

Pengembangan *Smart Healthy Box* Menggunakan Material Biodegradable sebagai Solusi Ramah Lingkungan

Farhansyah^{1*}, Muhammad Taufik Rachman², Marcelo Andika Pamasi³, Muh
Ihsan⁴, Rahmat Ramadhan⁵, and Martina Puspita Sari⁶

¹²³⁴⁵⁶Teknik Mesin, Institut Teknologi Kalimantan

Abstrak

Perkembangan teknologi kesehatan mendorong lahirnya inovasi perangkat penyimpanan obat cerdas atau *Smart Healthy Box* (SHB) yang dapat membantu pengguna dalam pengelolaan obat secara efisien. Namun, penggunaan material plastik konvensional seperti ABS dan PP pada produk serupa menimbulkan permasalahan lingkungan karena sulit terurai secara alami. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan desain *Smart Healthy Box* berbasis material biodegradable, yaitu Polylactic Acid (PLA), serta membandingkan performanya dengan Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) melalui simulasi sifat mekanik. Analisis dilakukan menggunakan metode finite element simulation untuk mengevaluasi tegangan (stress), regangan (strain), dan deformasi total (displacement) pada model 3D. Hasil simulasi menunjukkan bahwa material PLA memiliki nilai tegangan maksimum sebesar $1,001 \times 10 \text{ N/m}^2$ dan regangan sebesar $2,138 \times 10^1$, sedangkan ABS memiliki nilai tegangan maksimum $9,808 \times 10 \text{ N/m}^2$ dan regangan $3,759 \times 10$. Hal ini menandakan bahwa PLA memiliki kekakuan dan kekuatan tekan yang lebih tinggi, sementara ABS menunjukkan fleksibilitas dan ketahanan deformasi yang lebih baik. Dengan demikian, penggunaan PLA pada *Smart Healthy Box* dinilai potensial sebagai solusi ramah lingkungan yang tetap memenuhi kebutuhan stabilitas struktural dan keamanan produk medis.

Keywords: Smart Healthy Box; Polylactic Acid (PLA); Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS); Stress; Strain; Biodegradable Material.

Abstract

The advancement of healthcare technology has led to the innovation of smart medication storage devices, known as the Smart Healthy Box (SHB), designed to help users manage their medication schedules efficiently. However, the use of conventional plastics such as ABS and PP in similar products raises environmental concerns due to their non-biodegradable nature. This study aims to develop a Smart Healthy Box design using biodegradable material, Polylactic Acid (PLA), and compare its mechanical performance with Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) through mechanical property simulations. The analysis was conducted using the finite element simulation method to evaluate stress, strain, and total deformation on a 3D model. Simulation results show that PLA exhibits a maximum stress of $1.001 \times 10 \text{ N/m}^2$ and strain of 2.138×10^1 , while ABS records a maximum stress of $9.808 \times 10 \text{ N/m}^2$ and strain of 3.759×10 . These results indicate that PLA has higher stiffness and compressive strength, whereas ABS demonstrates better flexibility and deformation resistance. Therefore, the use of PLA in Smart Healthy Box design is considered a promising eco-friendly solution that maintains structural stability and product safety for medical applications.

Keywords: Smart Healthy Box; Polylactic Acid (PLA); Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS); Stress; Strain; Biodegradable Material.

Article Info Open Access

Submitted 2 Dec 2025

Accepted 10 Jan 2026

*Corresponding author
03221079@student.itk.ac.id

Citation

Volume 1 No. 1 (2026)
Journal of Mechanical and
Industrial
doi:
10.18860/jomi.v1i1.37930

1 Pendahuluan

Perkembangan teknologi di bidang kesehatan telah mendorong terciptanya berbagai inovasi untuk meningkatkan kualitas hidup manusia, salah satunya melalui perangkat penyimpanan

obat cerdas atau Smart Healthy Box (SHB). Alat ini dirancang untuk membantu pasien dalam mengingatkannya tentang obatnya ketika waktunya tiba, meminimalkan risiko kelalaian, serta meningkatkan kepatuhan terapi, khususnya bagi pasien dengan pengobatan jangka panjang [1]. Namun, di sisi lain, peningkatan produksi alat elektronik dan plastik sekali pakai dalam bidang kesehatan turut menimbulkan permasalahan lingkungan yang signifikan akibat sulitnya material tersebut terurai secara alami. Permasalahan utama dari plastik adalah sifatnya yang tahan terhadap degradasi, sehingga sampah plastik akan sulit untuk hilang dari lingkungan. Sampah plastik juga kurang efisien untuk didaur ulang karena memiliki titik leleh yang rendah sehingga sulit untuk dibersihkan dari pengotornya [2].

Sebagian besar perangkat penyimpanan obat konvensional masih menggunakan material plastik berbasis petrokimia seperti ABS atau PP yang tidak ramah lingkungan dan memerlukan waktu ratusan tahun untuk terurai [3]. Oleh karena itu, diperlukan alternatif material yang memiliki sifat mekanik memadai, aman untuk obat, serta dapat terdegradasi secara hayati. Salah satu material yang berpotensi memenuhi kriteria tersebut adalah biodegradable polymer, khususnya Polylactic Acid (PLA).

Polylactic Acid (PLA) adalah salah satu material bioplastik yang semakin populer, memiliki potensi besar sebagai alternatif plastik konvensional. PLA terbuat dari sumber bahan alam terbarukan, seperti jagung, singkong, dan gula tebu, yang mengalami fermentasi karbohidrat untuk memproduksi asam laktat melalui proses biokimia. Material PLA memiliki keunggulan berupa sifat biokompatibel, non-toksik, dan mampu terurai oleh mikroorganisme tanpa meninggalkan residu berbahaya, sehingga sangat cocok digunakan pada perangkat kesehatan ramah lingkungan. Dengan memanfaatkan PLA sebagai bahan utama Smart Healthy Box, diharapkan tercipta inovasi yang tidak hanya mendukung efisiensi dan keamanan penyimpanan obat, tetapi juga berkontribusi dalam mengurangi limbah plastik non-biodegradable di lingkungan [4].

Melalui pengembangan ini, Smart Healthy Box berbasis material biodegradable menjadi langkah nyata menuju penerapan prinsip teknologi hijau (green technology). Teknologi hijau dapat mengatasi masalah kemusnahan alam sekitar dan sumber asli, meningkatkan tahap kesehatan dan kehidupan, serta memelihara ekosistem [5]. Juga sustainable product design dalam bidang teknik dan kesehatan, sekaligus mendukung pencapaian Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (SDGs), khususnya poin ke-3 (Good Health and Well-Being) dan poin ke-12 (Responsible Consumption and Production) [6].

2 Metode

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dan perancangan produk (product design method) yang difokuskan pada proses pengembangan Smart Healthy Box (SHB) berbahan biodegradable polymer jenis Polylactic Acid (PLA). Metode ini meliputi beberapa tahapan, yaitu perancangan konsep, pemilihan material, pemodelan 3D, simulasi kekuatan material, serta analisis hasil untuk menentukan kelayakan desain.

Dalam penelitian ini, digunakan beberapa rumus dasar mekanika material untuk menganalisis kekuatan struktur Smart Healthy Box berbahan *Polylactic Acid* (PLA). Rumus-rumus tersebut digunakan untuk menghitung tegangan, regangan, modulus elastisitas, serta parameter lain yang mendukung proses simulasi dan evaluasi desain. Adapun rumus yang digunakan dijelaskan sebagai berikut:

1. Tegangan (*Stress*)

Tegangan merupakan besarnya gaya yang bekerja pada suatu luas penampang material. Nilai tegangan dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

di mana σ adalah tegangan (MPa), F adalah gaya (N), dan A merupakan luas penampang (mm²) [7].

Tabel 1. Material properti PLA dan ABS [11]

Parameter Simulasi	Satuan	Polylactic Acid	Acrylonitrile Butadiene Styrene
Tegangan	N/m^2	1.001×10^6	9.828×10^5
Regangan	%	2.138×10^{10}	3.579×10^{-4}
Modulus Elastisitas	N/m^2	4.68×10^{-5}	2.746×10^{11}
Defleksi Maksimum	mm	7.780×10^9	1.4×10^{-2}
Poisson's Rasio	N/A	0.36	0.394
Yield Strength	N/mm^2	5×10^7	-
Massa Densitas	kg/m^3	1250	1020

2. Regangan (Strain)

Regangan menunjukkan perubahan panjang material akibat gaya yang bekerja terhadapnya. Rumus regangan dituliskan sebagai:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

dengan ε adalah regangan (tanpa satuan), L adalah pertambahan panjang (mm), dan L_0 adalah panjang awal (mm) [8].

3. Modulus Elastisitas (Young's Modulus)

Modulus elastisitas menunjukkan tingkat kekakuan material dan dihitung dari perbandingan antara tegangan dan regangan:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3)$$

di mana E adalah modulus elastisitas (MPa) [9].

4. Defleksi Maksimum (Maximum Deflection) Untuk mengetahui kekakuan struktur terhadap pembebanan, defleksi maksimum dihitung dengan persamaan:

$$\delta_{max} = \frac{FL^3}{3EI} \quad (4)$$

di mana δ_{max} adalah defleksi maksimum (mm), F adalah gaya (N), L adalah panjang komponen (mm), E adalah modulus elastisitas (MPa), dan I adalah momen inersia penampang (mm) [10].

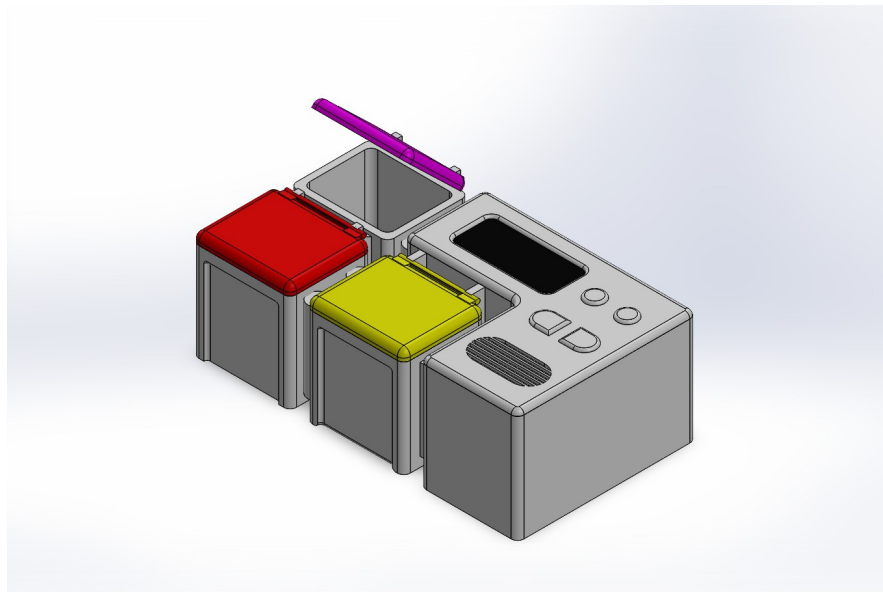
Dalam proses analisis, dilakukan perbandingan material yang digunakan antara jenis Polylactic Acid (PLA) dengan Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), yang masing-masing memiliki sifat mekanik yang berbeda. Adapun pembebanan yang dilakukan dalam melakukan pengujian guna pengujian sifat mekanik material dan simulasi struktural pada komponen Smart Healthy Box berbahan Polylactic Acid (PLA).

Melalui perbandingan properti material seperti Modulus Elastisitas (E) dan Massa Densitas (ρ), diharapkan dapat diperoleh pemahaman mengenai material mana yang lebih unggul dari segi kekuatan struktural, kekakuan, dan bobot untuk diaplikasikan pada bingkai (frame) produk seperti Smart Healthy Box. Material Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) menunjukkan Modulus Elastisitas yang jauh lebih tinggi ($2.7461011 N/m^2$) dibandingkan dengan Polylactic Acid (PLA) ($4.6810^{-5} N/m^2$), mengindikasikan bahwa ABS secara signifikan lebih kaku. Meskipun demikian, PLA memiliki Massa Densitas yang lebih tinggi ($1250 Kg/m^3$) daripada ABS ($1020 Kg/m^3$). Dalam proses pemilihan material untuk perangkat yang membutuhkan sifat biodegradable, seperti yang diusulkan dalam penelitian ini, properti mekanik tersebut harus dievaluasi secara sistematis melalui simulasi untuk memastikan performa struktural dan kekuatan luluh (Yield Strength) tercapai.

3 Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian ini diperoleh melalui proses simulasi sifat mekanik material terhadap dua jenis polimer, yaitu Polylactic Acid (PLA) dan Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS), yang umum digunakan sebagai bahan dasar pembuatan produk berbasis plastik. Kedua material tersebut dianalisis untuk mengetahui perbedaan karakteristik mekanik yang meliputi tegangan (stress), regangan (strain), dan perpindahan (displacement).

Analisis ini bertujuan untuk menentukan material yang paling sesuai digunakan pada produk Smart Healthy Box dengan mempertimbangkan kekuatan struktural, kekakuan, dan keamanan lingkungan. Proses simulasi dilakukan dengan memberikan pembebanan pada model komponen dan mengamati respon material terhadap gaya yang bekerja. Hasil simulasi menunjukkan bahwa terdapat perbedaan yang cukup signifikan antara PLA dan ABS, baik dari segi ketahanan terhadap beban maupun kemampuan deformasi yang terjadi.



Gambar 1. Desain Smart Healty Box

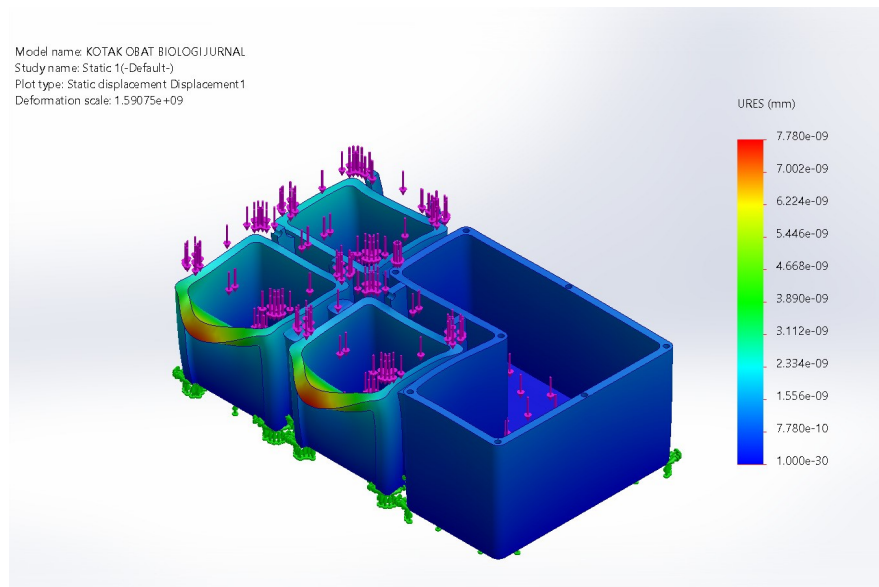
3.1 Hasil simulasi Perbandingan Displacement material PLA dan ABS

Hasil simulasi deformasi total (static displacement) menunjukkan bahwa Polylactic Acid (PLA) mengalami perpindahan (displacement) yang jauh lebih besar dibandingkan dengan Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS). Berdasarkan data hasil simulasi yang ditampilkan pada post-processing, nilai displacement maksimum untuk PLA mencapai 7.780×10^{-2} mm, sedangkan pada ABS sebesar 1.400×10^{-2} mm.

Perbedaan ini mengindikasikan bahwa PLA memiliki tingkat kelenturan yang sangat tinggi, namun pada saat yang sama memiliki kekakuan struktural yang lebih rendah dibandingkan ABS. Warna dominan biru hingga hijau pada model PLA menunjukkan bahwa sebagian besar area struktur mengalami deformasi dalam batas elastis yang relatif aman, tetapi area berwarna kuning hingga merah (terutama di tepi wadah dan pertemuan antar-kompartemen) menandakan titik-titik yang menerima gaya maksimum dan menjadi pusat defleksi terbesar.

Sebaliknya, hasil simulasi untuk ABS memperlihatkan distribusi warna yang relatif homogen dalam rentang biru muda hingga hijau, menandakan bahwa deformasi yang terjadi sangat kecil dan lebih merata di seluruh struktur. Nilai displacement maksimum ABS (1.4×10^{-2} mm) memperlihatkan bahwa material ini jauh lebih kaku dan stabil secara dimensi, sehingga lebih mampu mempertahankan bentuknya di bawah pembebanan yang sama.

Dapat disimpulkan bahwa PLA mengalami deformasi sekitar sejuta kali lebih besar dibanding ABS pada beban identik. Hal ini sesuai dengan nilai modulus elastisitas yang jauh lebih rendah pada PLA.



Gambar 2. Displacement material PLA

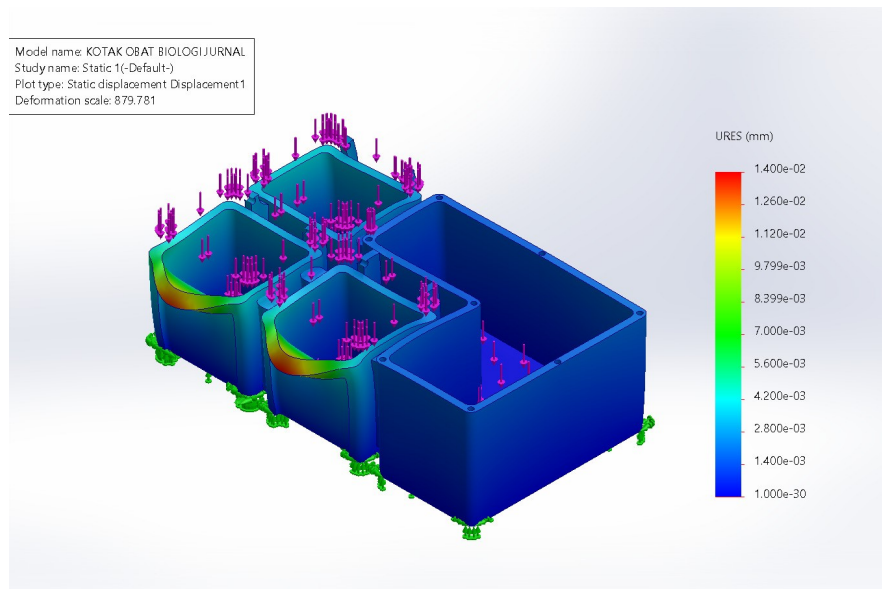
Namun, untuk aplikasi Smart Healthy Box yang tidak menanggung beban berat, tingkat defleksi tersebut masih dapat diterima selama tidak mengganggu fungsi komponen, seperti sambungan penutup dan dudukan elektronik.

3.2 Hasil simulasi Perbandingan Strain material PLA dan ABS

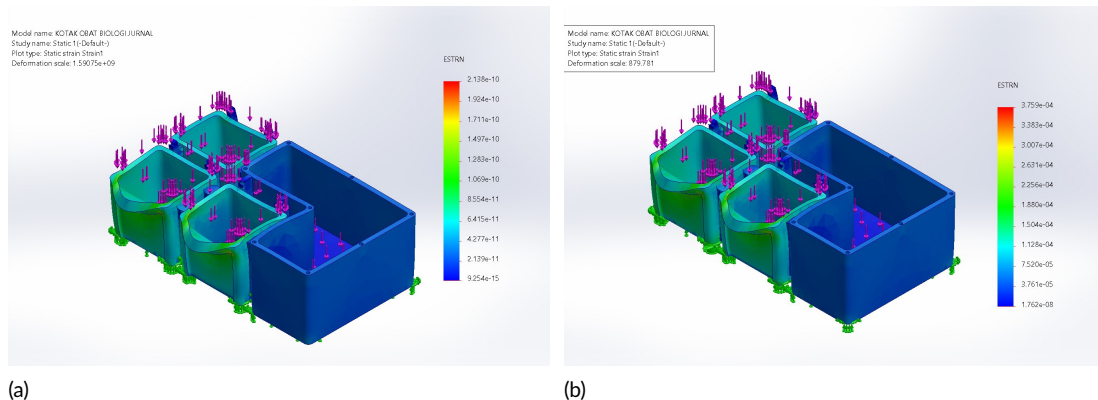
Hasil analisis regangan (*static strain analysis*) menunjukkan bahwa nilai regangan maksimum untuk material PLA adalah sekitar $2,138 \times 10^1$, dengan warna dominan biru hingga hijau yang menandakan deformasi sangat kecil. Hal ini memperkuat karakteristik PLA sebagai material yang kaku dan stabil secara dimensional, namun kurang mampu menyerap deformasi plastis. Sebaliknya, pada material ABS, nilai regangan maksimum meningkat hingga $3,759 \times 10$, dengan area berwarna merah hingga kuning yang lebih luas pada dinding tengah dan bagian tepi. Kondisi ini menunjukkan bahwa ABS memiliki elastisitas yang lebih tinggi dan mampu menahan deformasi tanpa mengalami kegagalan struktural. Regangan yang lebih besar ini menunjukkan bahwa ABS lebih toleran terhadap beban kejut atau dampak berulang dibandingkan PLA. Dengan demikian, dari sisi regangan, PLA unggul dalam stabilitas bentuk dan kekakuan, sedangkan ABS lebih baik dalam fleksibilitas dan ketahanan terhadap deformasi plastis.

3.3 Hasil simulasi Perbandingan Stress material PLA dan ABS

Berdasarkan hasil simulasi analisis tegangan (*static nodal stress – von Mises*), terlihat perbedaan distribusi tegangan antara material PLA dan ABS pada model kotak obat biologi. Pada material PLA, nilai tegangan maksimum mencapai sekitar $1,001 \times 10 \text{ N/m}^2$, dengan area berwarna merah yang terletak di bagian sudut dan dinding tengah wadah. Sebagian besar permukaan menunjukkan warna biru hingga hijau yang menandakan tegangan rendah dan penyebaran gaya yang merata. Hal ini menunjukkan bahwa PLA memiliki kekakuan dan kekuatan tekan tinggi, serta mampu mempertahankan bentuk terhadap beban yang diterapkan. Namun, karena karakteristik PLA yang cenderung getas, potensi retak akibat tegangan berlebih tetap perlu diperhatikan. Sementara itu, material ABS menunjukkan tegangan maksimum sekitar $9,808 \times 10 \text{ N/m}^2$, sedikit lebih rendah dibanding PLA. Warna hijau mendominasi pada hampir seluruh bagian dinding, dengan sedikit area kuning di sekitar lengkungan. Hal ini menandakan bahwa ABS memiliki kemampuan menyebarkan tegangan secara lebih merata dan bersifat lebih lentur, sehingga mampu menahan beban tanpa mengalami konsentrasi tegangan tinggi pada titik-titik tertentu. Secara keseluruhan, dapat disimpulkan bahwa PLA memiliki kekuatan tekan yang lebih tinggi, sedangkan ABS lebih unggul dalam hal fleksibilitas dan ketahanan terhadap deformasi lokal.



Gambar 3. Displacement material ABS

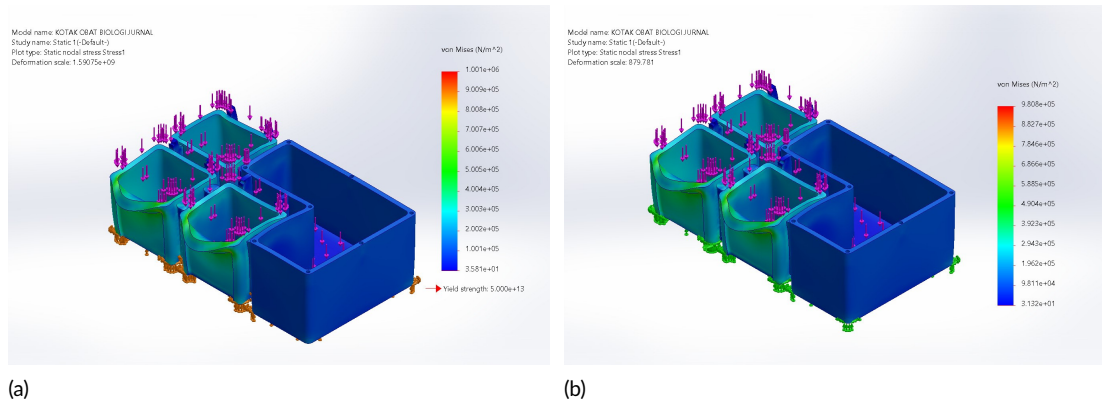


Gambar 4. Strain (a) Material PLA (b) Material ABS

Berdasarkan hasil simulasi pada Tabel 2, terlihat bahwa Polylactic Acid (PLA) dan Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) memiliki karakteristik mekanik yang berbeda cukup signifikan. Nilai tegangan maksimum yang dicapai PLA adalah $1,001 \times 10 \text{ N/m}^2$, sedikit lebih tinggi dibanding ABS sebesar $9,828 \times 10 \text{ N/m}^2$, menandakan bahwa PLA mampu menahan gaya eksternal dengan baik sebelum mengalami deformasi. Namun, pada aspek modulus elastisitas, ABS menunjukkan nilai $2,746 \times 10^{11} \text{ N/m}^2$, jauh lebih besar dibanding PLA yang hanya $4,68 \times 10 \text{ N/m}^2$. Hal ini menunjukkan bahwa ABS jauh lebih kaku dan tidak mudah berubah bentuk, sedangkan PLA bersifat lebih lentur dan mudah mengalami deformasi ketika diberi beban.

Nilai defleksi maksimum pada PLA mencapai $7,780 \times 10 \text{ mm}$, jauh lebih besar dibanding ABS yang hanya $1,4 \times 10^2 \text{ mm}$. Kondisi ini menegaskan bahwa PLA memiliki tingkat kelenturan tinggi dan mampu menyerap beban dengan deformasi yang lebih besar, sementara ABS tetap stabil secara struktural. Dari sisi massa jenis, PLA memiliki nilai 1.250 kg/m^3 , sedikit lebih padat dibanding ABS yang bernilai 1.020 kg/m^3 . Kepadatan yang sedikit lebih besar ini tidak berpengaruh signifikan terhadap berat total produk, tetapi memberikan kestabilan yang baik pada struktur Smart Healthy Box.

Secara keseluruhan, ABS unggul dalam aspek kekakuan dan deformasi rendah, menjadikannya ideal untuk komponen struktural yang menanggung beban besar. Sementara itu, PLA unggul pada aspek fleksibilitas, keamanan, dan keberlanjutan lingkungan, menjadikannya pilihan tepat



Gambar 5. Stress (a) Material PLA (b) Material ABS

Tabel 2. Hasil simulasi

Parameter Hasil	Satuan	Polylactic Acid (PLA)	Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)	Keterangan Komparatif
Tegangan Maksimum	N/m ²	1.001×10^6	9.828×10^5	PLA menahan tegangan sedikit lebih besar dari ABS.
Regangan	%	2.138×10^{10}	3.579×10^{-4}	PLA menunjukkan kemampuan deformasi lebih tinggi.
Modulus Elastisitas (E)	N/m ²	4.68×10^{-5}	2.746×10^{11}	ABS jauh lebih kaku dibandingkan PLA.
Defleksi Maksimum	mm	7.780×10^9	1.4×10^{-2}	PLA mengalami defleksi jauh lebih besar, menandakan kelenturan tinggi.
Poisson's Ratio	-	0.36	0.394	ABS sedikit lebih elastis terhadap deformasi lateral.
Yield Strength (Kekuatan Luluh)	N/mm ²	5×10	-	PLA memiliki kekuatan luluh yang cukup besar.
Massa Jenis (ρ)	kg/m ³	1250	1020	PLA lebih padat dibanding ABS.

untuk aplikasi ringan seperti Smart Healthy Box. Dengan beban kerja statis yang rendah dan tuntutan desain ramah lingkungan, PLA menjadi material yang paling sesuai digunakan karena mampu memenuhi kebutuhan kekuatan mekanik sekaligus mendukung penerapan konsep green technology dan sustainable product design.

4 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pengembangan Smart Healthy Box menggunakan material biodegradable Polylactic Acid (PLA) menunjukkan potensi besar sebagai alternatif pengganti plastik konvensional yang tidak ramah lingkungan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa PLA memiliki tegangan maksimum lebih tinggi dibandingkan ABS, menandakan kekuatan tekan dan kekakuan struktural yang baik, meskipun nilai regangannya lebih rendah yang mengindikasikan sifat lebih getas. Sebaliknya, ABS memiliki elastisitas dan fleksibilitas yang lebih baik, mampu menahan deformasi tanpa kerusakan struktural. Dari perbandingan ini, dapat disimpulkan bahwa PLA lebih cocok untuk aplikasi dengan kebutuhan kekakuan dan stabilitas bentuk tinggi, sedangkan ABS lebih sesuai untuk produk yang menuntut daya tahan terhadap benturan. Namun, dengan mempertimbangkan aspek biodegradabilitas dan keberlanjutan lingkungan, PLA menjadi pilihan material yang ideal untuk pengembangan perangkat kesehatan ramah lingkungan seperti Smart Healthy Box.

Daftar Pustaka

- [1] Al-Mahmud O, Khan K, Roy R, Alamgir FM. Internet of things (IoT) based smart health care medical box for elderly people. In: 2020 International Conference for Emerging Technology (INCET). IEEE; 2020. p. 1-6.
- [2] Wijayanti KP, Dermawan N, Faisah SN, Prayogi V, Judiawan W, Nugraha T, et al. Biodegradable bioplastics sebagai plastik ramah lingkungan. Surya Octagon Interdisciplinary Journal of Technology. 2016;1(2):131-53.

- [3] Nurhadi D, Purwanto H, Dzulfikar M. Pengaruh suhu injection moulding terhadap minimalisasi sink marks pada material limbah plastik acrylonitrile butadiene styrene (ABS). *Majalah Ilmiah Momentum*. 2020;16(1).
- [4] Betariani K, Rahayu P, Tutuka R. Integrasi Filler Berbasis Limbah Pertanian terhadap Sifat Material Bioplastik Polylactic Acid (PLA): Tinjauan Literatur Terstruktur. *Jurnal Penelitian Inovatif*. 2025;5(2):1657-66.
- [5] Abdullah K, Ahmad J. Impak pemeraksanaan teknologi hijau terhadap amalan pengamal perhubungan awam hijau di Malaysian Green Technology Corporation (GreenTech Malaysia). *Akademika*. 2014;84(3):29-39.
- [6] Gumulya D. Pembelajaran dari Pengajaran Sustainable Product Design pada beberapa Universitas di United Kingdom, Australia, Denmark, the Netherlands, and the United States. *Jurnal Desain Indonesia*. 2023;5(2):1-17.
- [7] Wang P, Wang Y, Yang S, Niu W, Wang X, Li P. Analysis, simulation and experimental study of the tensile stress calibration of ceramic cylindrical pressure housings. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022;10(4):499.
- [8] Wunda S, Johannes AZ, Pingak RK, Ahab AS, et al. Analisis tegangan, regangan dan deformasi crane hook dari material baja AISI 1045 dan baja ST 37 menggunakan software elmer. *Jurnal Fisika: Fisika Sains Dan Aplikasinya*. 2019;4(2):131-9.
- [9] Hopcroft MA, Nix WD, Kenny TW. What is the Young's Modulus of Silicon? *Journal of microelectromechanical systems*. 2010;19(2):229-38.
- [10] Zalka KA. Maximum deflection of asymmetric wall-frame buildings under horizontal load. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2014;58(4):387-96.
- [11] Wu X, Yang Y, Zhan Y, Li K, Xiao F. Co-pyrolysis and combustion characteristics of polylactic acid and acrylonitrile-butadiene-styrene: insights into interactions, kinetics and synergistic effects. *Frontiers in Chemistry*. 2025;13:1552814.