Pengembangan Desain *Fitting* untuk Furnitur Kardus dengan Memanfaatkan Teknologi Pencetakan 3D

Abd. Gafur Maulana Achmad[1], Imam Damar Djati[2]
Fakultas Seni Rupa dan Desain, Institut Teknologi Bandung
abdulgafurmaulana@gmail.com[1], imamdj@gmai.com[2]

ABSTRACT

Cardboard furniture has emerged as a lightweight, easy-to-assemble, and efficient alternative for temporary use. However, the structural limitations of cardboard, particularly at panel joints, make it susceptible to deformation and damage due to external forces. This study aims to design and develop fittings as joint components to optimize the stability and strength of cardboard furniture. The fittings were developed using 3D printing technology with the Fused Deposition Modeling (FDM) method, utilizing a MakerBot Replicator 2 machine and MakerBot PLA filament. In this study, two fitting designs were developed, namely symmetric and asymmetric designs, which were then compared to determine the most optimal design. Finite Element Analysis (FEA) was used to evaluate the structural strength of both designs. The results showed that the symmetric design exhibited better resistance to tensile forces than the asymmetric design. In the symmetric design, the ultimate tensile strength (62 MPa) was reached at a tensile force of 46 N, while the asymmetric design only reached 44 N. Based on these findings, the symmetric design was selected as the foundation for developing 17 module variants, consisting of edge joints and corner joints with various configurations. These module variants enable diverse structural joint mechanisms in the assembly system of cardboard furniture and can also be applied to existing cardboard furniture as additional accessories to enhance its structural integrity.

Keywords: 3D printing, cardboard furniture, finite element analysis, fitting.

ABSTRAK

Furnitur kardus berkembang sebagai solusi alternatif yang ringan, mudah dirakit, dan efisien untuk penggunaan sementara. Namun, keterbatasan struktural kardus, terutama pada sambungan antar panel, membuatnya rentan terhadap deformasi dan kerusakan akibat gaya eksternal. Penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengembangkan *fitting* sebagai komponen sambungan untuk mengoptimalkan kestabilan dan kekuatan furnitur kardus. Pengembangan *fitting* dilakukan menggunakan teknologi pencetakan 3D metode *Fused Deposition Modeling* (FDM) dengan mesin MakerBot Replicator 2 dan filamen PLA MakerBot. Dalam penelitian ini, dua desain *fitting* dikembangkan, yaitu desain simetris dan desain asimetris, yang kemudian dibandingkan untuk menentukan desain yang paling optimal. Metode *Finite Element Analysis* (FEA) digunakan untuk menganalisis kekuatan struktural pada kedua desain tersebut. Hasilnya menunjukkan bahwa desain simetris memiliki ketahanan lebih baik terhadap gaya tarik dibandingkan desain asimetris. Pada desain simetris, *tensile strength* (62 MPa) tercapai pada gaya tarik 46 N, sementara desain asimetris hanya mencapai 44 N. Berdasarkan hasil ini, desain simetris dipilih sebagai dasar pengembangan 17 varian modul, yang terdiri dari modul sambungan tepi dan modul sambungan sudut, dengan konfigurasi yang beragam. Varian modul ini dapat menghasilkan berbagai macam mekanisme sambungan struktur dalam sistem perakitan furnitur kardus serta dapat diaplikasikan pada furnitur kardus yang sudah ada sebagai aksesori untuk mengoptimalkan strukturalnya.

Kata Kunci: Fitting, Finite Element Analysis, Furnitur kardus, Pencetakan 3D.

PENDAHULUAN

Saat ini industri furnitur kardus diproyeksikan tumbuh dengan laju CAGR (*Compound Annual Growth Rate*) sebesar 8,5% dari tahun 2023 hingga 2030 [1]. Furnitur kardus menjadi tren populer dalam industri furnitur karena menawarkan berbagai keunggulan seperti praktis, ekonomis, serta ramah lingkungan sebab materialnya mudah didaur ulang dan *biodegradable* [2], [3], [4]. Jika sudah tidak dibutuhkan, furnitur ini dapat langsung didaur ulang menjadi kardus baru, yang membuatnya sederhana dan praktis tanpa perlu dijual kembali seperti furnitur konvensional pada umumnya [5]. Berbagai keunggulan tersebut membuat material kardus menjadi solusi yang tepat sebagai furnitur untuk kebutuhan pemakaian temporal. Sebagai material utama, kardus memiliki keterbatasan dalam hal struktural, yang membuatnya memerlukan pendekatan desain khusus agar dapat lebih optimal digunakan sebagai furnitur. Pada furnitur yang menggunakan panel tipis seperti kardus, masalah utama sering kali terletak pada kekuatan dan kekakuan sambungan yang cenderung rendah [6], [7]. Jika desain tidak dirancang dengan tidak tepat, kelemahan ini dapat menyebabkan kegagalan struktural [8], sehingga mengurangi fungsionalitas dan masa pakai furnitur berbahan kardus.

Salah satu teknik sambungan yang paling populer digunakan untuk furnitur kardus adalah teknik *interlocking,* yang mana bagian-bagian panel kardus saling mengunci satu sama lain seperti pada Gambar 1a. Namun, masalah struktural yang sering terjadi pada jenis sambungan ini yaitu pada beberapa bagian titik sambungan antar panel mudah terlipat atau tidak tegak lurus (Gambar 1b), terutama jika material kardus terlalu tipis atau kualitasnya kurang baik. Selain itu, struktur berbentuk kisi-kisi memiliki kelemahan dalam mendistribusikan beban horizontal, sehingga berpotensi menyebabkan deformasi pada konstruksi jika tekanan lateral signifikan diterapkan (Gambar 1c). Hal ini menunjukkan bahwa meskipun tren furnitur kardus telah membuktikan potensi material kardus sebagai bahan furnitur, masih terdapat tantangan signifikan terkait metode sambungan antar panel-panelnya. Dalam upaya mengatasi tantangan tersebut, pengembangan desain *fitting* yang bertujuan untuk mengoptimalkan sambungan furnitur kardus menjadi fokus utama dalam penelitian ini.

Gambar. 1 Kerusakan yang sering terjadi pada area sambungan interlocking dengan material kardus [9], [10].

Inovasi dalam desain dan produksi furnitur kardus memiliki potensi besar, tidak hanya dalam pengolahan material kardus sebagai bahan utama, tetapi juga melalui penggunaan bahan kombinasi dan penerapan teknologi produksi mutakhir [11]. Salah satunya adalah dengan memanfaatkan teknologi yang sedang populer dalam satu dekade terakhir, yaitu teknologi Aditif Manufaktur. Aditif Manufaktur juga dikenal sebagai pencetakan 3D, adalah proses pembuatan objek tiga dimensi dengan menambahkan material lapis demi lapis berdasarkan model digital. Berdasarkan jenis metode pencetakan 3D yang ada, diketahui bahwa metode yang paling sering digunakan dalam industri furnitur adalah metode *Fused Deposition Modeling* (FDM) [12], [13], [14], [15], [16], serta metode *Selective Laser Sintering* (SLS) [17]. Hasil model yang dicetak menggunakan metode FDM dapat digunakan secara efisien untuk pembuatan elemen furnitur yang rumit dengan biaya rendah dalam

jumlah kecil [13], [15]. Sebaliknya, SLS adalah teknologi yang mahal namun memiliki keunggulan dalam penggunaan berbagai macam bahan seperti termoplastik, keramik, maupun bubuk logam, serta tidak memiliki batasan dalam memproduksi bentuk yang rumit [18]. FDM memiliki beberapa keunggulan seperti jumlah limbah yang minimum, minim atau bahkan tanpa tahap *finishing* pada objek yang dihasilkan, dan dapat menggunakan material komposit yang dibuat khusus, dengan memanfaatkan mesin pencetakan 3D yang terjangkau dan berbiaya rendah [15]. Penggunaan FDM disarankan jika hanya ingin menghasilkan sebatas prototipe dengan cepat dan sifat fisik-mekaniknya tidak terlalu penting, sedangkan jika ingin prototipe dengan kualitas bagus, presisi tinggi, maka teknologi SLS lebih disarankan, namun waktu untuk mencetaknya lebih lama dibanding FDM [19].

Filamen adalah bahan baku berbentuk sulur yang digunakan dalam FDM untuk mencetak objek dengan cara melelehkan dan menyusun lapisan-lapisan material secara bertahap. *Polylactic Acid* (PLA) dan *Acrylonitrile Butadiene Styrene* (ABS) merupakan bahan yang paling umum digunakan untuk memproduksi filamen AM dalam pembuatan furnitur [17]. PLA merupakan termoplastik *polyester* yang terbuat dari sumber daya terbarukan seperti tepung jagung, akar tapioka, dan tebu [20]. Selain itu material ini juga berbiaya rendah, dapat terurai secara alami, serta memiliki penerapan yang luas [15]. ABS termasuk dalam kelompok termoplastik *amorphous* [15], penerapannya sebagai elemen sambungan pada furnitur terbukti memiliki ketahanan dan kekakuan yang lebih tinggi, serta telah teruji dapat digunakan untuk memproduksi *fitting* maupun pengencang untuk merakit furnitur berbahan *particleboard*, MDF [21], dan/atau HDF [22]. Penelitian lainnya menunjukkan bahwa material *Polyethylene Terephthalate* (PETG) memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibanding ABS [16], namun tidak se-ramah lingkungan seperti PLA, karena tidak *biodegradable*.

Gambar. 2 Beberapa contoh fitting pencetakan 3D yang telah dikembangkan: (a) sambungan modul datar, (b)sambungan modul linear, (c) dan sambungan bergerak [12].

Penelitian mengenai pengembangan *fitting* untuk furnitur konvensional dengan memanfaatkan teknologi pencetakan 3D telah banyak dilakukan [21]-[26]. Namun, penerapannya dalam pengembangan *fitting* khusus untuk furnitur kardus masih jarang dibahas. Sebagian besar penelitian yang ada lebih berfokus pada furnitur berbahan konvensional seperti kayu dan plastik. Berdasarkan hal tersebut, penelitian ini dilakukan untuk menjawab permasalahan utama pada furnitur kardus, yaitu rentannya bagian titik sambungan antar panel kardus terhadap kerusakan, sekaligus mengeksplorasi pemanfaatan teknologi pencetakan 3D sebagai solusi untuk pengembangan produk

furnitur kardus. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan desain *fitting* yang dirancang khusus yang dapat berfungsi sebagai sambungan sekaligus penguat struktur, serta dapat diaplikasikan pada berbagai jenis furnitur kardus. Dengan menciptakan desain *fitting* tersebut, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam mengoptimalkan struktural furnitur kardus.

METODE

Penelitian ini terdiri dari tiga tahap utama: Perancangan *fitting*, pengujian struktural, dan pengembangan varian modul. Pada tahap perancangan *fitting,* dikembangkan dua alternatif desain, yaitu desain simetris dan asimetris. Setelah kedua desain final diperoleh, pengujian struktural dilakukan menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA) untuk mengevaluasi distribusi tegangan dan deformasi saat diberikan beban tarik, sehingga dapat ditentukan desain dengan performa terbaik. Tahap terakhir yaitu mengembangkan desain terpilih menjadi berbagai varian modul untuk mengoptimalkan fungsionalitas *fitting* yang telah dirancang.

Untuk memproduksi prototipe *fitting,* metode FDM digunakan dengan mesin pencetakan 3D komersial MakerBot Replicator 2 dan material filamen PLA dari MakerBot Industries. Adapun parameter pencetakan yang diterapkan sesuai pada Tabel 1

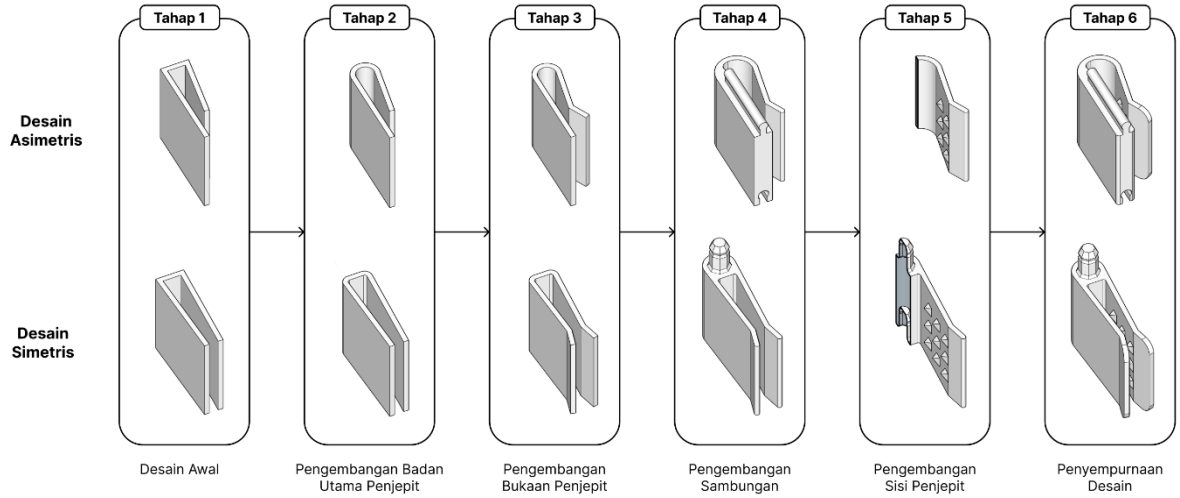
Tabel 1 Parameter pencetakan yang diterapkan

Parameter	**Nilai**	**Satuan**
Nozzle temperature	200	°C
Travel speed	150	mm/s
Fan power	50	%
Infill density	100	%
Infill layer height	0.2	mm
Infill pattern	Linear	-
Layer height	0.2	mm
Number of shells	4	-
Roof thickness	0.8	mm
Floor thickness	0.8	mm
Filament diameter	1.75	mm
Retraction distance	1.3	mm
Retraction speed	25	mm/s

Perancangan *Fitting*

Setelah mendapatkan data terkait kalibrasi mesin yang optimal untuk pencetakan, tahap selanjutnya adalah melakukan proses eksplorasi untuk merancang dan memproduksi prototipe *fitting.* Dua desain awal yang dibuat memiliki bentuk simetris dan asimetris, dengan perbedaan utama pada struktur penjepit. Desain simetris memiliki kedua sisi penjepit yang lurus, sejajar, dan meruncing ke bawah. Sedangkan desain asimetris memiliki satu sisi penjepit yang lurus dan sisi lainnya yang lebih miring. Dalam merancang sebuah produk, desainer perlu mempertimbangkan konteks dan situasi di mana produk akan digunakan [27]. Oleh karena itu, untuk memastikan bahwa *fitting* yang dirancang mempertimbangkan aspek fitur dan kualitas yang dibutuhkan oleh pengguna, proses pengembangan desain *fitting* dilakukan dalam 6 tahap utama yaitu:

1. Desain Awal: Dikembangkan dua desain penjepit (simetris dan asimetris) dengan struktur sederhana untuk menjepit tepi kardus, namun desain asimetris lebih kaku dibandingkan desain simetris.
2. Pengembangan Badan Utama Penjepit: Sudut penjepit dibuat melengkung untuk meningkatkan sifat kelenturan dan mengurangi risiko patah akibat konsentrasi tegangan yang terpusat pada satu titik.
3. Pengembangan Bukaan Penjepit: Lebar bukaan diperbesar untuk memudahkan pemasangan *fitting* pada kardus dengan ketebalan yang bervariasi tanpa mengurangi daya cengkeram.
4. Pengembangan Sambungan: Mekanisme sambungan *sliding* diterapkan pada desain asimetris, sedangkan *snap-fit* pada desain simetris. Pengembangan ini dilakukan agar *fitting* dapat dihubungkan satu sama lain untuk menyesuaikan panjang tepi kardus.
5. Pengembangan Sisi Penjepit: Komponen berbentuk pola berpetak ditambahkan pada bagian dalam sisi penjepit sehingga *fitting* dapat memberikan cengkeraman yang optimal saat diaplikasikan pada tepi material kardus.
6. Penyempurnaan Desain: Dilakukan modifikasi bagian-bagian permukaan *fitting* yang tajam menjadi lebih melengkung untuk meningkatkan kenyamanan pengguna tanpa mengurangi kekuatan struktural *fitting*.



Gambar. 3 Proses pengembangan desain fitting simetris dan asimetris.

Pengujian Kekuatan Struktural

Setelah mendapatkan desain akhir dari kedua model *fitting* yang telah dikembangkan, yaitu model simetris dan asimetris, dilakukan analisis numerik untuk mengetahui performa strukturalnya dengan *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan *software* simulasi Abaqus. Model yang akan dianalisis dibuat lebih sederhana dengan menghilangkan bentuk-bentuk yang tidak ada pengaruhnya terhadap aspek struktural yang akan diuji. Penyederhanaan ini dilakukan agar proses simulasi dapat berjalan lebih efisien.

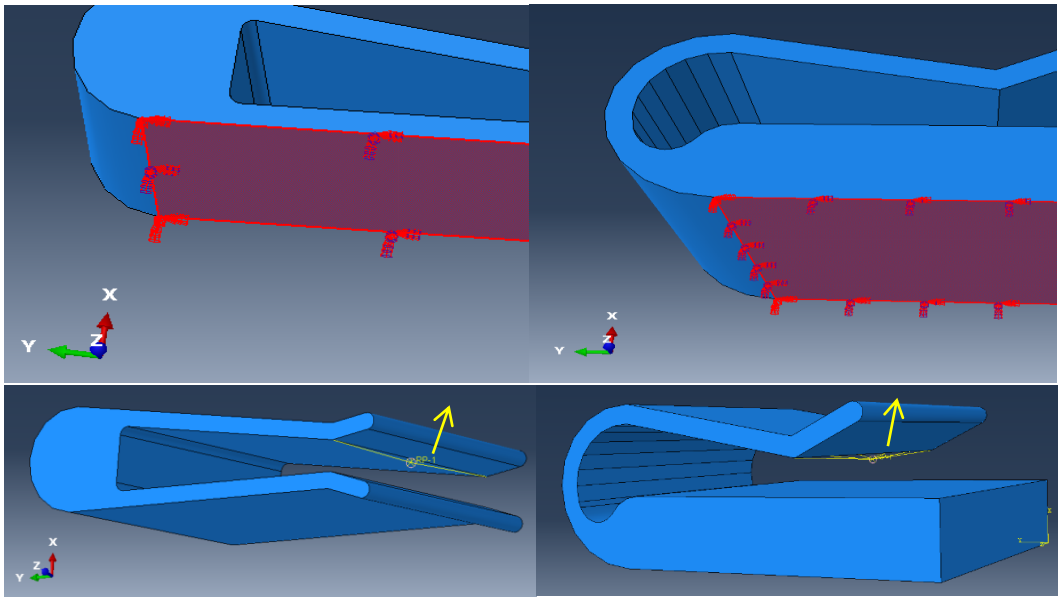
Elemen yang digunakan dalam simulasi adalah elemen solid tiga dimensi yang umum digunakan untuk dalam mekanika benda padat yaitu jenis C3D8R dengan ukuran *mesh* 0,5 mm. Elemen ini dipilih dengan pertimbangan untuk menjaga akurasi simulasi. Dalam penelitian ini, material yang digunakan adalah PLA yang diproduksi oleh MakerBot Industries. Untuk memastikan FEA dapat merepresentasikan perilaku material PLA secara akurat, data terkait sifat mekanik PLA yang digunakan dalam analisis ini (Tabel 2) diperoleh langsung dari situs resmi MakerBot [28].

Tabel 2 Sifat material PLA yang digunakan dalam penelitian ini [28].

Parameter	**Metric**
Tensile Strength at yield (ASTM D638, 50 mm/min)	62 MPa
Tensile Modulus (ASTM D638, 50 mm/min)	3,600 MPa
Poisson's	0.36

(a)

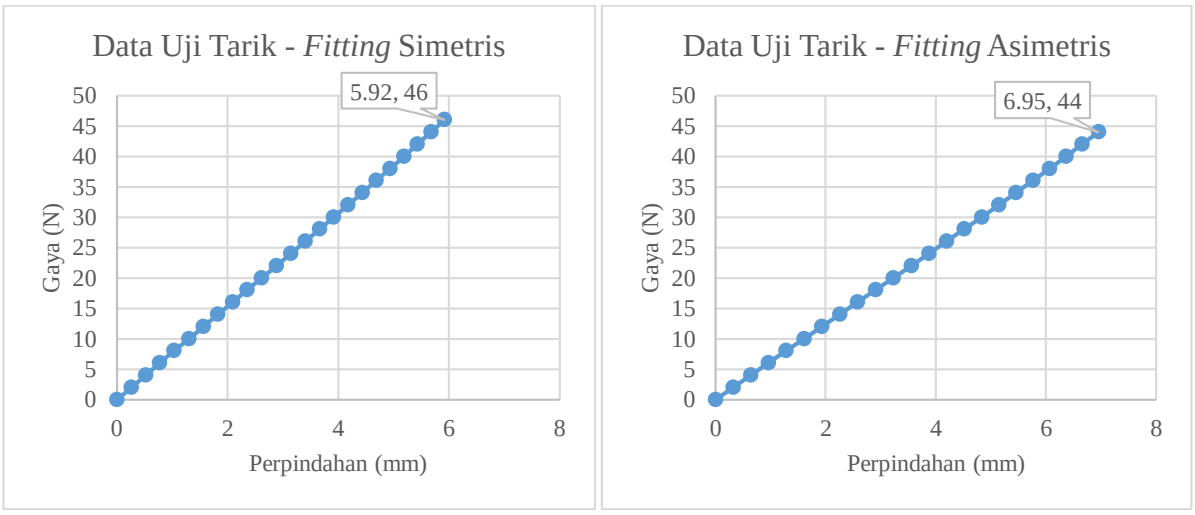
(b)



Gambar. 4 Syarat batas. (a) Bagian area yang dibuat tidak bergerak. (b) Bagian area yang diberikan gaya.

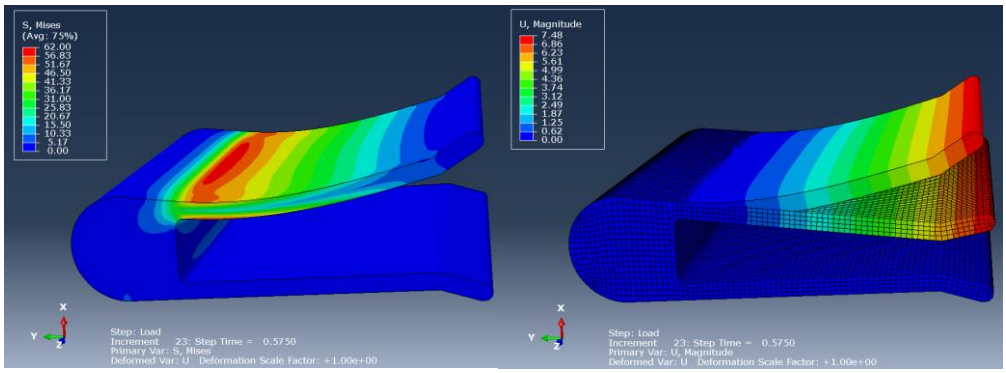
Syarat batas dalam analisis ini ditetapkan untuk mensimulasikan kondisi penggunaan nyata dari *fitting* saat menjepit tepi kardus dan menerima beban eksternal. Salah satu sisi penjepit *fitting* dibuat *fixed* (tidak bergerak) untuk merepresentasikan bagian yang diam dan tidak mengalami perpindahan yang ditandai dengan yang berwarna merah (Gambar 4a). Sementara itu, gaya tarik menerus diberikan pada sisi penjepit lainnya sebagai beban statik dalam arah tegak lurus terhadap permukaan penjepit yang ditandai dengan garis berwarna kuning (Gambar 4b).

(a) (b)

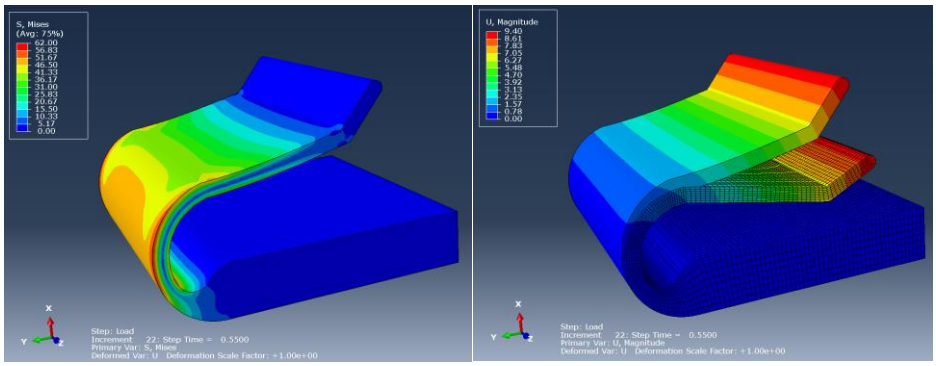


Bagan. 1 Hasil data kekuatan struktural. (a) Desain simetris, dan (b) desain asimetris.

Bagan 1a menunjukkan hasil FEA untuk *fitting* simetris. Pada *increment* ke-23, desain mencapai batas *tensile strength*, dengan tegangan von Mises 62 MPa dan perpindahan vertikal 5,92 mm pada gaya tarik 46 N (Gambar 5b). Distribusi tegangan (Gambar 5a) menunjukkan area dengan tegangan tertinggi, yang terpusat pada area sudut sisi penjepit. Adapun hasil FEA untuk *fitting* asimetris ditampilkan pada Bagan 1b. Pada *increment* ke-22, desain mencapai *tensile strength*. Tegangan von Mises tercatat 62 MPa dengan perpindahan 6,95 mm pada gaya tarik 44 N (Gambar 6b), lebih rendah dibanding desain simetris. Distribusi tegangan (Gambar 6a) menunjukkan area kritis di badan utama penjepit. Jika dibandingkan desain simetris, desain asimetris mengalami perpindahan vertikal yang lebih besar pada gaya tarik yang lebih rendah, menandakan bahwa desain ini memiliki sifat struktural yang lebih lentur.



Gambar. 5 Tampilan fitting simetris saat tensile strength (62 MPa) tercapai. (a) Tegangan von Mises, (b) perpindahan.

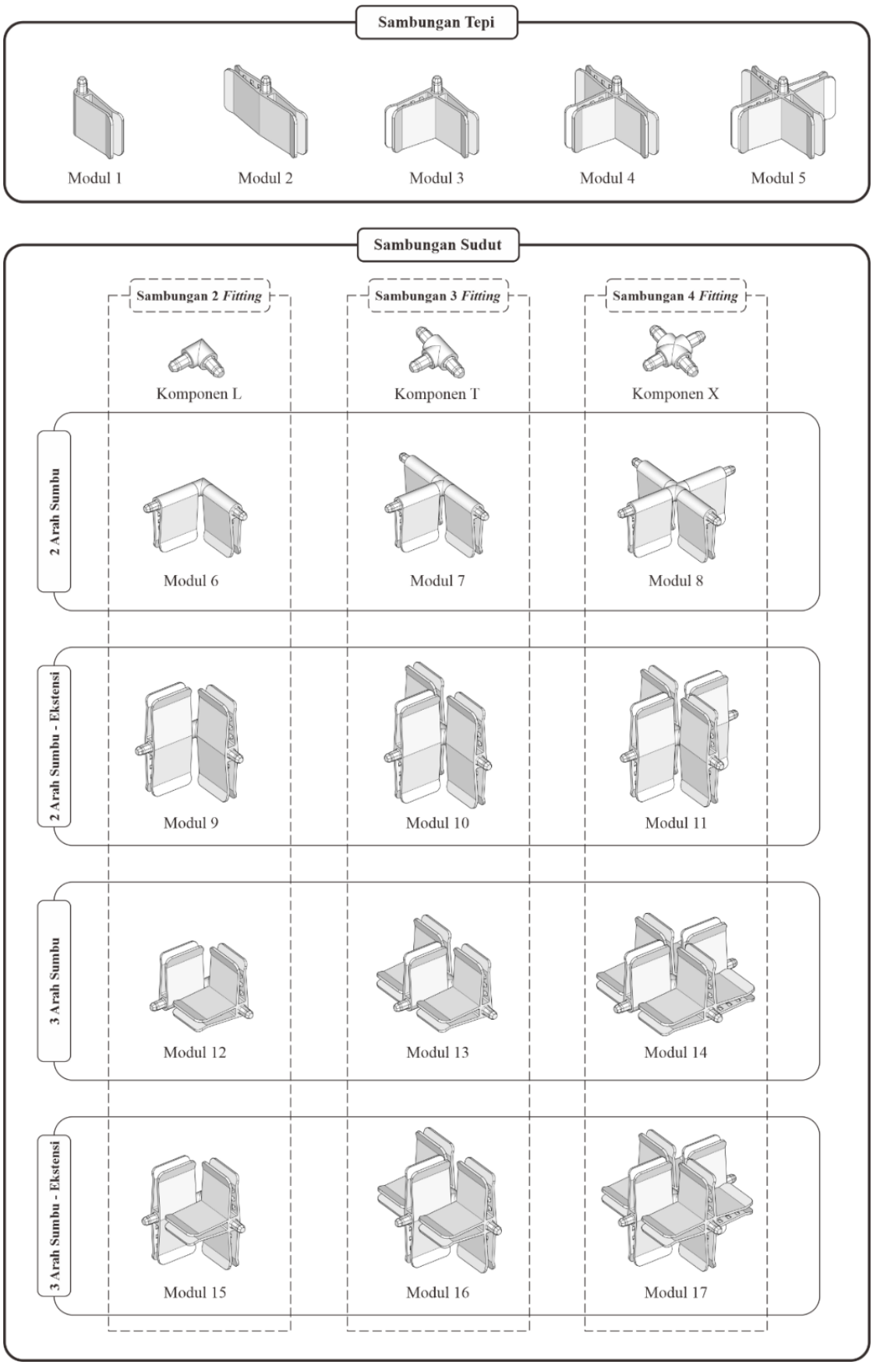


Gambar. 6 Tampilan fitting asimetris saat tensile strength (62 MPa) tercapai. (a) Tegangan von Mises, (b) perpindahan.

Dari hasil ini, dapat disimpulkan bahwa desain simetris lebih unggul dalam kekuatan struktural, sedangkan desain asimetris unggul dengan sifatnya yang lebih lentur. Sehingga desain simetris lebih direkomendasikan untuk aplikasi yang memerlukan ketahanan mekanis tinggi dan stabilitas struktural yang lebih baik.

DISKUSI

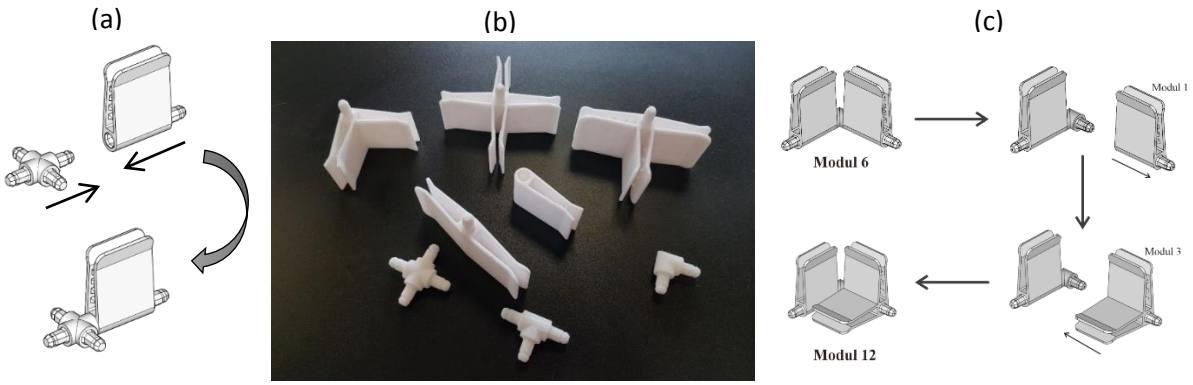
Berdasarkan hasil pengembangan desain dan pengujian struktural *fitting*, desain simetris dipilih menjadi model basis untuk pengembangan modul *fitting*. Pengembangan ini bertujuan agar *fitting* dapat lebih mudah disesuaikan dengan kebutuhan desain yang lebih kompleks, memperluas potensi penerapannya dalam sistem perakitan berbasis kardus. Gambar 7 menunjukkan hasil pengembangan 17 varian modul *fitting* simetris.



Gambar. 7 Hasil pengembangan 17 varian modul fitting.

Varian-varian tersebut terdiri dari tiga kategori yang masing-masing dirancang dengan fungsi dan mekanisme yang berbeda-beda. Ketiga kategori tersebut adalah sbb:

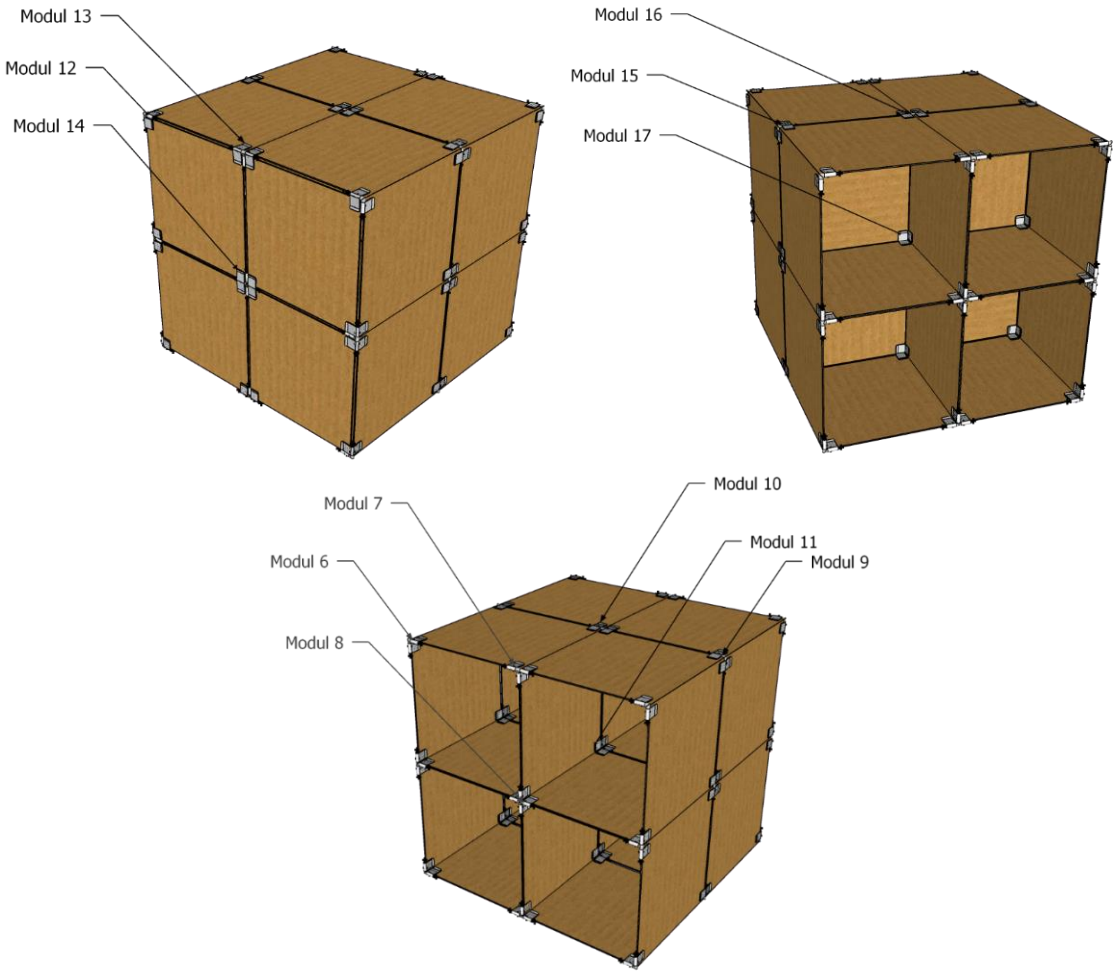
1. Modul Sambungan Tepi: Dirancang untuk menghubungkan lebih dari satu panel kardus pada bagian tepinya dalam variasi sudut kelipatan 90 derajat. Kategori ini terdiri dari varian Modul 1 – Modul 5.
2. Komponen Pendukung: Berfungsi sebagai komponen penghubung untuk varian modul. Jenis komponen pendukung terdiri dari 'Komponen L', 'Komponen T', dan 'Komponen X'. Mekanisme penggunaan komponen ini diilustrasikan pada Gambar 8a.
3. Modul Sambungan Sudut: Modul sambungan sudut terbentuk dari hasil gabungan antara varian modul sambungan tepi dengan komponen pendukung, sehingga menghasilkan modul *fitting* sambungan baru yang dapat diaplikasikan pada titik sudut konstruksi kardus. Kategori ini terdiri dari varian Modul 6 – Modul 17.



Gambar 8 (a) Mekanisme penggunaan komponen pendukung. (b) Hasil cetak modul sambungan tepi dan komponen pendukung. (c) Ilustrasi penggantian komponen pada modul fitting

Gambar 8b adalah hasil cetak dari modul sambungan tepi dan komponen pendukung. Keunggulan utama dari desain *fitting* ini adalah sistem modularnya, diamana varian *fitting* dihasilkan dari gabungan beberapa komponen modul. Jika pengguna ingin menggunakan *fitting* dengan konfigurasi yang berbeda, tidak perlu mengganti *fitting* secara keseluruhan. Cukup mengganti bagian yang ingin diubah, sementara komponen lainnya tetap dapat digunakan. Sebagai contoh (Gambar 8c), Modul 6 merupakan *fitting* yang terdiri dari dua komponen Modul 1 dan satu komponen sambungan "L". Jika ingin mengubahnya menjadi Modul 12, cukup mengganti satu Modul 1 dengan Modul 3, tanpa perlu mengganti seluruh komponen.

Gambar 9 menampilkan visual dari keseluruhan varian modul sebagai gambaran yang jelas mengenai bentuk serta mekanisme masing-masing modul. Konfigurasi ini mampu menghasilkan konstruksi modular yang dapat dirakit sesuai kebutuhan, cocok untuk aplikasi seperti rak, partisi, atau struktur eksperimental berbahan kardus.

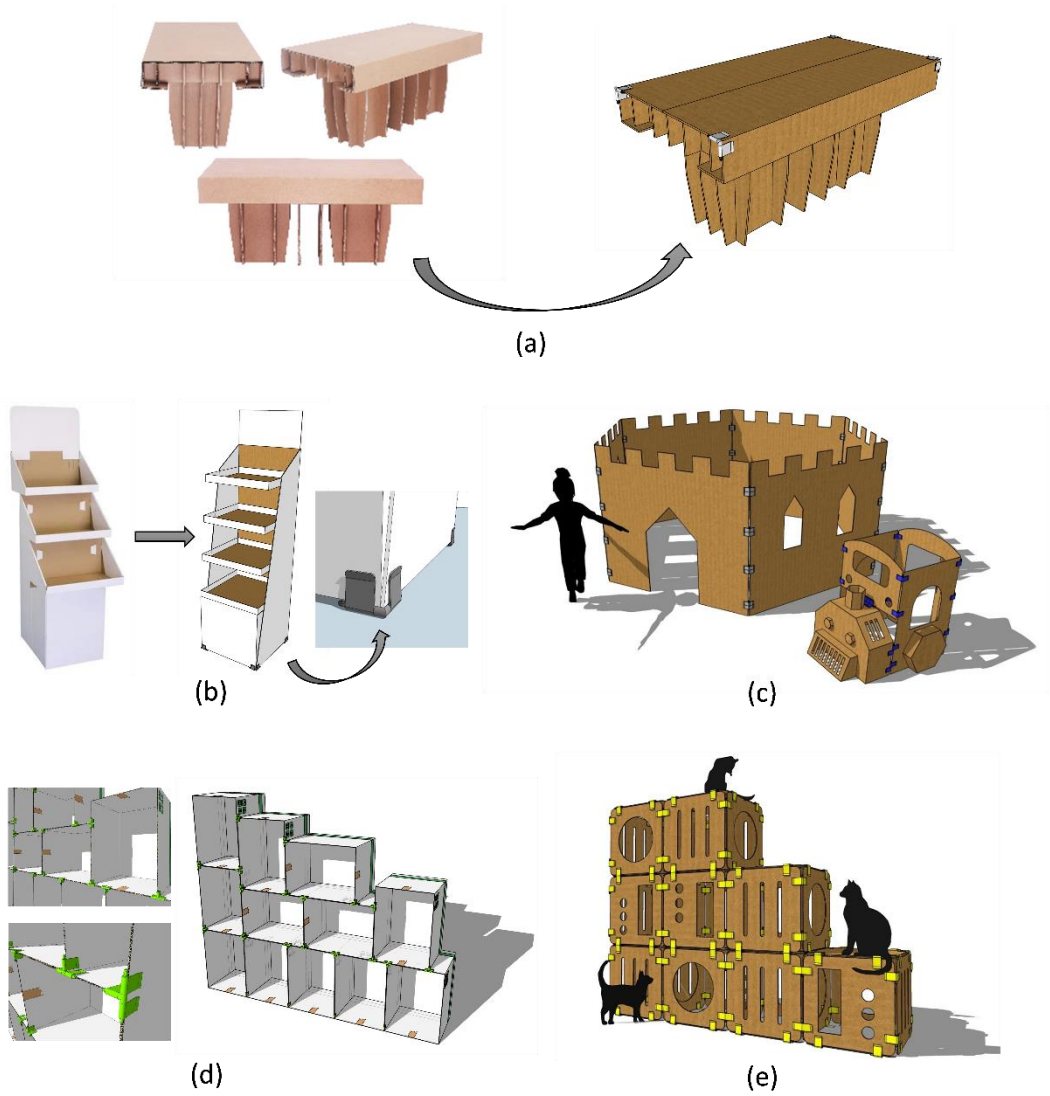


Gambar. 9 Hasil pengembangan 17 varian modul fitting.

Selain untuk merakit furnitur baru dengan modul kubus seperti pada Gambar 9, *fitting* ini juga dapat diterapkan pada furnitur yang telah ada sebagai komponen aksesoris, mainan anak-anak, hingga merakit furnitur sederhana dari sisa kardus bekas. Dengan adanya varian modul seperti ini, peluang untuk dikembangkan menjadi desain produk fungsional sangat terbuka lebar, bergantung pada kreativitas desainer dalam menentukan solusi kebaruan serta tujuan penggunaannya [29]. Berikut ini adalah beberapa contoh studi kasus penggunaan *fitting*:

1. Pelindung Sudut (Gambar 10a): Studi kasus diambil dari meja kardus "DUSTALE" oleh DusDukDuk [30]. Sama seperti kardus pada umumnya, dimana rentannya material terhadap benturan yang berisiko kerusakan khususnya pada area sudut furnitur. Dengan pemasangan *fitting* di sudut meja, risiko kerusakan dapat dikurangi, sehingga menjaga daya tahan furnitur.
2. Pelindung Kaki Rak (Gambar 10b): Studi kasus diambil pada salah satu desain rak POP display [31], dimana bagian kaki rak sering mengalami gesekan dengan lantai yang tidak rata atau basah. Dengan *fitting* ini, rak dapat terangkat 10 mm dari permukaan, menjaga kaki rak tetap kering dan bersih, serta mengurangi keausan.
3. Konstruksi Mainan (Gambar 10c): Modul *fitting* dengan berbagai variasi sudut dapat digunakan untuk membangun mainan sesuai dengan kreatifitas, seperti kereta, rumah kardus, atau bangunan kastil, yang mudah digunakan untuk anak-anak.

4. Furnitur dari Kardus Bekas (Gambar 10d): Kardus kemasan bekas dapat digunakan kembali menjadi rak sederhana dengan menyambungkan tiap kotak menggunakan *fitting*. Hasilnya, diperoleh furnitur yang multifungsi dan ekonomis.
5. Kandang Kucing Modular (Gambar 10e): Dengan menggunakan panel kardus *double-wall* berukuran 40 × 40 cm, *fitting* memungkinkan perakitan kandang kucing yang modular dan stabil. Desain ini dapat disesuaikan ukurannya, sesuai kebutuhan.



Gambar. 10 Ilustrasi penggunaan varian modul fitting. (a) Pelindung sudut, (b) pelindung kaki rak, (c) konstruksi mainan, (d) furnitur dari kardus bekas, (e) kandang kucing modular.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang dan mengembangkan *fitting* modular berbasis pencetakan 3D yang mampu mengoptimalkan sambungan pada furnitur kardus. Hasil analisis menunjukkan bahwa desain *fitting* simetris memiliki ketahanan struktural lebih baik dibandingkan desain asimetris, dengan kemampuan menahan gaya tarik hingga 50,01 N sebelum mencapai batas kekuatan material. Oleh karena itu, desain simetris dipilih sebagai basis pengembangan lebih lanjut.

Dari pengembangan ini, dihasilkan 17 varian modul *fitting* yang terdiri dari modul sambungan tepi, modul sambungan sudut, dan komponen pendukung. Varian *fitting* ini memungkinkan fleksibilitas dalam perakitan furnitur kardus, serta mengoptimalkan stabilitas strukturalnya. Selain itu, sistem modular yang diterapkan memungkinkan penggunaan *fitting* secara lebih efisien dengan opsi penggantian bagian tertentu tanpa harus mengganti keseluruhan modul.

Fitting yang dikembangkan dalam penelitian ini memiliki berbagai potensi penerapan, mulai dari pembuatan furnitur modular, komponen aksesoris untuk furnitur kardus yang telah ada, konstruksi mainan, hingga penggunaan ulang kardus bekas untuk menciptakan furnitur sederhana. Dengan demikian, hasil penelitian ini memberikan kontribusi dalam mengoptimalkan desain furnitur kardus melalui pemanfaatan teknologi pencetakan 3D. Untuk penelitian selanjutnya, direkomendasikan eksplorasi lebih lanjut terhadap pengembangan furnitur kardus yang secara khusus dirancang menggunakan modul *fitting* ini, serta evaluasi ketahanan strukturalnya.

DAFTAR PUSTAKA

[1] "Cardboard Furniture Manufacturing Business SWOT Analysis," finmodelslab.com. Diakses: 10 November 2024. [Daring]. Tersedia pada: https://finmodelslab.com/products/cardboard-furniture-manufacturing-swot-analysis?variant=43997256646899

[2] L. J. Bi, "Research on Corrugated Cardboard and its Application," *Adv Mat Res*, vol. 535–537, hlm. 2171–2176, Jun 2012, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.535-537.2171.

[3] B. Suarez, L. M. Muneta, G. Romero, dan J. D. Sanz-Bobi, "Efficient Design of Thin Wall Seating Made of a Single Piece of Heavy-Duty Corrugated Cardboard," *Materials*, vol. 14, no. 21, hlm. 6645, Nov 2021, doi: 10.3390/ma14216645.

[4] J. chen Li dan J. C. Kang, "Sustainable design-based corrugated furniture design and strategy research," *Korea Institute of Design Research Society*, vol. 7, no. 4, hlm. 363–375, Des 2022, doi: 10.46248/kidrs.2022.4.363.

[5] X. Wei, "Cardboard Furniture Design Under Low Carbon Economy," dalam *Informatics and Management Science II*, W. Du, Ed., London: Springer, 2013, hlm. 199–204. doi: 10.1007/978-1-4471-4811-1_27.

[6] V. Jivkov dan B. Petrova, "Challenges for Furniture Design with Thin Structural Materials," dalam *International Furniture Congress VI*, Trabzon, Nov 2021. [Daring]. Tersedia pada: https://www.researchgate.net/publication/349075362

[7] J. Smardzewski, *Furniture Design*, 1 ed. Cham: Springer International Publishing, 2015. doi: 10.1007/978-3-319-19533-9.

[8] S. Demirel dan H. Eyüboğlu, "A bibliometric evaluation on furniture joints studies," *Turkish Journal of Forestry | Türkiye Ormancılık Dergisi*, hlm. 56–63, Feb 2024, doi: 10.18182/tjf.1389049.

[9] D. Natalya, "brown cardboard partition with cells for a box, subject for transporting bottles on a white background," alamy.com. Diakses: 19 Januari 2025. [Daring]. Tersedia pada: https://www.alamy.com/brown-cardboard-partition-with-cells-for-a-box-subject-for-transporting-bottles-on-a-white-background-image363534430.html

[10] D. Natalya, "brown corrugated paper cardboard box with partitions, glass bottle transport box, close up," alamy.com. Diakses: 19 Januari 2025. [Daring]. Tersedia pada: https://www.alamy.com/brown-corrugated-paper-cardboard-box-with-partitions-glass-bottle-transport-box-close-up-image402430359.html

[11] B. Budiono, "Studi Kursi Berbahan Kardus," *Jurnal Desain Interior*, vol. 1, no. 1, hlm. 77, Apr 2016, doi: 10.12962/j12345678.v1i1.1463.

[12] R. Siani, "Digital Fabrication Joints: Educational experience," dalam *Proceedings of the 41st Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe (eCAADe 2023)*, Graz: Digital Design Reconsidered, Sep 2023, hlm. 339–346. doi: 10.52842/conf.ecaade.2023.1.339.

[13] A. F. Aiman, H. Sanusi, A. H. M. Haidiezul, dan H. Y. Cheong, "Design and structural analysis of 3D-printed modular furniture joints," *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 932, no. 1, hlm. 012101, Sep 2020, doi: 10.1088/1757-899X/932/1/012101.

[14] A. Nicolau, M. A. Pop, dan C. Coșereanu, "3D Printing Application in Wood Furniture Components Assembling," *Materials*, vol. 15, no. 8, hlm. 2907, Apr 2022, doi: 10.3390/ma15082907.

[15] N. Grujovic *dkk.*, "Custom design of furniture elements by fused filament fabrication," *Proc Inst Mech Eng C J Mech Eng Sci*, vol. 231, no. 1, hlm. 88–95, Jan 2017, doi: 10.1177/0954406216646401.

[16] M. Zach, J. Tauber, P. Dohnal, dan J. Svoboda, "Designing Multi-Functional Magnetic Storage Cubes for Use in Modern Homes and Schools," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 2, hlm. 829, Jan 2024, doi: 10.3390/app14020829.

[17] A. Nicolau, M. A. Pop, S. V. Georgescu, dan C. Coșereanu, "Application of Additive Manufacturing Technology for Chair Parts Connections," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 21, hlm. 12044, Nov 2023, doi: 10.3390/app132112044.

[18] I. Gibson, D. Rosen, dan B. Stucker, *Additive Manufacturing Technologies*, 2 ed. New York, NY: Springer New York, 2015. doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3.

[19] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, dan D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," *Compos B Eng*, vol. 143, hlm. 172–196, Jun 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.02.012.

[20] P. McKeown dan M. D. Jones, "The Chemical Recycling of PLA: A Review," *Sustainable Chemistry*, vol. 1, no. 1, hlm. 1–22, Mei 2020, doi: 10.3390/suschem1010001.

[21] J. Smardzewski, B. Rzepa, dan H. Kılıç, "Mechanical Properties of Externally Invisible Furniture Joints Made of Wood-Based Composites," *Bioresources*, vol. 11, no. 1, Des 2015, doi: 10.15376/biores.11.1.1224-1239.

[22] M. Podskarbi dan J. Smardzewski, "Numerical modelling of new demountable fasteners for frame furniture," *Eng Struct*, vol. 185, hlm. 221–229, Apr 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.01.135.

[23] J. Tauber, J. Svoboda, dan Z. Holouš, "Design and construction of a multifunctional exhibition element using 3D printing," dalam *Sustainability of Forest-Based Industries in the Global Economy - Proceedings of Scientific Papers*, Joint 13th International Scientific Conference WoodEMA 2020 and the 31st International Scientific Conference, 2020, hlm. 341–347.

[24] T. Kuşkun, A. Kasal, G. Çağlayan, E. Ceylan, M. Bulca, dan J. Smardzewski, "Optimization of the Cross-Sectional Geometry of Auxetic Dowels for Furniture Joints," *Materials*, vol. 16, no. 7, hlm. 2838, Apr 2023, doi: 10.3390/ma16072838.

[25] S. Demirel, N. T. Kuvel, K. Çava, dan M. Aslan, "The performance of 3d printed dowel with three different surface designs in furniture joints," *Turkish Journal of Forestry | Türkiye Ormancılık Dergisi*, hlm. 100–106, Des 2023, doi: 10.18182/tjf.1387389.

[26] C. Wang, C. Zhang, dan Y. Zhu, "Reverse design and additive manufacturing of furniture protective foot covers," *Bioresources*, vol. 19, no. 3, hlm. 4670–4678, Mei 2024, doi: 10.15376/biores.19.3.4670-4678.

[27] W. Aulia, I. Santosa, M. Ihsan, dan A. Nugraha, "Utilizing the Appropriate Technology Paradigm in Industrial Design: A Literature Review," *JDI*, vol. 5, no. 2, hlm. 70–86, Sep 2023, doi: 10.52265/jdi.v5i2.276.

[28] MakerBot, "Everything you need to know about PLA 3D Printing," makerbot.com. Diakses: 28 Januari 2025. [Daring]. Tersedia pada: https://www.makerbot.com/stories/everything-you-need-to-know-about-pla-3d-printing/

[29] I. Sanusi, "Modular Design Based on Platonic Solid Polyhedrons Through a Parametric Design Approach," *JDI*, vol. 6, no. 2, hlm. 253–267, Sep 2024, doi: doi.org/10.52265/jdi.v6i2.468.

[30] DusDukDuk, "Dus Duk Duk - PT Kreasi Karya Raya," Instagram. Diakses: 10 Oktober 2024. [Daring]. Tersedia pada: https://www.instagram.com/dusdukduk

[31] "Cardboard Corrugated POP Display, for Advertisement," indiamart.com. Diakses: 3 Februari 2025. [Daring]. Tersedia pada: https://www.indiamart.com/proddetail/corrugated-pop-display-21080000873.html