

PERUBAHAN BUDAYA KERJA INDUSTRI DENGAN *MODEL-BASED DEFINITION*

Febrianto Amri Ristadi¹, Yatin Ngadiyono², Surono³

^{1,2,3} Jurusan Pendidikan Teknik Mesin FT UNY

Email: amri@uny.ac.id

ABSTRACT

The Model-based Definition (MBD) approach is increasingly popular in various industries with successful Computer-aided Design (CAD) utilization. The design, manufacturing, and inspection processes will be faster and more efficient with the direct integration of annotations and other technical information on 3-dimensional (3D) models, known as Product and Manufacturing Information (PMI). However, this approach has not been widely applied in the industry, and no national-scale research articles on MBD have been found. The method used in this research is article review by searching articles in scientific databases using keywords, the time range of publication, and the suitability and feasibility of the article. This article review shows the benefits of the MBD initiative that can transform the work culture in the industry and has excellent potential to be implemented in Indonesia. This article also discussed the shortcoming of MBD. The MBD approach is expected to improve design quality and cost-effectiveness and reduce the time from the design stage to the market. MBD is also continuing its synergy with other methods throughout the products' lifecycle.

Keywords: model-based definition, pmi, cad, 3d model, work culture

ABSTRAK

Pendekatan Definisi Berbasis Model atau *Model-based Definition* (MBD) semakin populer di berbagai industri yang sebelumnya telah berhasil memanfaatkan *Computer-aided Design* (CAD) secara optimal. Dengan integrasi anotasi, keterangan gambar dan informasi keteknikan lain pada model 3 dimensi (3D) secara langsung, proses desain, manufaktur dan inspeksi akan lebih cepat dan efisien. Namun, pendekatan ini belum banyak diterapkan di industri nasional dan artikel penelitian skala nasional tentang MBD pun tidak ditemukan. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah artikel *review* dengan penelusuran artikel pada *database* ilmiah menggunakan kata kunci, rentang waktu publikasi, serta kesesuaian dan kelayakan artikel. Hasil dari artikel *review* ini menunjukkan berbagai manfaat dari inisiatif MBD yang mampu mentransformasikan budaya kerja di industri dan sangat potensial untuk diterapkan di industri skala nasional. Artikel ini juga membahas mengenai kekurangan yang masih ada pada implementasi MBD. Dengan pendekatan MBD diharapkan dapat meningkatkan kualitas desain, kualitas produk, efektivitas biaya, serta mengurangi waktu dari tahap desain hingga tahap pemasaran produk. Selain itu MBD diharapkan dapat bersinergi dengan metode lain yang digunakan dalam daur hidup produk.

Kata kunci: definisi berbasis model, mbd, cad, model 3d, budaya kerja

PENDAHULUAN

Saat ini dapat dikatakan desain rekayasa menggunakan gambar manual telah ditinggalkan. Lebih dari 20 tahun dunia industri bertransformasi menuju era digital dengan mengganti semua pekerjaan gambar dan desain secara manual menjadi berbantuan komputer, atau disebut *Computer Aided*

Design (CAD) (Srinivasan, 2008). Dengan CAD, definisi produk yang penting dalam proses manufaktur dapat disimpan dan didistribusikan dalam bentuk digital. Transformasi bidang desain rekayasa menuju definisi produk dalam bentuk digital umumnya diawali dari industri-industri penerbangan dan otomotif. Perubahan besar yang mempengaruhi budaya kerja di industri adalah semakin

Artikel dikirim: 10 September 2021, Artikel Diterima: 29 September 2021,

Artikel Direvisi: 30 September 2021, Artikel Diterbitkan: 30 September 2021

dihilangkannya gambar kerja dua dimensi (2D) pada standar ASME tentang *Digital Product Definition* (DPD).

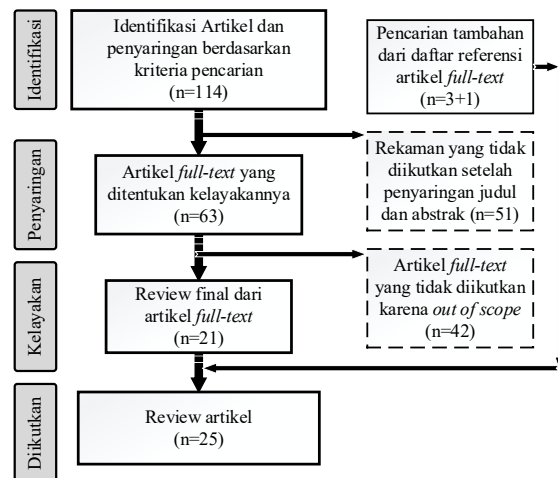
Pendekatan MBD ini belum banyak dibicarakan dan diterapkan di industri nasional. Hasil penelusuran melalui internet tidak ditemukan praktik pemanfaatan MBD sebagai suatu perubahan budaya di industri. Bahkan ketika ditelusuri pada *database* artikel ilmiah nasional pun, kata kunci MBD tidak ditemukan. Demikian juga pada dunia pendidikan, terutama pendidikan vokasi, pembahasan mengenai MBD tidak pernah mengemuka. Penelusuran singkat pada kurikulum sekolah menengah dan silabus pendidikan tinggi vokasi yang terkait dengan bidang desain rekayasa ataupun proses manufaktur produk tidak ditemukan inisiatif MBD yang terintegrasi di dalamnya. Angket pada sebuah forum diskusi nasional yang diikuti oleh guru SMK dan praktisi industri (2020) menunjukkan bahwa 80% peserta tidak mengetahui apa itu MBD, sedangkan 20% sisanya baru sekedar mengenal istilah MBD. Tidak ada peserta yang menyatakan sudah pernah mempraktikkan inisiatif MBD sebelumnya. Artikel ini berusaha membuat inisiatif MBD lebih dikenal luas dan diterapkan, terutama pada industri skala nasional, dengan melakukan artikel *review* terhadap artikel-artikel (*peer-reviewed*) yang ada pada *database* artikel ilmiah internasional. Artikel yang di-*review* adalah yang berkaitan dengan MBD, dunia industri dan keteknikan.

METODE

Pencarian secara elektronik terhadap literatur dilakukan melalui basis data *online* mengadopsi metode Mine (2019). Proses pencarian ini menggunakan kata kunci *model-based definition* dan *Industry*. Alur dari proses ini ditunjukkan pada Gambar 1. Artikel yang dianggap layak untuk diikutkan dalam studi ini adalah yang telah melalui proses *peer-review*. Penelusuran pada basis data nasional tidak menemukan hasil satu pun terkait kata kunci

MBD, sehingga kemudian penelusuran difokuskan pada *database Science Direct* dan dikhususkan pada artikel yang diterbitkan dalam bahasa Inggris. Waktu publikasi artikel dibatasi pada rentang waktu Januari 2005 hingga September 2021.

Penelusuran pada tahap identifikasi menghasilkan total 114 judul artikel. Semua judul dan abstrak diteliti untuk menyingkirkan artikel terkait MBD yang berada di luar cakupan *review*. Apabila fokus akan MBD pada judul dan abstrak tidak dapat dilihat secara akurat, maka dilakukan pemeriksaan terhadap seluruh badan artikel. Pada tahap penyaringan ini, dikecualikan 51 artikel, sehingga tersisa 63 artikel. Selanjutnya pada tahap penentuan kelayakan, sejumlah 42 artikel dikecualikan karena tidak berkaitan erat dengan budaya atau praktik yang ada industri dan bidang CAD. Sehingga setelah selesai tahap kelayakan diperoleh 21 artikel yang dilakukan *review*.



Gambar 1 Diagram alir proses identifikasi dan proses *review* (Mine, 2019)

Sejumlah 2 artikel yang relevan ditambahkan dari jurnal dan publikasi *National Institute of Standards and Technology* (NIST) tanpa pencarian kata kunci. Satu artikel ditambahkan dari penelusuran sitasi untuk memperkuat informasi yang dibutuhkan yang diyakini relevan dengan subyek yang diteliti, yaitu MBD terkait budaya kerja di industri. Ditambahkan pula *review*

mengenai metode lain yang terkait MBD seperti *product lifecycle management* (PLM), *engineering change management* (ECM) dan pertukaran data atau *data exchange*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dari studi ini dapat dituliskan dalam beberapa aspek mengenai MBD dan kaitannya dengan budaya industri, CAD dan pendekatan lain pada daur hidup produk.

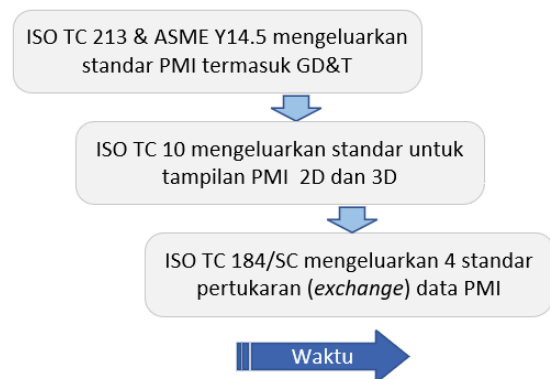
Transformasi menuju MBD

Istilah *computer-aided design and drafting* (CAD) saat ini cenderung merujuk ke pemodelan benda solid dan geometri tiga dimensi (3D). Pemodelan 3D sekarang ini adalah cara yang utama untuk menghasilkan geometri produk. Dari model 3D tersebut lalu umumnya dibuat beberapa gambar proyeksi 2D dan dilengkapi dengan detail informasi terkait ukuran geometri, toleransi dan pengerjaan (Srinivasan, 2008). Hampir semua perangkat lunak CAD yang ada sekarang memiliki peran ganda ini, yaitu membuat model nominal 3D dan membuat gambar proyeksi 2D yang didetailkan dengan informasi manufaktur produk atau *product manufacturing information* (PMI).

Konsep MBD terdiri dari model 3D dan PMI (Frechette, 2011). Menurut Frechette, pengertian model dalam manufaktur adalah artefak digital yang dibuat untuk digunakan dalam satu atau lebih aplikasi perangkat lunak manufaktur. Model produk merupakan representasi digital dari semua atribut produk yang memungkinkan proses manufaktur, penggunaan, dan dukungan produk. Sedangkan PMI adalah alat untuk menyampaikan atribut non-geometrik dalam CAD dan sistem pengembangan produk kolaboratif yang lain, yang dibutuhkan dalam manufaktur produk atau sub-sistem tertentu. Komponen dari PMI dapat berupa ukuran geometri dan toleransi (GD&T), anotasi 3D, simbol lasan, tekstur permukaan, kebutuhan *finishing* dan spesifikasi bahan (Barnard, 2014). PMI dalam pengembangannya mengikuti standar industri

(ASME) Y14.41-2003 tentang *Digital Product Data Definition Practices* dan juga ISO 1101:2004 tentang *Geometrical Product Specifications*.

Terdapat 3 komite atau sub-komite yang bertanggung jawab terhadap standar PMI, yang pengembangannya ditunjukkan pada Gambar 2. ISO TC 213 dan ASME Y14.5 mempunyai tugas utama untuk menentukan sintaksis (simbol-simbol) dan semantik (makna setiap simbol) dari spesifikasi PMI. Mereka juga menentukan bagaimana PMI ditampilkan pada gambar 2D dan (secara terbatas) gambar 3D. Selanjutnya ISO TC 10 menentukan tampilan grafis yang tepat dari sintaksis PMI pada gambar 2D dan 3D untuk kebutuhan interpretasi manusia. Berdasarkan kedua standar sebelumnya, ISO TC 184/SC 4 kemudian mendefinisikan informasi model yang terstandar dan representasi PMI dalam spesifikasi *Standard for the Exchange of Product Model Data* (STEP).



Gambar 2. Komite standar ISO yang bertugas mengembangkan standar PMI (Barnard, 2014)

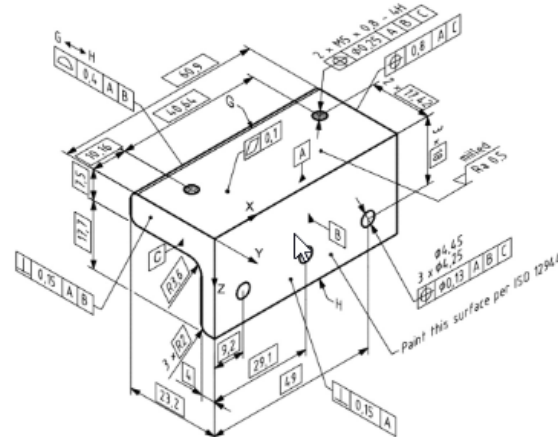
Semakin banyaknya vendor perangkat lunak CAD yang mengakomodasi MBD dalam produknya mengharuskan adanya standar pertukaran data yang netral, yaitu yang dapat saling ditukarkan tanpa adanya kesalahan informasi data. STEP adalah standar baku yang dibuat khusus oleh *International Standards Organization* (ISO) untuk pertukaran data model 3D di dalam standar ISO 10303 (Mohammed, 2021). Pada awalnya terdapat dua protokol aplikasi (AP), yang pertama

adalah STEP AP203 untuk desain 3D komponen dan rakitan 3D, yang kedua adalah STEP AP214 untuk basis data desain mekanik otomotif. Kedua AP ini digunakan secara luas oleh industri penerbangan antariksa dan proses desain mekanik otomotif. Selanjutnya kedua AP ini mengerucut menjadi STEP AP242 yang mengatur rekayasa 3D berbasis model. Pertukaran data membutuhkan kesesuaian antar vendor aplikasi, dan beberapa peneliti telah melakukan *conformation test* untuk menguji kesesuaian tersebut. Frechette (2013) melakukan pengujian kesesuaian GD&T antara Standar ASME Y14.41-2003 dan ISO 16792:2006 dan memfokuskan pada keterbacaan GD&T. Lipman (2015) melalui lembaga NIST menggunakan aplikasi STEP File Analyzer membandingkan konformasi dan interoperabilitas berkas STEP AP242. Sedangkan Hallmann et al. (2019) melakukan pemetaan STEP berikut dengan standar lain, yaitu STL.

Berdasarkan (ASME) Y14.41-2003, dikembangkan standar ISO 16792:2006. Kedua standar tersebut bertujuan untuk mengatur model yang diberikan anotasi menjadi komprehensif dan dapat digunakan ulang (*reusable*). Aturan yang spesifik ditetapkan terhadap distribusi ukuran dan toleransi pada bidang ortogonal, yang mirip dengan aturan pemberian ukuran gambar 2D pada lingkungan 3D (Gambar 3). Keterbacaan menjadi isu yang penting dalam hal ini, mengingat pemberian anotasi pada model 3D dapat dengan mudah menjadi berantakan jika tidak dikelola dengan baik.

Beberapa perangkat lunak dikembangkan untuk memanfaatkan PMI pada proses hilir, termasuk *computer-aided manufacturing* (CAM) yang dapat mengakses PMI untuk langsung membuat program pemrosesan dengan *numerical control* (NC). Selain itu, PMI dapat pula digunakan langsung pada perangkat lunak analisis toleransi dan *Coordinate Measuring Machine* (CMM) (Camba, 2014 dan Trainer, 2016).

Pengetahuan akan proses pengerjaan dan perakitan dalam bidang mesin dan manufaktur secara tradisional disampaikan oleh desainer kepada teknisi atau operator mesin/robot. Pengetahuan ini umumnya tidak tercatat dalam satu wadah yang sama (Mohammed, 2021). Dalam proses perakitan, informasi proses perakitan dan ikatan antar komponen umumnya masih disampaikan melalui gambar kerja 2D (Zhou, 2011). Dalam era informasi dan otomasi saat ini, praktik atau budaya kerja yang menggunakan dan meneruskan pengetahuan secara “manual” seperti ini tidak lagi dapat diakomodasi. Kebutuhan akan satu berkas utama yang membawa semua informasi yang berkaitan dengan geometri produk, toleransi, proses perakitan dan akurasi perakitan membawa pada transformasi menuju MBD.

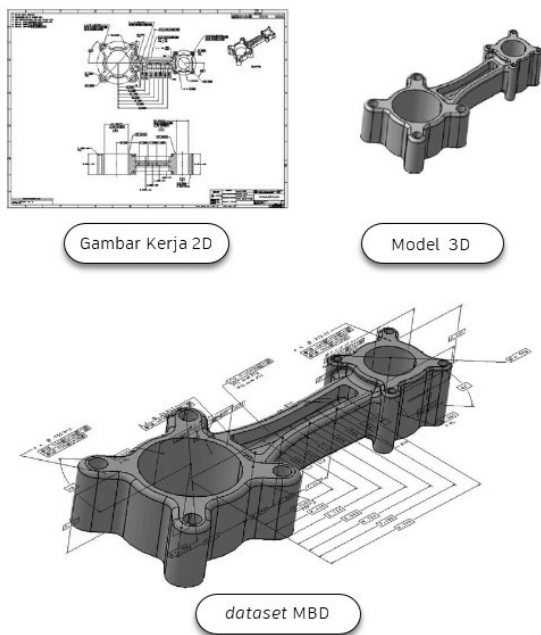


Gambar 3. Contoh standar penunjukan GD&T pada tampilan gambar 3D (ISO 16792) (Camba, 2014)

Eliminasi Gambar Kerja 2 Dimensi (2D)

Transformasi bidang desain teknik menuju DPD berawal dari implementasi pada industri penerbangan dan otomotif (Mas, 2015). Perubahan besar yang mempengaruhi budaya kerja di industri adalah eliminasi gambar kerja 2 dimensi (2D) pada standar *The American Society of Mechanical Engineers* Y14.41 tentang DPD (ASME, 2003). Standar ini mengimplementasikan proses matematik dan berbasis parameter, yang pada akhirnya mengeliminasi keperluan akan gambar kerja pada kertas fisik.

Quintana (2010) menyampaikan bahwa dengan *dataset* MBD dapat dibuat satu kesatuan berkas utama yang memuat bentuk benda 3D sekaligus anotasi gambar disematkan di dalamnya. Pendekatan ini dapat menghilangkan budaya kerja industri yang kurang produktif, di mana saat ini masih banyak ditemukan industri yang bekerja dengan dua jenis berkas dari suatu komponen yang sama, yaitu berkas model 3D dan gambar kerja 2D secara terpisah. Dengan menggunakan *dataset* MBD, pengelolaan berkas untuk pengembangan produk menjadi lebih efisien, karena perusahaan cukup mengelola satu berkas *master* yang akan terus digunakan dan dimutakhirkan selama daur hidup produk tersebut, pada semua bagian perusahaan yang menggunakannya, mulai dari hulu hingga ke hilir. Gambar 4 menunjukkan konsep *dataset* MBD yang sudah mencakup geometri produk dan anotasi 3D sekaligus.



Gambar 4. Konsep *dataset* MBD (Quintana, 2010)

Meskipun memiliki potensi besar mengeliminasi gambar kerja 2D, namun hasil penelitian Quintana (2010) menemukan bahwa mentransformasikan semua informasi keterangan gambar yang ada pada gambar 2D ke dalam *dataset* MBD tidak memberikan nilai tambah yang signifikan dalam aspek

pengurangan biaya dan keterlambatan pada tahap persiapan definisi produk. Keuntungan terbesar dari pemanfaatan MBD menggantikan gambar kerja 2D diyakini justru terletak pada tahap proses manufaktur dan inspeksi.

Peran tunggal gambar kerja 2D sebagai pembawa informasi perubahan desain rekayasa dalam daur hidup produk juga mulai dapat digantikan dengan implementasi *Engineering Change Management* (ECM) berbasis MBD (Bock, 2013). *Engineering Change* atau Perubahan Rekayasa adalah perubahan yang dilakukan pada sembarang komponen, gambar kerja, atau perangkat lunak yang telah dirilis sebelumnya pada proses desain produk. Pengelolaan perubahan rekayasa dengan ECM didesain supaya mempertahankan integritas produk yang dimodifikasi dan menjaga kemampuan telusur dari perubahan rekayasa itu sendiri (Quintana, 2012). Fungsionalitas yang diperlukan dalam ECM untuk dapat menggantikan gambar kerja 2D dalam lingkungan *drawing-less* ditunjukkan pada Tabel 1.

Untuk dapat benar-benar menggantikan peran gambar kerja 2D seperti ditunjukkan pada Tabel 1, Quintana (2012) merancang dekomposisi *dataset* MBD menjadi dua berkas terpisah, yaitu model MBD (berbasis sistem CAD) dan berkas distribusi (non-CAD). Pada prinsipnya, menggantikan gambar kerja 2D dengan *dataset* MBD berarti mengubah bagaimana definisi produk tersebut diakses, ditambahkan anotasi, didistribusikan dan diperbaharui. Tabel 2 menunjukkan jenis media yang berbeda yang digunakan untuk membawa definisi produk melalui keempat tahapan proses ECM. Jika dibandingkan dengan praktik pada lingkungan tradisional, pada konteks MBD model 3D, gambar kerja dan gambar cetak yang ditandai (*markup*) digantikan oleh model MBD, berkas distribusi dan berkas distribusi yang telah ditandai.

Tabel 1. Fungsionalitas yang diperlukan dalam ECM untuk dapat menggantikan gambar kerja 2D

No.	Aktivitas	Fungsionalitas
1.	Manipulasi, konsultasi dan validasi	Menampilkan bentuk benda 3D yang tepat Menampilkan ukuran, toleransi dan catatan Menampilkan data kepala gambar dan riwayat revisi Mampu memutar, menggeser dan memperbesar model MBD Mampu menampilkan gambar terurai dan merangkai ulang suatu <i>assembly</i> Mampu mengakses pandangan yang umum (isometrik, depan, atas, samping kanan-kiri, dsb.) dan pandangan khusus (yang dibuat sendiri oleh pengguna) Mampu berpindah-pindah dari beberapa jenis pandangan Mampu menunjukkan pengukuran linier dan sudut dari sembarang geometri yang dipilih Mampu membuat dan mengedit gambar potongan Alat pencari yang mampu melakukan pencarian dan penyaringan jenis toleransi tertentu atau nilai tertentu di dalam ukuran-ukuran. Mampu memberikan <i>highlight</i> terhadap elemen geometri yang terdapat asosiasi kelompok ukuran dan toleransi tertentu. Menyediakan karakteristik massa (volume benda, luas permukaan, dsb.) Mampu memanipulasi pohon struktur produk Proteksi dengan <i>password</i> untuk hak akses bagi kelompok tertentu Menjaga integritas data
2.	Pembaruan (<i>update</i>)	Mampu mengedit atau membuat pembaruan bentuk benda 3D termasuk ukuran dan toleransi yang tertera. Mampu menampilkan konteks geometri hanya pada zona yang ditentukan Mampu mengedit atau membuat pembaruan catatan umum, daftar komponen, kepala gambar dan riwayat revisi.

Tabel 2. Perbandingan media antara praktik ECM tradisional dan ECM *drawing-less*

Tahapan ECM	Proses ECM Tradisional	Proses ECM dengan MBD
Permintaan	Gambar kerja (detail atau <i>assembly</i>)	Berkas distribusi (<i>part</i> atau <i>assembly</i>)
Instruksi	Gambar kerja yang ditandai	Berkas distribusi yang ditandai
Eksekusi	Model 3D atau gambar kerja	Model MBD atau <i>file</i> distribusi
Aplikasi	Gambar kerja (detail atau <i>assembly</i>)	Berkas distribusi (<i>part</i> atau <i>assembly</i>)

Transformasi budaya kerja yang terlihat dengan rancangan ECM berbasis MBD adalah efisiensi kerja, di mana sebelumnya untuk ECM diperlukan mencetak gambar kerja yang terdapat perubahan, menambahkan revisi berdasarkan gambar kerja cetak dengan tulis tangan dan memindai gambar kerja yang telah ditandai perubahannya. Dalam ECM berbasis MBD, ketiga pekerjaan ini tidak diperlukan lagi, karena dapat disingkat dengan penyiapan *mark-up* revisi pada berkas distribusi saja.

Geng (2014) meneliti tentang penggunaan MBD untuk menggantikan

gambar kerja dalam pekerjaan *maintenance*. Untuk produk yang kompleks. Perawatan produk kompleks berbeda dengan perawatan produk pada umumnya, karena kebutuhan yang spesifik terkait peralatan, tenaga ahli, infrastruktur, diagnosis kerusakan, biaya dan waktu. Produk yang kompleks juga memiliki jumlah komponen yang banyak dengan bentuk yang berbeda-beda. Karakteristik seperti ini membutuhkan proses perawatan yang panjang dan melibatkan banyak operasi perawatan secara manual. Untuk setiap pekerjaan perawatan, dibuat suatu *job card* yang berfungsi untuk membawa informasi

bagaimana mengeksekusi pekerjaan kepada pekerja *maintenance*, dan disediakan pula gambar kerja 2D dari produk yang dilakukan *maintenance*. Untuk produk yang kompleks, *job card* ini dapat memuat deskripsi pekerjaan dan perintah kerja yang banyak sekali. Geng et al berhasil membuat metode untuk menggantikan gambar kerja 2D cetak dan teks pada *job card* dengan PMI pada MBD.

Perusahaan manufaktur pesawat terbang dari grup Boeing dan Airbus telah menunjukkan bahwa pesawat terbang komersial yang mutakhir dapat dibuat tanpa menggunakan gambar 2D sama sekali (Mas, 2015). Semua informasi produk, proses manufaktur, pengelolaan *assembly* dan keperluan GD&T telah memanfaatkan MBD secara keseluruhan dan tetap terus digunakan sepanjang daur hidup pesawat terbang tersebut. Transformasi budaya kerja pada industri pesawat tersebut adalah adopsi *Computer Aided Technologies* (CAX) yang kemudian menginisiasi metode *Product Lifecycle Management* (PLM). PLM adalah solusi bisnis untuk merampingkan aliran informasi tentang produk dan proses yang terkait, sepanjang daur produk tersebut. Sinergi PLM dengan MBD inilah yang memungkinkan eliminasi gambar 2D pada industri pesawat terbang komersial.

PMI dalam MBD dapat disinergikan dengan teknologi terbaru pada revolusi industri 4.0 yaitu *mixed reality*. Konsepnya adalah teknologi *Augmented Reality* (AR) dimanfaatkan untuk membantu inspeksi pada proses penjaminan mutu (QA) produk. Secara tradisional, divisi QA akan membuat gambar kerja 2D dan ceklis inspeksi untuk keperluan penjaminan mutu tersebut. Kemudian petugas inspeksi akan mengisi ceklis secara manual dengan bolak-balik melihat benda fisik dan gambar 2D untuk memastikan pengukuran mana yang harus dilakukan. Urbas (2019) mengembangkan metode inspeksi berbantuan AR yang mengimpor MBD dalam bentuk berkas STEP242 dan menampilkan informasi

yang tadinya ada pada ceklis cetak seolah-olah menjadi satu dengan benda fisiknya. Dalam ranah *mixed reality* untuk bidang teknik, AR lebih luas adopsinya dibandingkan dengan *virtual reality* (VR). Dengan AR dapat dilakukan interaksi secara praktikal terhadap benda atau komponen nyata dengan konten virtual yang disematkan. Pemanfaatan teknologi AR untuk QA ini turut serta menghilangkan kebutuhan akan gambar 2D.

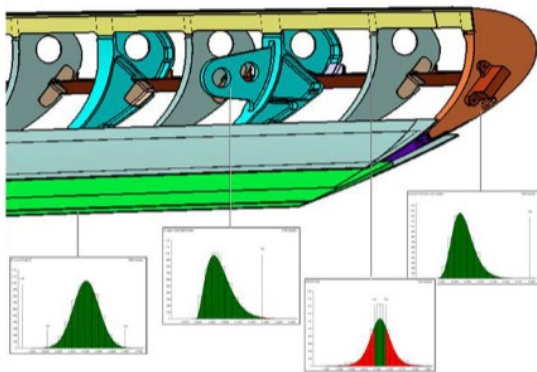
Pengembangan dan pembuatan MBD

Wan (2014) mengembangkan metode pemodelan yang menggunakan pengetahuan pemesinan untuk proses pemodelan MBD. Dengan metode *forward creation*, proses pemodelan MBD mengikuti proses yang lazim pada proses pemesinan, di antaranya proses frais, bubut, dan proses gurdi. Masing-masing proses pemesinan ini menjadi fitur tersendiri yang membentuk model 3D. Setiap fitur terekam dan menjadi PMI. Dengan demikian tidak lagi diperlukan kemampuan 3D *modeling* bagi Perencana Produksi untuk dapat menghasilkan model MBD, cukup dengan pengetahuan pemesinan yang sudah dimiliki. Hal ini juga dapat membantu meningkatkan penerimaan industri akan inisiatif MBD (Quintana. 2010). Sebaliknya, metode *backward creation* dapat digunakan oleh Perencana Produksi untuk mengetahui bahan baku atau kebutuhan bahan awal. Metode *backward creation* menggunakan proses yang men-*suppress* fitur pada model 3D sehingga dari bentuk komponen jadi prosesnya seperti membatalkan proses-proses pemesinan yang ada. Penelitian berdasarkan metode ini masih relevan hingga saat ini.

Otomasi berbasis MBD dan sinergi dengan pendekatan lain pada jalur produksi

Pemanfaatan pengenalan fitur (*feature recognition*) berbasis MBD untuk desain *fixture* yang digunakan pada proses pemesinan komponen struktural pesawat terbang, mampu meningkatkan efisiensi proses desain karena tidak lagi diperlukan *input* informasi dan deskripsi fitur secara

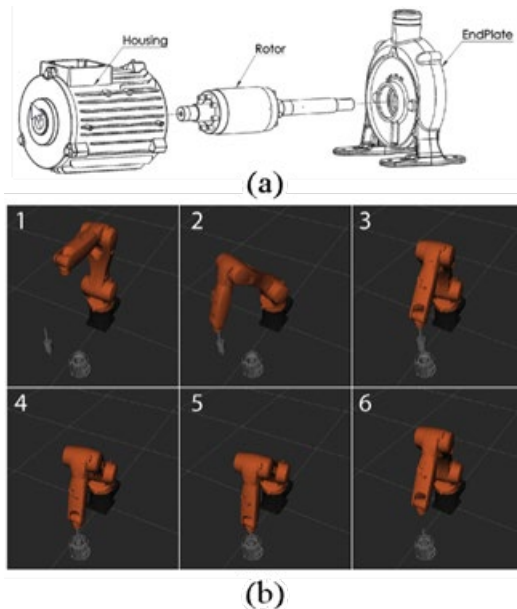
manual (Zhou, 2011). Fungsi MBD yang membawa informasi desain termasuk GD&T dapat pula dimanfaatkan untuk simulasi dan optimasi *assembly* pada pesawat terbang. Zhao (2016) dan Zhao (2019) menyampaikan konsep Simulasi dan Optimasi Koordinasi Perakitan yang terdiri dari simulasi proses *assembly* dan simulasi toleransi *assembly*. Rakitan pesawat yang menuntut kepresisian tinggi, komponen berukuran besar, koordinasi *assembly* yang besar dan banyak, mengharuskan persiapan proses *assembly* yang dapat menyimulasikan toleransi *assembly* jauh sebelum proses perakitan yang sebenarnya. Simulasi ini penting untuk menghindarkan permasalahan akurasi *assembly* akibat proses perakitan yang bias atau tumpang tindih. MBD dapat digunakan dalam proses otomasi ini untuk membawa informasi kepresisian dan akurasi *assembly* ke dalam simulasi untuk analisis kepresisian *assembly* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Menggunakan simulasi Monte Carlo, distribusi probabilitas dari deviasi target dapat dianalisis dengan akurat.



Gambar 5. Analisis kepresisian dengan simulasi *assembly* berbasis MBD (Zhou, 2011).

STEP 242 yang merupakan standar baku dalam pertukaran berkas CAD 3D memungkinkan pemanfaatan informasi MBD secara lebih jauh. Mohammed (2021) memanfaatkan *assembly constraint* atau ikatan pada rakitan, yang tersimpan pada berkas STEP (sebagai PMI), untuk mengendalikan robot dalam pekerjaan perakitan. Dalam penelitiannya, Mohammed menggunakan *assembly* uji yang terdiri dari

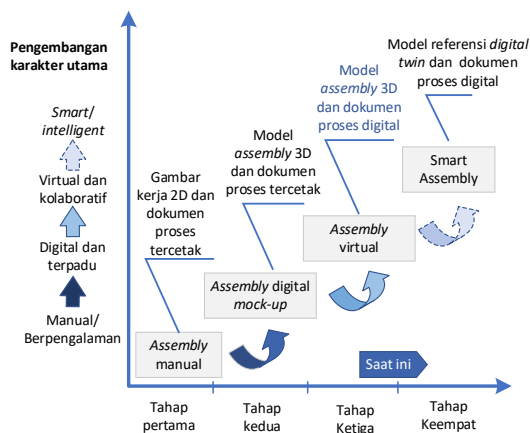
komponen rumah motor, rotor dan pelat dudukan (Gambar 6.a). Otomasi pekerjaan merakit komponen-komponen tersebut dapat dilakukan oleh robot dengan masukan berupa berkas pertukaran data STEP 242 yang berbasis MBD (Gambar 6.b).



Gambar 6. Perakitan dengan robot berdasarkan PMI pada MBD. (a) *Assembly* yang dirakit (b) Urutan perakitan berdasarkan *constraint* pada berkas STEP (Mohammed, 2021)

Pemanfaatan MBD untuk otomasi proses *assembly* di pabrik erat kaitannya dengan konsep *digital twin* (Yi, 2021). Yi mengembangkan konsep *Smart/Intelligent Assembly Process Design* di mana MBD berperan dalam perencanaan proses rakitan (*Assembly Process Planning*) pada tahap *assembly* virtual yang mengarah ke *smart assembly* (Gambar 7). Perkembangan teknologi informasi terbaru seperti *Internet of Things* (IoT), *big data analytics* dan komputasi awan memungkinkan perkembangan cepat pada *software* dan *hardware* cerdas. Hal ini memungkinkan kemampuan pengumpulan data secara *real-time* selama proses *assembly*. Sementara itu, Gaha (2021) mengembangkan model *digital twin* untuk pengukuran dengan CMM berbasis MBD. Model ini meyakini bahwa MBD sebagai dokumentasi yang legal untuk pembuatan produk, mengurangi kesalahan

akibat pemasukan ulang data, menjadi sumber data tunggal dan representasi yang terpadu.



Gambar 7. Perkembangan teknologi *assembly* produk (Yi, 2021)

Huang (2015) dalam penelitiannya mengembangkan pendekatan *reuse* atau penggunaan kembali pemrograman untuk proses pemesinan secara NC pada sub-komponen. Fokus pendekatan ini adalah pemesinan frais dari fitur *pocket* atau kantong. *Pocket* merupakan fitur yang paling banyak dikerjakan pada pemesinan NC dan fitur ini menghabiskan 80% dari waktu keseluruhan pada proses pemesinan NC. Pemanfaatan MBD terletak pada penyiapan model 3D yang terstruktur dan memuat semua informasi mengenai bentuk benda dan fitur pemesinan yang diperlukan. Fitur-fitur pemesinan ini dikenali dari PMI pada MBD menggunakan algoritma tertentu. Sehingga meskipun ukuran dan kedalaman fitur *pocket* berbeda, namun topologi dan semantik pemesinan yang mirip akan dapat dikenali menggunakan algoritma tersebut. Selanjutnya, teknologi *data mining* digunakan untuk mencari proses NC yang mirip yang pernah dikerjakan sebelumnya sehingga dapat digunakan kembali. Di sini terjadi proses otomatisasi pemrograman NC dengan MBD sebagai sumber utamanya.

Salah satu penerapan MBD yang bermanfaat sebagai sumber informasi utama dalam daur hidup produk ditunjukkan oleh

Geng (2014). Geng memanfaatkan MBD pada tahap lanjut dari daur hidup produk, yaitu tahap *maintenance*. MBD digunakan untuk memindah model 3D produk dari fase desain ke fase *maintenance, repair and overhaul* (MRO). Informasi yang terkandung pada PMI dapat dipindahkan secara otomatis ke dalam Kartu Pekerjaan Perawatan (MRO *job card*). Peningkatan budaya kerja yang didapatkan adalah mengurangi kesalahan keterbacaan, karena tidak lagi melibatkan pekerjaan manual dengan manusia sebagai pembaca dan interpretasi informasi.

Kekurangan yang ada pada implementasi MBD

Penelitian Arifin (2017) dan Ristadi (2017) mengungkapkan bahwa meskipun desain atau gambar manufaktur di industri mempunyai relevansi yang cukup tinggi dengan kurikulum yang ada di perguruan tinggi, namun pendekatan-pendekatan *drawing-less* yang dilakukan dalam kurikulum pendidikan terkait CAD dan gambar manufaktur dianggap belum mampu untuk memasyarakatkan penggunaan MBD di industri nasional dan perlu upaya lebih besar untuk dapat membuat perubahan budaya kerja industri tersebut berhasil.

Tantangan inisiatif MBD salah satunya adalah kesiapan industri dalam mengimplementasikan budaya kerja tersebut (Quintana, 2010). Banyak perusahaan beranggapan bahwa MBD belum cocok digunakan secara menyeluruh akibat permasalahan integritas dan stabilitas data elektronik. Hal ini dapat terjadi karena migrasi perangkat lunak dan interoperabilitas berbagai perangkat lunak yang berbeda di setiap perusahaan. Permasalahan interoperabilitas ini juga diungkapkan oleh Gupta (2021) yang meneliti dengan pendekatan semantik antar perangkat lunak CAD/CAM/CAE yang memiliki fitur MBD. Interoperabilitas Semantik (SI) suatu produk adalah pertukaran otomatis dari asosiasi makna data produk antar aplikasi dan domain

pada siklus pengembangan produk. Pertukaran semantik sangat tergantung pada fitur suatu produk, karena fitur ini terus berkembang dan membawa informasi semantik terkait bentuk, fungsi dan sifat dari produk tersebut.

Mas (2015) dan Saunders (2013) mengaitkan inisiatif MBD dengan pengelolaan daur hidup produk atau *Product Lifecycle Management* (PLM). Implementasi MBD pada PLM ini terutama digunakan pada industri pesawat terbang, yang telah mampu menghilangkan kebutuhan akan gambar kerja 2D. Namun demikian terdapat satu kekurangan kapabilitas sistem PLM dan MBD itu sendiri, yaitu biaya untuk memelihara ribuan rancangan internal perusahaan dan integrasi dengan jaringan pemasok global yang tentu saja memiliki sistem produksi yang berbeda-beda. Vendor penyedia perangkat lunak PLM mencoba mengatasi ini dengan meningkatkan kapabilitas untuk mengelola semua data yang diperlukan untuk menjalankan bisnis secara efisien biaya. Sistem PLM yang baru membutuhkan migrasi dan konversi data yang berujung pada biaya yang cukup tinggi apabila mencakup semua data produksi dan rantai pasok. Konversi data yang masif dan proses disrupsi juga akan mengganggu lini produksi yang cepat dan terintegrasi saat ini.

SIMPULAN

Berdasarkan *review* artikel yang komprehensif, pemanfaatan MBD sebagai transformasi budaya kerja industri sangat direkomendasikan untuk inisiasi pada skala nasional. Industri manufaktur nasional, terutama di bidang dirgantara dan otomotif dapat mengambil manfaat dari inisiasi MBD ini karena karakteristik produk yang kompleks, *assembly* yang banyak dan jumlah komponen yang banyak pula. Pada tahap desain memang penggunaan MBD belum terlihat banyak manfaatnya. Justru pada tahap ini diperlukan perubahan budaya kerja dengan tujuan melakukan suatu metode yang

memungkinkan penggunaan satu berkas utama, yang berisikan informasi terkait geometri produk, toleransi, cara pengerjaan, fitur permukaan dan sebagainya, untuk dapat digunakan bersama dengan mampu tukar yang baik, sepanjang daur hidup suatu produk. MBD baru akan terlihat besar manfaatnya pada tahap selanjutnya dari daur hidup, contohnya pada pemesinan dengan NC, inspeksi GD&T dan QA. Ketika produk sudah berada di *end user*, MBD masih tetap berguna contohnya dalam *maintenance, repair and overhaul (MRO)*. Pendekatan MBD dapat bersinergi saling menguatkan dengan metode lain dalam daur hidup produk, antara lain yang sudah terbukti adalah PLM, ECM, dan *digital twin*. Revolusi industri 4.0 juga membawa transformasi pada budaya kerja dengan pemanfaatan teknologi siber-fisik, contohnya pemanfaatan AR dengan MBD untuk penjaminan mutu produk. Hingga saat ini, permasalahan utama yang menghambat penerapan MBD di industri, terutama industri skala nasional, adalah *interoperability* antar perangkat lunak CAD/CAM/CAE yang digunakan dan migrasi menuju budaya kerja *drawing-less*.

DAFTAR RUJUKAN

- Arifin A.N., Ristadi F.A. (2017). Relevansi Kompetensi Teknik Gambar Manufaktur Di Smk Muhammadiyah 2 Jatinom Terhadap Kebutuhan Industri, *Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin* 2(2), 105–110
- ASME, American Society of Mechanical Engineers, Digital Product Definition Data Practices ASME Y14.41-2003, vol. ASME Y14.41-2003, American Society of Mechanical Engineers, New York, 2003, pp. viii, 91.
- Barnard A., Frechette S., Srinivasan V. (2014). A portrait of an ISO STEP tolerancing standard as an enabler of smart manufacturing systems. *13th*

- CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing.*
- Bock C., Feeney A.B. (2013). Engineering Change Management Concepts for Systems Modeling.
- Camba J., Contero M., Johnson M., Company P. (2014). Extended 3D annotations as a new mechanism to explicitly communicate geometric design intent and increase CAD model reusability, *Computer-Aided Design* 57, 61–73.
- Frechette S. (2011). Model Based Enterprise for Manufacturing, *44th CIRP International Conference on Manufacturing Systems.*
- Frechette S.P., Jones A.T., Fischer B.R. (2013). Strategy for Testing Conformance to Geometric Dimensioning & Tolerancing Standards, *Procedia CIRP* 10, 211–215.
- Gaha R., Durupt A., Eynard B. (2021). Towards the implementation of the Digital Twin in CMM inspection process, opportunities, challenges and proposals, *Procedia Manufacturing* 54, 216–221.
- Geng J., Tian X., Bai M., Jia X., Liu X. (2014). A design method for three-dimensional maintenance, repair and overhaul job card of complex products, *Computers in Industry* 65(1), 200–209.
- Gupta R.K., Gurumoorthy B. (2021). Feature-based ontological framework for semantic interoperability in product development, *Advanced Engineering Informatics* 48, 101260.
- Hallmann M., Goetz S., Schleich B. (2019). Mapping of GD&T information and PMI between 3D product models in the STEP and STL format, *Computer-Aided Design* 115, 293–306.
- Hartman, N., Zahner, J., Hedberg, T. and Barnard, A. (2017), Extending and Evaluating the Model-based Product Definition, *Grant/Contract Reports (NISTGCR)*, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- Huang R., Zhang S., Xu C., Zhang X., Zhang C. (2015). A flexible and effective NC machining process reuse approach for similar subparts, *Computer-Aided Design* 62, 64–77.
- Lipman R., Lubell J. (2015). Conformance checking of PMI representation in CAD model STEP data exchange files, *Computer-Aided Design* 66.
- Mas F., Arista R., Oliva M., Hiebert B., Gilkerson I., Rios J. (2015). A Review of PLM Impact on US and EU Aerospace Industry, *Procedia Engineering* 132, 1053–1060.
- Mine A., et al. (2019). Effectiveness of current adhesive systems when bonding to CAD/CAM indirect resin materials: A review of 32 publications, *Japanese Dental Science Review* 55(1), 41–50.
- Mohammed, S. K., Arbo, M. H., & Tingelstad, L. (2021). Leveraging model based definition and STEP AP242 in task specification for robotic assembly. *Procedia CIRP*, 97, 92–97.
- Quintana V., Rivest L., Pellerin R., Venne F., Kheddouci F. (2010). Will Model-based Definition replace engineering drawings throughout the product lifecycle? A global perspective from aerospace industry, *Computers in Industry* 61(5), 497–508.
- Quintana V., Rivest L., Pellerin R., Kheddouci F. (2012). Re-engineering the Engineering Change Management process for a drawing-less environment, *Computers in Industry* 63(1), 79–90.
- Ristadi F.A., Ngadiyono Y. (2017). Pengembangan Model Pembelajaran Berbasis CTL Untuk Meningkatkan Kompetensi Menggambar Berbantuan Komputer (CAD) Siswa SMK, *Jurnal Dinamika Vokasional Teknik Mesin* 2(1), 73–81
- Saunders P., Cai B., Orchard N., Maropoulos P. (2013). Towards a Definition of

- PLM-integrated Dimensional Measurement, *Procedia CIRP* 7, 670-675.
- Srinivasan V. (2008). Standardizing the specification, verification, and exchange of product geometry: Research, status and trends, *Computer-Aided Design* 40(7).
- Trainer, A. , Hedberg, T. , Barnard, A. , Fischer, K. and Rosche, P. (2016). Gaps Analysis Of Integrating Product Design, Manufacturing, And Quality Data In The Supply Chain Using Model-Based Definition, *Proceedings of the ASME 2016 Manufacturing Science and Engineering Conference*
- Urbas U., Vrabič R., Vukašinović N. (2019). Displaying Product Manufacturing Information in Augmented Reality for Inspection, *Procedia CIRP* 81, 832–837.
- Wan N., Mo R., Liu L., Li J. (2014). New methods of creating MBD process model, On the basis of machining knowledge, *Computers in Industry* 65(4), 537–549.
- Yi Y., Yan Y., Liu X., Ni Z., Feng J., Liu J. (2021). Digital twin-based smart assembly process design and application framework for complex products and its case study, *Journal of Manufacturing Systems* 58, 94–107.
- Zhao D., Tian X., Geng J. (2016). A Comprehensive System for Digital Assembly Precision Simulation and Optimization of Aircraft, *Procedia CIRP* 56, 243–248.
- Zhao D., Wang G., Guo W., Zhang Q. (2019). An Integrated Framework for Aircraft Digital Assembly Coordination Design and Simulation, *Procedia CIRP* 83, 330–334.
- Zhou Y., Li Y., Wang W. (2011). A feature-based fixture design methodology for the manufacturing of aircraft structural parts, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 27(6), 986–993.