PENGARUH INDUSTRI 4.0 DALAM PERKEMBANGAN ARSITEKTUR DIGITAL

Stephanus Evert Indrawan[1,2*], Prasasto Satwiko[3]

1. Program Studi Doktor Arsitektur Digital, Fakultas Arsitektur dan Desain, Universitas Soegijapranata, Semarang
2. Program Studi Arsitektur, Fakultas Industri Kreatif, Universitas Ciputra, Surabaya
3. Program Studi Arsitektur Universitas Atmajaya Yogyakarta, Yogyakarta

*Correspondent Author: sindrawan@ciputra.ac.id

Tgl masuk naskah: 27-05-2021 • Tgl review I: 27-07-2021 • Tgl revisi: 03-08-2021• Tgl review II: 07-08-2021
Tgl terbit 06-09-2021

DOI: 10.24167/joda.v1i1.3492

Abstrak: Perkembangan teknologi saat ini sedang berubah sejalan dengan paradigma Industri 4.0. Ada tiga perkembangan signifikan: teknologi rekayasa, teknologi digital, teknologi biologi dan medis. Kondisi ini niscaya akan mempengaruhi praktik pendidikan dan praktik profesional, khususnya dalam Arsitektur Digital. Makalah ini akan membahas perkembangan teknologi rekayasa yang memiliki pengaruh kuat pada Arsitektur Digital. Perkembangan teknologi manufaktur menuntut arsitek memahami konsep fabrikasi digital serta perkembangan perangkat lunak komersial dan open source yang semakin spesifik untuk fungsi tertentu, seperti menemukan bentuk, mengoptimalkan struktur dan kinerja bangunan. Penulisan ini akan melakukan studi literatur terkait pemahaman industri 4.0, arsitektur digital, tektonik digital, fabrikasi digital, dan pengembangan perangkat lunak arsitektural. Melalui tulisan ini dapat disimpulkan bahwa faktor yang merupakan pendukung dan yang menjadi tantangan dalam penggunaan arsitektur digital.

Kata Kunci: industri 4.0, arsitektur digital, tektonika digital, fabrikasi digital

Abstract: *Nowadays, Technological developments are currently changing in line with the Industry 4.0 paradigm. There are three significant progress: engineering technology, digital technology, and biological and medical technology. This condition will undoubtedly affect educational practice and professional practice, especially in Digital Architecture. This paper will discuss developments in engineering technology that have had a strong influence on Digital Architecture. The result of manufacturing technology requires architects to understand the concept of digital fabrication and the development of commercial and open-source software that are increasingly specific for certain functions, such as finding shapes and optimizing building structures and performance. This writing will conduct literature studies related to understanding industry 4.0, digital architecture, digital tectonics, digital fabrication, and architectural software development. This paper concludes with factors that support and become challenges in the use of digital architecture.*

Keywords: *industry 4.0, digital architecture, digital tectonics, digital fabrication*

1. Latar Belakang dan Tujuan

Konsep Industri 4.0 pada pada awalnya digunakan untuk menjelaskan perkembangan industri modern yang terjadi di negara Jerman[1].Fase industri modern pertama telah dimulai sejak akhir abad 18 atau sejak dimulainya industri berbasis mesin uap, kemudian dilanjutkan pada fase kedua dengan industri yang menyerap tenaga kerja dalam jumlah banyak dan menggunakan tenaga tenaga listrik. Fase ketiga dimulai sekitar tahun 1970 dimana industri

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License.

melibatkan sistem automatisasi dan jaringan internet. Saat ini dunia industri telah memasuki fase keempat atau kita sebut sebagai Industri 4.0. Salah satu karakter industri ini adalah melibatkan *cyber physical systems (CPS).* Teknologi ini melibatkan berbagai macam jenis data dan menuntut pengetahuan yang terintegrasi bagi pelakunya. Dimana hal ini diperlukan untuk menjawab kebutuhan industry masa kini yang sangat dinamis dan menuntut efektifitas maupun efisiensi yang tinggi. Industri 4.0 ini juga mencakup berbagai teknologi maju lainnya seperti *Radio Frequency Identification (RFID), Enterprise Resource Planning (ERP), Internet of Things (IoT), cloud-based manufacturing* dan berbagai pengembangan produk yang berorientasi sosial lainnya. [2]. Dalam penjelasan selanjutnya akan dijelaskan relasi antara Industri 4.0 dengan perkembangan Arsitektur Digital dengan kemajuan fabrikasi digital dan software penunjangnya. Secara umum trend teknologi Industri 4.0 dapat dikelompokan menjadi tiga domain besar yakni teknologi *engineering,* teknologi digital dan teknologi terkait biologi maupun kedokteran [3]. Terdapat 4 temuan utama dalam bidang Teknologi *Engineering* yakni *autonomous vehicles, 3dprinitng, advance robotics* dan material baru. Dalam teknologi Digital ada aplikasi *Internet of Things (IoT)* yang semakin maju, sehingga dikenal sebagai *Internet of all Things* dimana manusia dapat terkoneksi satu sama lain. Melihat majunya fenomena Industri 4.0 ini maka penulisan ini bermaksud untuk mengeksplorasi relevansi kemajuan teknologi dengan perkembangan arsitektur diranah digital.

2. Metode Penelitian

Metode Metode yang digunakan dalam penulisan ini adalah tinjauan segenap pustaka yang memiliki tema relevan. Studi Pustaka merupakan serangkaian kegiatan yang berhubungan dengan pengumpulan data, membaca refrensi dari buku jurnal maupun sumber yang terkait dan mengolahnya sebagai bahan penelitian [4] Sesuai dengan pendapat dari Mardalis, studi Pustaka dapat dirtikan sebagai aktivitas mengumpulkan dokumen, buku, media cetak maupun segenap dokumen sejarah terkait [5]. Dimana didalamnya terdapat berbagai teknik untuk mengumpulkan data-data lewat penelusuran buku refrensi, literatur, jurnal hasil penelitian yang terkait dengan masalah penelitian yang ingin dikerjakan [6]. Studi Pustaka juga dapat dipahami sebagai kajian teoritis, refrensi yang relevan dan literatur ilmiah yang berhubungan dengan budaya, nilai maupun norma yang ada dalam lingkungan sosial obyek penelitian [7]. Langkah-langkah penelitian yang dilakukan adalah menentukan topik, eksplorasi dan ekstrak informasi, menentukan fokus penelitian, mengumpulkan data dari berbagai sumber, menyajikan data dan menyusun kesimpulan. Instrumen dari pengumpulan data adalah dengan mencari segenap informasi mengenai hal maupun variabel dari berbagai jurnal, literatur, makalah dan lain sebagainya [8].

3. Tinjauan Pustaka

Dalam kajian Pustaka ini akan dibahas beberapa hal yang mempengaruhi perkembangan praktik maupun pendidikan Arsitektur masa kini. Kajian ini akan diawali dengan definisi arsitektur digital, perkembangan perangkatnya, pemanfaatan aplikasi yang mempengaruhi pemahaman arsitek terhadap makna tektonis.

3.1. Arsitektur Digital

Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia Arsitektur adalah 1 seni dan ilmu merancang serta membuat konstruksi bangunan, jembatan, dan sebagainya; 2 metode dan gaya rancangan suatu konstruksi bangunan. Digital adalah berhubungan dengan angka-angka untuk sistem perhitungan tertentu; berhubungan dengan penomoran. Sehingga dari penjelasan ini dapat dipahami bahwa arsitektur digital tidak hanya sebatas proses menggambar yang hanya menggunakan komputer, namun melibatkan penggunaan produk Teknologi Komunikasi dan Informasi dalam sebuah proses perancangan arsitektur secara menyeluruh. Dalam praktek Arsitektur Digital komputer tidak hanya dimanfaatkan sebagai alat bantu dalam mengelola gambar namun juga dimanfaatkan sebagai perpanjangan otak perancang dalam berfikir, melakukan evaluasi dan mengambil keputusan. Dari pemahaman ini maka tidak dapat dipungkiri bahwa perkembangan industri modern akan sangat mempengaruhi dunia Arsitektur terutama dari aplikasi Digital.

3.2. Pengaruh Pemanfaatan Aplikasi Digital kedalam perkembangan pemahaman Tektonika

Praktek arsitektur tidak terlepas dari pemahaman tektonika. Tektonika merupakan istilah yang berasal dari Bahasa Yunani yang memiliki arti tukang atau tukang kayu. Secara konseptual, desain arsitektur terkait dengan sifat struktur dan material. Perubahan simbiosis antara arsitektur dan struktur dapat dimaknai sebagai salah satu pengaruh formatif yang membedakan konsep tektonika dalam era yang berbeda juga [9]. Teknologi dan teori terkait desain digital [10] memberikan makna baru dalam pemahaman tektonika dari sisi teknologi digital.

e-ISSN: 2798-6896

Digital telah menjadi media dan perangkat yang mampu untuk mengintegrasikan, memberikan ruang mediasi dan membantu dalam memberikan alternatif solusi tektonis seperti mengakomodasi visualisasi material dan mendukung pemahaman ruang secara virtual, menunjukan aspek-aspek fisika bangunan termasuk deformasi bentukannya, mengkaitkan pemahaman ketukangan dengan permesinan modern dari sudut pandang digital, menghubungkan proses perancangan dengan proses fabrikasi digital sebagai satu kesatuan. *"technological possibilities afforded by the digital realm"*[11], mendukung proses eksplorasi bentukan baru melalui teknologi digital sehingga memungkinkan perancang untuk mengadopsi bentuk alam dalam level pemahaman yang berbeda, dan memungkinkan perancang untuk terlibat dalam mencari konsep smart material untuk mendukung perancangan bangunan yang adaptif.

3.3. Perkembangan Perangkat dalam Perkembangan metode menggambar dalam Arsitektur

Penulisan ini akan diawali dengan sejarah perkembangan perangkat Arsitektur Digital. Menurut Robin Evans, Arsitek tidak membuat bangunan melainkan membuat gambar mengenai bangunan. Oleh sebab itu gambar merupakan medium utama bagi Arsitek dalam mengorganisasikan ide, sumber-sumber refrensi penunjang, pemahaman ruang dan informasi lainnya.[12]. Proses praktek menggambar dalam arsitektur dapat dibagi menjadi 2 [13], pertama proses *additive* Tahap ini dapat dikenali sebagai tahapan menggambar secara tradisional atau secara manual. Proses ini sangat bergantung pada penggunaan perangkat gambar seperti pensil maupun penggaris. Metode menggambar perspektif merupakan salah satu metode awal bagi arsitek di jaman Renaissace untuk menyampaikan ide, selanjutnya metode ini berkembang menjadi metode untuk menggambar teknik atau *multiview* atau *ortographics drawing* yang dtemukan leh ahli matematika prancis bernama Gaspard Monge[14]. Proses ini memiliki keterbatasan dimana produk yang dihasilkan sangat tergantung pada kemampuan kognitif dari pelakunya sehingga sangat mempengaruhi penyampaian informasi, proses ini juga tidak bisa menggambarkan aspek fisik yang mempengaruhi keberadaan bangunan seperti gravitasi maupun gaya eksternal struktur. Dari sisi teknologi digital, proses ini lebih mirip sebagai proses menggambar berbasis *CAD (Computational Aided Drawing)*. Pada proses ini mouse dan computer dianggap sebagai perpanjangan tangan dari Arsitek. Kedua Proses *Associative* Tahapan ini merupakan tahapan dimana arsitek berusaha untu menjelaskan informasi melalui berbagai urutan gambar (selanjutnya dikenal sebagai animasi). Pada tahun 1960, Arsitek Peter Eisenman menyampaikan informasi mengenai bangunannya melalui diagram yang dikenal sebagai proses Operasi Geometri *(Geometric Operation).* Pada abad 19, Anthonio Gaudi menggunakan model untuk menjelaskan perilaku struktur dan mencari bentukan yang dikenal sebagai proses *Descriptive Geometry.* Proses yang serupa juga dilakukan oleh Arsitektur modern seperti Frei Otto dengan nama *Form Finding Process.* Proses ini berusaha menjelaskan informasi non statis yang tidak bisa dicapai melalui gambar manual. Dari sisi teknologi digital, proses ini merupakan proses pemanfaatan perangkat komputer sebagai alat untuk merancang, menghitung dan mengambil keputusan.

4. Perkembangan Software

Sudah lebih dari 25 tahun perkembangan pembuatan software untuk kebutuhan dalam praktek Arsitektur. Kegiatan pengembangan software arsitektur tidak dianggap sebagai salah satu hasil dari produk perancangan software semata, namun sudah dipertimbangkan sebagai disiplin ilmu yang serius. Hal ini juga ditunjang dengan semakin majunya teknologi Internet dan keterlibatan yang aktif dari Arsitek dalam membangun software [15]. Menurut perjalanan sejarah perkembangannya, software arsitektur mengalami 5 fase evolusi :

4.1. Fase *Monolithic* (1980) : *Modules, Information Hiding.* Merupakan masa pengembangan sistem, perangkat lunak bukanlah sebagai disiplin ilmu namun sudah diakui sebagai pelopor untuk desain yang bersala besar. Teknik pengembangan sudah memanfaatkan modul-modul untuk mengarah pada desain struktural.[16]

4.2. Fase *Distributed* (1990) : *Views, Stakeholders, Styles, Assessment.* Terjadi peningkatan kompleksitas sistem dalam mengambil keputusan desain. Pada masa ini, software mengenalkan teknik untuk mengenali lingkungan yang kompleks, yakni penggunaan *viewpoints* dan *views* [17]

4.3. Fase *Internet-Connected* (2000) : *NFRs, Agility, Decisions.* Sistem ini memasuki tantangan baru yang mempertimbangkan faktor non fungsional (*NFR : Non Functional Requirements)* seperti skala penggunaan software, keamanan penggunaan dan

e-ISSN: 2798-6896

performa dalam penggunaannya). Tuntutan pasar semakin cepat dan tinggi. [15]

4.4. Fase *Internet Native* (2010) : *Evolution, Sustainability, Principles.* Pada fase ini Internet menjadi sebuah sistem dan bukanlah bagian yang terpisah. Software dituntut untuk mampu bergabung dengan platform yang berbeda baik online maupun offline dan sementara patform software pada era ini sudah semakin unik dan individual. [15]

4.5. Fase *Intelligent Connected* (2010 – sekarang) Pada masa ini *Artificial Intellegence* atau kecerdasan buatan sudah menjadi lazim[18]. Jaringan internet untuk mengakses sudah dapat diandalkn sehingga diharapkan ada "bantuan cerdas" bagi pengguna yang akan disediakan oleh pengembang software.

Berdasarkan penjelasan perkembangan software arsitektur diatas maka dapat bahwa sistem dan lingkungan komputer sudah berubah jauh oleh sebab itu pengembang software Arsitektur dan Arsitek juga dituntut untuk mengantisipasi hal ini. Pada tabel terlihat prediksi masa depan software Arstektur [15] Oleh sebab itu untuk pengembangan Arsitektur Digital dibutuhkan pengetahuan digital maupun arsitektur yang progresif dari sisi teknologi maupun segala kemungkinan lainnya. Rivka Oxman bahkan mengklaim bahwa Arsitektur Digital merupakan disiplin ilmu yang berdiri sendiri, dimana disiplin ini akan mampu menginspirasi dan mendukung segala kemungkinan untuk menimbulkan pendekatan proyek-proyek yang baru [10].

Tabal 1: Kecenderungan evolusi software Arsitektur[15]

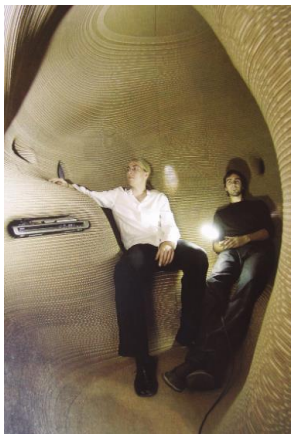
Less	*More*
Structural Design	*Data and Algorithm Design*
Defined Structure	*Emergent Runtime Structure*
Decisions	*Principles, Policies, Algorithms*
Certainty	*Probability*
Operational Process	*Operational Policy and Automation*
Capex	*Opex*

5. Aplikasi Fabrikasi Digital dalam karya Arsitektur Digital

Salah satu tema yang terkait dalam Arsitektur digital adalah Fabrikasi Digital. Fabrikasi digital memiliki kemampuan untuk mendokumentasikan proses arsitektur melalui desain digital dan mengkaitkannya dengan penggunaan mesin-mesin fabrikasi digital seperti 3d printer, CNC milling, lasercut maupun peralatan lain yang didukung oleh robot. Terdapat 5 kategori yang disebutkan oleh Iwamoto, yaitu *Sectioning, Tessellating, Folding Contouring dan Forming* [19], yakni :

Sectioning adalah bagian dari sejarah konstruksi. Metode ini biasa digunakan untuk membangun permukaan pesawat terbang dan industri pembuatan kapal. Bentuk pesawat terbang dan bangunan kapal pertama-tama didefinisikan sebagai bagian sebagai rangkaian elemen konstruksi. Metode ini diadopsi oleh Le Corbusier untuk mempelajari konstruksi Atap Ronchamps. Ini dapat dilihat pada model kertas Ronchamp selama studi konstruksi internalnya. Karya Frederick Kiesler juga terkait dengan konteks fabrikasi digital, terutama untuk bentuk yang tiada habisnya. Greg Lynn menggunakan metode pembagian yang dibuat secara digital sebagai metodologi desainnya yang berpengaruh dan legendaris. Dari penjelasan tersebut, Iwamoto secara gamblang menjelaskan bahwa terdapat keterkaitan sejarah antara fabrikasi digital dengan evolusi bentuk pada awal era modern. Arsitek SHoP mempresentasikan metode sectioning dalam bentuk kombinasi yang baik dan elevasi persepsi. Proyek ini memenangkan program Arsitek muda P.S.1. Instalasi ini dibangun dan dirancang sendiri oleh arsitek. Pemandangan bukit pasir adalah elemen lanskap arsitektural, dibangun oleh rangkaian paralel dan tumpukan kayu. Metodologi ini sepenuhnya digerakkan oleh digital, para pekerja manual perlu memotong, merakit, dan mengencangkan sambungan selama proses konstruksi sebenarnya. Karya-karya Mafoombey juga merupakan contoh bagus dari metode pembagian yang berhubungan dengan fungsi. Mafoombey membuat instalasi dari karton bergelombang. Bentuk bangunan adalah ruang melengkung bebas yang dibangun dengan tumpukan karton. Seluruh 360 lapis karton tujuh milimeter dipotong dengan mesin pemotong terkontrol yang dioperasikan di bawah komputer. [20]

e-ISSN: 2798-6896

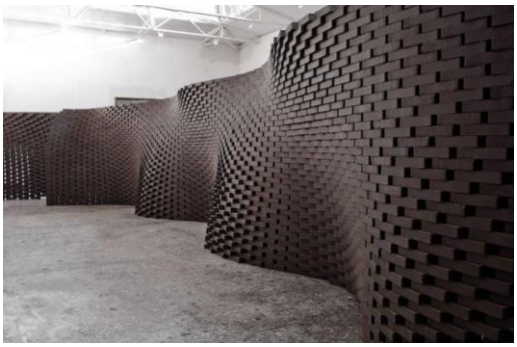


Gambar 1. Karya Mafoombey, melalui pendekatan Sectioning



Gambar 2. Karya SHoP, melalui pendekatan Sectioning

Tessellation adalah bentuk kumpulan yang diterapkan pada suatu bentuk atau permukaan. Tessellation dikenal selama Romawi kuno dan Kekaisaran Bizantium ke dinding layar Arsitektur Islam untuk menyaring cahaya, menentukan ruang atau menyampaikan makna simbolis. Tessellation sangat erat kaitannya dengan budaya kerajinan tangan dan fabrikasi digital memberikan sudut pandang yang berbeda untuk menghasilkan karya keramik. Dengan bekerja secara digital, pengguna dapat memproduksi modul nonkonvensional dan tidak bergantung pada fabrikasi standar. Iwamoto membawa penjelasan tentang definisi tessellation ke level lain, karya digital mengurangi kendala pekerjaan tangan. Mengaplikasikan material pada permukaan lengkung menjadi dapat diprediksi dan menciptakan proses fluida. Penjelasan ini membuat pembaca menyadari bahwa tessellating dapat menjadi relevansi untuk kompleks bangunan skala besar. Kubah geodesik Buckminster Fuller adalah salah satu contoh awal bagaimana prinsip tessellation diterapkan pada objek berskala besar. Strukturnya ringan dan dirancang untuk produksi massal. Pada tahun 2007, Brennan Buck mendesain prototipe skala hidup yang dibangun dengan lengkungan ganda, dirancang secara digital tetapi teknologi fabrikasi sepenuhnya standar. Instalasi ini terdiri dari empat belas ratus panel datar yang dipotong secara unik dan menciptakan permukaan melengkung yang elegan dan mulus. Bucks menyajikan studi kaleidoskopik tentang pola tiga dimensi dalam pendekatan yang tidak konvensional.[20]



Gambar 3. Formasi Batu Bata yang disusun oleh Robot, karya Mathias Kohler [19]



Gambar 4. Geodesic Dome, karya Buckminster Fuller [19]

Folding adalah teknik yang ampuh untuk mengubah permukaan datar menjadi bentuk tiga dimensi. Struktur lipat memiliki kemampuan untuk menopang diri sendiri dan struktur bentang lebar. Prinsip melipat telah dianut oleh arsitek selama lebih dari lima belas tahun dan Iwamoto menjelaskan prinsip ini dalam ruang lingkup operasi material. Karya Chris Bosse menjelaskan penerapan prinsip melipat sebagai instalasi origami yang dirancang secara digital. Setiap modul origami terbuat dari karton.[20]

e-ISSN: 2798-6896





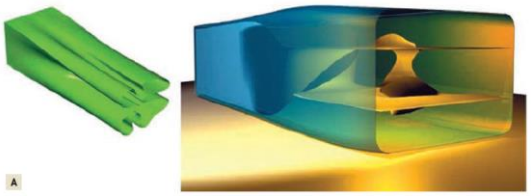
Gambar 5. Origami Pavilion, karya Chris Bosse[19]

Contouring adalah metode menumpuk permukaan datar untuk membuat objek 3d. Fabrikasi digital memungkinkan metode ini untuk mengubah gagasan kerajinan tangan dalam praktik yang tidak ortodoks. Karya Erwin Hauer didukung oleh prinsip yang dinamakan Bone Wall. Karya ini adalah sekelompok objek bentuk sel yang harus dideformasi sepanjang komposisi bentuk umum. Setiap bentuk memiliki skala dan bentuk yang berbeda-beda. [20]



Gambar 6. Bone Wall, karya Erwin Hauer: [19]

Forming adalah metode menggabungkan beberapa teknik yang telah dijelaskan sebelumnya ke dalam proyek Arsitektur. Berikut contoh tahapan peaplikasian metode fabrikasi digital kedalam sebuah proyek dari UN Studio architects. Dari penjelasan Iwamoto, dapat dipahami prinsip-prinsip fabrikasi digital dan menggunakannya sebagai landasan ilmu pendukung untuk mengembangkan pendekatan desain digital.[20]



Gambar 7. 3D Model awal dari bangunan Music Theater di Graz, menjelaskan konsep awal dari ruang yang transparan, organis dan fleksibel [19]



Gambar 8. Aplikasi kedalam bentukan sesungguhnya : transparan, terlihat samar elemen organis dan fleksibel [19]

6. Pembahasan Hasil

Melalui penjelasan diatas dapat terlihat bahwa perkembangan revolusi indstri sudah demikian pesatnya terutama dalam dunia arsitektur. Pekembangan software yang pada awalnya hanya sebagai alat bantu sudah berkembang menjadi alat untuk merancang[15].Proses yang dilakukan melalui aplikasi digital lebih luwes dibandingkan dengan proses konvensional karena perangkat komputer dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan. Aplikasi simulasi digital cenderung lebih unggul dibandingkan dengan simulasi fisik karena laboraturium fisik lebih mahal, aplikasi digital dari sudut finansial lebih murah, jumlah tenaga kerja bisa lebih sedikit dan prosesnya ditergantunga pada skala maupun lingkungan. Dilihat dari majunya perkembangan software, pada saat ini begitu banyak pilihan begitu beragam mulai dari *software open source, freeware* maupun dengan cara berlangganan. Simulasi bangunan tidak hanya sebagai media untuk berkomunikasi dengan klien namun sudah menjadi sebuah media untuk menyajikan data dalam menunjukan performa bangunan, struktur bangunan sampai ke metoda fabrikasi[12]. Faktor yang menjadi tantangan dalam simulasi bangunan adalah pertama kebanyakan program studi arsitektur tidak memberikan dasar pengetahuan yang cukup terkait matematika lanjut, aerodinamika, perpindahan

e-ISSN: 2798-6896

panas, fluida kedua Simulasi bangunan belum memberikan keuntungan yang cukup, masih dianggap sebagai bonus dalam jasa arsitektur ketiga software dibuat oleh ahli dan kondisi yang berbeda dengan Indonesia sehingga ada perbedaan data iklim dan bahan bangunan. Paradigma arsitek dalam merancang melalui pendekatan digital tidak lagi terbatas pada gambar namun juga menyajikan data dan konsep fabrikasi material yang tidak terpisahkan. Oleh sebab itu kondisi ini merubah paradiga arsitek dalam merancang

7. Kesimpulan

Dari penjelasan diatas dapat terlihat bahwa perkembangan Industri 4.0 atau perkembangan Industri modern sangat berdampak pada perkembangan Arsitektur Digital. Dimana faktor-faktor yang mempengaruhi pemahaman samapi peralatan penunjang juga telah berevolusi. Perubahan ini adalah sebuah keniscayaan yang dapat disadari atau tidak telah mempengaruhi dalam praktek berarsitektur. Arsitek masa kini dan masa depan tidak hanya dituntut untuk dapat berkomunikasi melalui gambar maupun teks, kemampuan untuk memahami informasi teknologi juga diperlukan. Secara skematik penjelasan dapat disimpulkan seperti pada tabel di lembar lampiran.

Pustaka

[1] V. Roblek, M. Meško, and A. Krapež, "A Complex View of Industry 4.0," *SAGE Open*, vol. 6, no. 2, 2016, doi: 10.1177/2158244016653987.

[2] D. Lukac, "The fourth ICT-based industrial revolution 'industry 4.0' - HMI and the case of CAE/CAD innovation with EPLAN P8," *2015 23rd Telecommun. Forum, TELFOR 2015*, pp. 835–838, 2016, doi: 10.1109/TELFOR.2015.7377595.

[3] K. Schwab, "The fourth industrial revolution," *Penguin Books*. Penguin Books, 2016, doi: 10.4337/9781786430328.00006.

[4] M. Zed, *Metode peneletian kepustakaan*. Yayasan Obor, 2008.

[5] Mardalis, *Metode penelitian: suatu pendekatan proposal*. Bumi Aksara, 1995.

[6] M. Nazir, *Metode penelitian*. Ghalia Indonesia, 1985.

[7] Sugiyono, "Metode Penelitian," *Metod. Penelit.*, 2015.

[8] S. Arikunto, *Prosedur penelitian: suatu pendekatan praktik*. Rineka Cipta, 1992.

[9] R. Oxman, "Informed tectonics in material-based design," *Des. Stud.*, vol. 33, no. 5, pp. 427–455, 2012, doi: 10.1016/j.destud.2012.05.005.

[10] R. Oxman, "Theory and design in the first digital age," *Des. Stud.*, vol. 27, no. 3, pp. 229–265, 2006, doi: 10.1016/j.destud.2005.11.002.

[11] T. Dufva and M. Dufva, "Grasping the future of the digital society," *Futures*, vol. 107, no. November, pp. 17–28, 2019, doi: 10.1016/j.futures.2018.11.001.

[12] R. Evans, *Translations from Drawing to Building and Other Essays (AA Documents)*. 1986.

[13] A. Tedeschi, *AAD Algorithms-Aided Design: Parametric Strategies Using Grasshopper*. 2014.

[14] J. Sakarovitch, "Gaspard Monge Founder of 'Constructive Geometry,'" *Proc. Third Int. Congr. Constr. Hist.*, no. May, pp. 1293–1300, 2009.

[15] D. E. P. and A. L. Wolf, "Foundations for the study of software architecture," *SIGSOFT Softw. Eng. Notes ACM SIGSOFT Softw. Eng. Notes*, vol. 17, no. 4, pp. 40–52, 1992.

[16] D. L. Parnas, "On the criteria to be used in decomposing systems into modules," *Commun. ACM Commun. ACM*, vol. 15, no. 12, pp. 1053–1058, 1972.

[17] ISO/IEC/IEEE, "Systems and software engineering: architecture and description = Ingénierie des systèmes et du logiciels: description architecturale," 2011.

[18] I. Amazon Web Services, "'Amazon Machine Learning - Predictive Analytics with AWS,' Amazon Web Services, Inc.," *https://aws.amazon.com/machine-learning/.*, 2016. .

[19] L. Iwamoto, *Digital fabrications :architectural and material techniques*. 2010.

[20] S. E. Indrawan, "Digital Fabrication, Architectural and Material Techniques Iwamoto, Lisa," *Int. J. Creat. Arts Stud.*, vol. 3, no. 1, pp. 87–91, 2017, doi: 10.24821/ijcas.v3i1.2074.

e-ISSN: 2798-6896