dan Pemilihan Material DTM FTUI tahun 2012.
- [9] Handout kuliah 2 Cor DTMM FTUI tahun 2013.
- [10] Hurst, Steve. 1996. *Metal Casting: Appropriate Technology in the Small Foundry*. Intermediate Technology Publications: London.
- [11] Qian, Li & Ben-Arieh, David. 2007. *Parametric cost estimation based on activity-based costing: a case study for design and development of rotational parts*. Department of Engineering Technology and Management, South Dakota State University: Brookings, USA.
- [12] Shehab, E. M. & Abdalla, H. S. 2001. *Manufacturing cost modeling for concurrent product development*. Department of Design Management & Communication, De Montfort University: Leicester, UK.
- [13] Upadhye, Rasik A. *Optimization of Sand Casting Process Parameter Using Taguchi Method in Foundry*. 2012. Department of Industrial Engineering, Shri. Ramdeobaba College of Engineering and Management: Nagpur, India.
- [14] Rodriguez-Toro, Carlos., Tate, Susan., Jared, Graham., & Swift, Kenneth. 2002. *Shaping the Complexity of a Design*. SIMS, Cranfield University: Cranfield, Bedfordshire, UK.
- [15] Lybiawati, Wina. & Budiono, Hendri D.S. 2006. *Penggabungan DFMA dalam Kompleksitas Produk dan Proses untuk Sand Casting. Studi Kasus: Flange Yoke*. Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia: Depok.
- [16] Fadhillah, Shabrina. & Budiono, Hendri D.S. 2013. *Pengembangan Model Perhitungan Kompleksitas Full Mold Casting*. Departemen Teknik Mesin, Universitas Indonesia: Depok.
- [17] http://www.foundrysolution.com/pemsil/intfo ndus.nsf/V5_WebDL/BC67F7FB1CD00862 C12569D90051FAF9?OpenDocument&diakses pada 31 Oktober 2013 pukul 19:44