STUDI NUMERIK DESAIN GEOMETRI FRAME DRONE QUADCOPTER HASIL DESAIN GENERATIF DENGAN MATERIAL PLA 3D PRINTING

Mohamad Izzan Hafian
S1 Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
Email: mohamad.19054@mhs.unesa.ac.id

Agung Prijo Budijono
Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya
Email: agungbudijono@unesa.ac.id

Abstrak

Salah satu jenis frame yang banyak digunakan di kalangan umum dan hobby adalah frame DJI F450. Frame ini menggunakan material 30 % glass fibre reinforced Polyamide 66 sebagai material rangka utama frame. Material ini memiliki kelebihan dalam sifat mekanik yang baik namun sulit diproduksi terutama dalam skala kecil. oleh karena itu diperlukan alternatif material lain yang cukup ringan dan mudah diproduksi salah satunya polylactid acid (PLA). Penelitian ini berfokus pada pembahasan dan perancangan frame drone quadcopter yang diproduksi menggunakan material PLA. Geometri frame dirancang menggunakan fitur generative design pada perangkat lunak fusion 360. Tiga variasi geometri model dihasilkan sebagai output desain. Selanjutnya model disimulasikan pada perangkat lunak ANSYS untuk membandingkan tegangan ekuivalen, dan deformasi pada geometri frame Hasil simulasi menunjukkan pada variasi model 1,2 dan 3 berturut-turut mendapatkan hasil equivalent stress sebesar 10,492MPa, 21,521MPa dan 22,082MPa dan deformasi maksimum yang terjadi pada sumbu vertikal frame berturut-turut sebesar 0,67163mm, 0,8776mm serta 2,2193mm. Dari hasil penelitian dapat disimpulkan, seluruh variasi model frame yang diujikan dinilai cukup baik untuk digunakan sebagai solusi alternatif dari frame konvensional meski kekakuan struktur frame dinilai masih dapat ditingkatkan kembali.

Kata Kunci: Quadcopter, Polylactic Acid, Generative Design, 3D Printing

Abstract

One type of frame that is widely used in general and hobby circles is the DJI F450 frame. This frame uses 30% glass fiber reinforced Polyamide 66 as the main frame material. This material has advantages in good mechanical properties but is difficult to produce, especially on a small scale. Therefore, alternative materials are needed that are quite lightweight and easy to produce, one of which is polylactid acid (PLA). This research focuses on the discussion and design of quadcopter drone frames produced using PLA material. The frame geometry was designed using the generative design feature in fusion 360 software. Three variations of model geometry were generated as design output. Furthermore, the model was simulated in ANSYS software to compare the Equivalent stress, and deformation in the frame geometry The simulation results show that model variations 1, 2 and 3 respectively get equivalent stress results of 10.492MPa, 21.521MPa and 22.082MPa and the maximum deformation that occurs in the vertical axis of the frame is 0.67163mm, 0.8776mm and 2.2193mm respectively. From the results of the study, it can be concluded that all variations of frame models tested are considered good enough to be used as an alternative solution to conventional frames, although the stiffness of the frame structure can still be improved.

Keywords: *Quadcopter, Polylactic Acid, Generative Design, 3D Printing*

UNESA Universitas Negeri Surabaya

PENDAHULUAN

Unmanned Aerial Vehicle atau biasa disingkat UAV akhir akhir ini mengalami perkembangan yang sangat pesat. hal ini disebabkan karena penggunaannya yang dapat diaplikasikan pada tujuan yang bervariasi mulai dari pemetaan lahan, search and rescue, rekreasi hingga sebagai kebutuhan akan pertahanan dan pengamanan pada operasi militer (Djizi et al, 2022; Qin et al, 2020). Salah satu jenis dari UAV yang sering digunakan belakangan ini adalah multirotor atau multicopter.

Terdapat beberapa aspek yang perlu diperhatikan agar quadcopter dapat terbang dengan baik dan mengurangi kemungkinan terjadinya kecelakaan yaitu kekuatan, berat frame, dan dimensi frame yang digunakan (Akhsat et al, 2015). Kestabilan terbang quadcopter sangat dipengaruhi oleh kekuatan frame yang digunakan. Deformasi frame perlu diminimalkan agar quadcopter tetap stabil, sehingga diperlukan tingkat kekakuan yang tinggi. Selain itu, bobot yang ringan dapat mengurangi beban saat lepas landas dan saat melakukan manuver di udara. (Saputro, 2018)

Frame yang digunakan harus memiliki massa yang cukup ringan sehingga diperlukan optimasi desain untuk mengurangi massa frame. Salah satu cara untuk mendapatkan desain yang optimal adalah dengan menggunakan teknologi desain generatif. Desain generatif merupakan sebuah proses eksplorasi desain yang bersifat iterative, menggunakan sebuah perangkat lunak yang

bertujuan untuk mendapatkan sebuah desain optimal dari segi efisiensi bahan maupun proses manufaktur algoritma kecerdasan buatan dan kekuatan komputasi tinggi dari cloud (Bright, 2021). Desain generatif biasanya digunakan untuk mempercepat proses desain, menghasilkan solusi desain yang lebih optimal, dan mengurangi biaya produksi (Hartono,2019) Dalam proses desain generatif, teknologi kecerdasan buatan berperan penting dalam menghasilkan alternatif desain yang optimal untuk mempertimbangkan faktor-faktor yang kompleks dan memilih solusi desain yang terbaik.

Selain proses optimalisasi desain, material dan proses manufaktur yang digunakan juga menentukan seberapa baik performa dari frame. Adapun salah satu metode yang dapat dilakukan dalam manufaktur frame copter adalah *Additive manufacturing* terutama proses *3D printing* . Proses ini juga dikenal sebagai pencetakan 3D atau printing 3D, karena objek dibuat dengan menggunakan mesin yang secara otomatis menambahkan lapisan material pada setiap tahap pembuatannya yang mana dapat mencetak geometri kompleks dengan *cost* yang lebih murah (Tang.Y, 2017). Baru baru ini proses manufaktur frame quadcopter menggunakan 3d printing sedang menjadi pertimbangan dalam proses manufaktur frame karena fleksibilitas dan biaya produksi yang lebih murah (Shelare,,2021).

Beberapa penelitian telah dilakukan dalam pengembangan frame quadcopter berbasis 3D printing, Saputro (2018) dalam penelitiannya mengembangkan *frame quadcopter* racing impulse rc menggunakan material PLA sebagai solusi pengganti material carbon fiber yang mudah diproduksi dan lebih murah. Selain itu, Aswin Kumar *et al* (2021) membahas tentang perbandingan perhitungan teori serta simulasi pembebanan pada variasi bentuk penampang lengan *frame drone* yang berbeda beda. Sementara itu, pada penelitian yang dilakukan oleh Sagar *et al* (2022). membahas tentang desain unibody quadcopter frame yang dioptimasi dan didesain agar dapat diproduksi dengan metode additive manufacturing..

Berdasarkan latar belakang diatas, penelitian ini akan berfokus pada pembahasan dan perancangan frame drone quadcopter yang diproduksi menggunakan material PLA. Geometri frame akan dirancang menggunakan fitur generative design pada perangkat lunak fusion 360. Selanjutnya model disimulasikan pada perangkat lunak ansys untuk membandingkan tegangan ekuivalen dan deformasi pada model frame

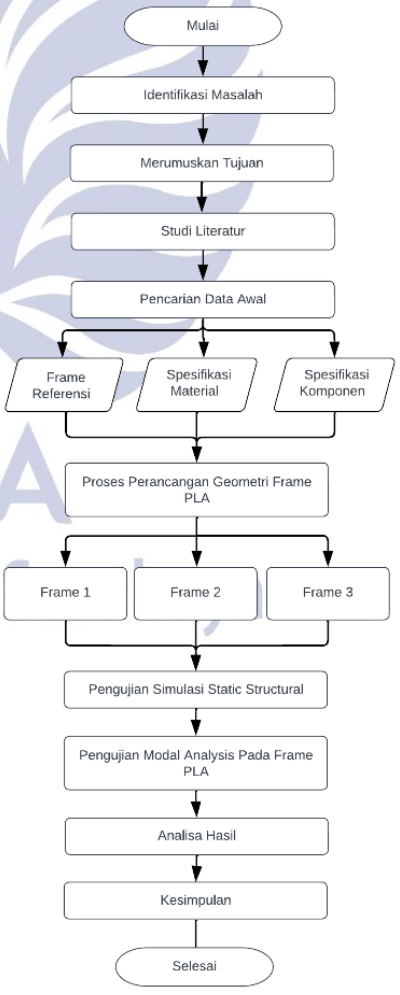
METODE

Penelitian ini dilakukan dengan metode berbasis experimen dimana dilakukan variasi bentuk geometri frame terhadap karakteristik kekuatan frame 3d printing.. Alur penelitian secara umum dibagi menjadi beberapa bagian yang mana dimulai dengan perancangan dan proses generate desain, lalu dilakukan assembly dan meshing sedangkan pada tahap akhir dilakukan simulasi dan analisa hasil simulasi yang telah dilakukan.

Objek yang diteliti pada penelitian ini adalah model frame quadopter dengan baseframe sebesar 450 mm. Data yang dihasilkan dari penelitian ini adalah model desain 3D dan prototype model frame quadcopter setelah dirancang menggunakan metode desain generatif dengan memasukkan parameter beban dan titik tumpu. Instumen pengumpulan data pada penelitian ini adalah berupa komputer (PC) ataupun laptop dengan perangkat lunak CAD Autodesk Fusion 360 untuk perancangan model dan perangkat lunak Ansys 2021 R1 untuk simulasi hasil model. Hasil penelitian ini ditunjukkan berupa defleksi maksimum dan tegangan ekuivalen von mises yang dihasikan melalui simulasi static structural dengan pembebanan berupa gaya thrust motor pada frame.

Hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan frame referensi untuk diambil kesimpulan

Diagram Alir Penelitian



Gambar 1. Diagram alur penelitian

UNESA Universitas Negeri Surabaya

Spesifikasi Material

Data material yang digunakan pada penelitian ini mengacu pada material yang digunakan pada penelitian sebelumnya. Adapun spesifikasi material PLA yang digunakan mengacu pada penelitian Saputro, (2018) sedangkan pada material PA66 mengacu pada penelitian R. Singh et al,(2019). Spesifikasi material PLA dapat dilihat pada tabel 1 sedangkan spesifikasi material PA66 dapat dilihat pada tabel 2

Tabel 1. Spesifikasi material PLA

Material	PLA
Density (kg/m³)	1230
Modulus Young (MPa)	3543,9
Poisson Ratio	0,23
Shear Modulus (MPa)	1440,6
Bulk Modulus (MPa)	2187,6
Yield Strength (MPa)	56,192
Ultimate Strength (MPa)	65.5

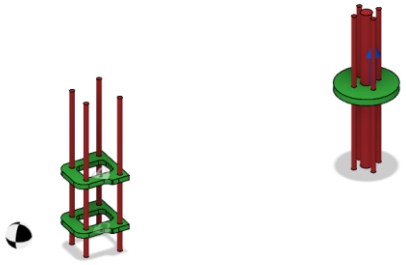
Tabel 2. Spesifikasi material PA66

Material	PA66
Density (kg/m³)	1140
Modulus Young (MPa)	2500
Poisson Ratio	0,41
Shear Modulus (MPa)	8865,2
Bulk Modulus (MPa)	4629,6
Yield Strength (MPa)	91
Ultimate Strength (MPa)	110

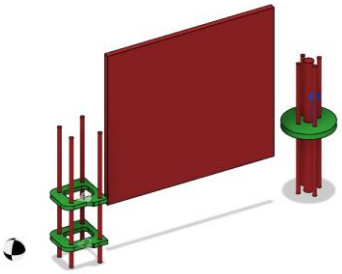
Konfigurasi Desain Generatif

Karena pada penelitian ini, desain frame yang dihasilkan bukan merupakan frame tipe unibody yang mana berarti model frame akan terbagi menjadi beberapa bagian seperti baseplate dan arm. Hal ini berarti perancangan arm dan baseplate dilakukan secara terpisah. Pada penelitian ini, variasi desain frame quadcopter dibuat dengan memvariasikan tiga jenis model geometri arm dan satu jenis model geometri baseplate.

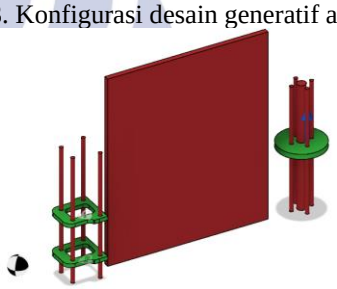
Adapun variasi arm pada penelitian ini menggunakan variasi geometri obstacle sebagai penghalang dari area tengah arm. Dengan konfigurasi seperti ini, diharapkan dapat dihasilkan beberapa variasi bentuk penampang arm frame. Adapun variasi geometri obstacle yang digunakan berupa tanpa obstacle, obstacle penuh dan setengah obstacle. Desain arm 1 menggunakan variasi tanpa obstacle dan desain arm 2 menggunakan variasi setengah obstacle sedangkan desain 3 menggunakan variasi obstacle penuh.



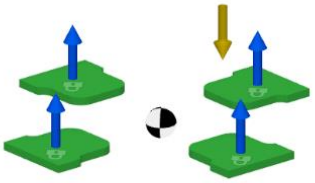
Gambar 2. Konfigurasi desain generatif arm frame 1



Gambar 3. Konfigurasi desain generatif arm frame 2



Gambar 4. Konfigurasi desain generatif arm frame 3



Gambar 5. Konfigurasi desain generatif baseplate

Tabel 3. Parameter perancangan desain generatif pada perangkat lunak fusion 360

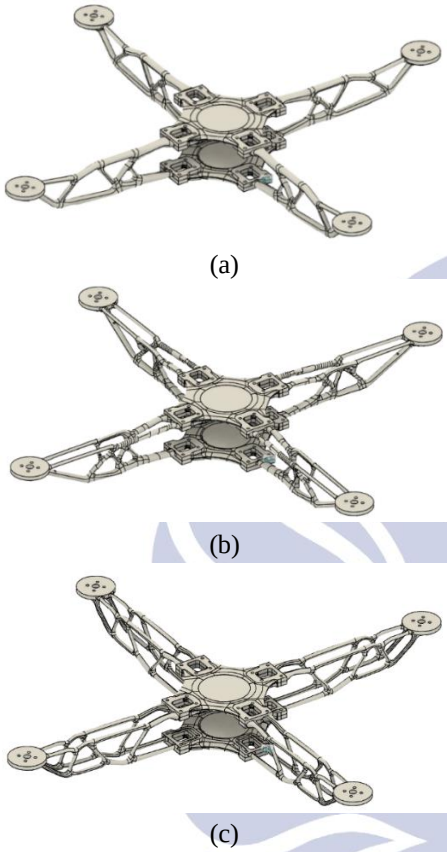
Parameter perancangan	Input
Study objective	*Minimize mass*
Safety factor	*1*
Manufacturing	*Additive Z+ axis, 45 deg overhang angle*
Material	*Polylactid Acid (PLA)*
Beban thrust	14,19 N

UNESA Universitas Negeri Surabaya

HASIL DAN PEMBAHASAN

Output Model Desain Generatif

Setelah geometri arm dan plate, mencapai desain optimal. Model geometri kemudian di *assembly* dan di *export* dari perangkat lunak menggunakan format STEP. Adapun geometri final dari setiap iterasi desain dapat dilihat pada gambar 6



(a) (b) (c)

Gambar 6. Geometri frame output; (a) frame 1, (b) frame 2, (c) frame 3

Uji Konvergensi Mesh

Untuk memastikan hasil simulasi yang akurat, perlu dilakukan uji konvergensi pada setiap bentuk geometri model. Uji konvergensi mesh merupakan langkah krusial dalam menganalisis kekuatan struktur frame quadcopter menggunakan metode elemen hingga. Tujuan dari uji konvergensi ini adalah memastikan bahwa mesh (jaringan elemen) yang digunakan dalam model FEA memiliki kehalusan yang memadai dan mendekati solusi eksak sehingga hasil analisis dapat diandalkan

Tabel 4. Hasil uji konvergensi mesh pada variasi frame 1

Meshing	Metode	*Element Size*	Jumlah *Node*	Jumlah *Element*	Tegangan Pada titik Uji (MPa)
Mesh 1	*Hex Dominant*	3 mm	41166	16946	3,5781
Mesh 2	*Hex Dominant*	2 mm	80992	34693	3,2882
Mesh 3	*Hex Dominant*	1 mm	407749	188203	3.8712
Mesh 4	*Hex Dominant*	0,8 mm	734370	346354	3,8713
Mesh 5	*Hex Dominant*	0,7 mm	1067246	508665	3,8876

Tabel 5. Hasil uji konvergensi mesh pada variasi frame 2

Meshing	Metode	*Element Size*	Jumlah *Node*	Jumlah *Element*	Tegangan Pada titik Uji (MPa)
Mesh 1	*Hex Dominant*	2 mm	80921	34337	4,4355
Mesh 2	*Hex Dominant*	1 mm	423406	194473	3,9364
Mesh 3	*Hex Dominant*	0,8 mm	748760	351529	3,9498
Mesh 4	*Hex Dominant*	0,7 mm	1090051	518885	3,9454

Tabel 6. Hasil uji konvergensi mesh pada variasi frame 3

Meshing	Metode	*Element Size*	Jumlah *Node*	Jumlah *Element*	Tegangan Pada Titik Uji (MPa)
Mesh 1	*Hex Dominant*	3 mm	53119	22777	11,197
Mesh 2	*Hex Dominant*	2 mm	82638	34840	10,847
Mesh 3	*Hex Dominant*	1 mm	430410	196875	10,67
Mesh 4	*Hex Dominant*	0,8 mm	749469	350850	11,366
Mesh 5	*Hex Dominant*	0,7 mm	1091636	517831	11,352

Dari hasil uji kovergensi dapat dilihat bahwa mesh pada frame desain 1 dan 2 sudah cukup konvergen pada variasi ukuran mesh 1 mm. Oleh karena itu, ukuran element size 1mm yang akan digunakan dalam pengujian beban statis pada frame 1 dan 2. Adapun pada frame 3 karena geometri arm yang lebih kecil maka didapatkan hasil mesh konvergen pada ukuran mesh 0,8mm.

Uji *Static structural*

Setelah ukuran mesh ideal diketahui, simulasi static structural dilakukan. Simulasi dilakukan dengan memberikan load statis pada model untuk melihat besar tegangan yang diterima sehingga peforma frame dapat diketahui. Adapun parameter pengujian yang dilakukan dicantumkan pada tabel 7

Tabel 7. Parameter pengujian simulasi statis pada variasi desain frame

	DJI F450	*Desain 1*	*Desain 2*	*Desain 3*
Material	PA66	PLA		
Beban *Thrust*	14,19 N			
Fixed Support	*Bottom Plate*			
Berat *Frame*	282g	176,8 g	173,2 g	171,3 g
Mesh Element Size	1 mm	1 mm	1 mm	0,8 mm

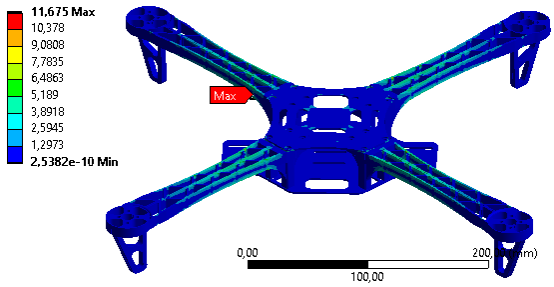
UNESA Universitas Negeri Surabaya

Tegangan Pada Frame

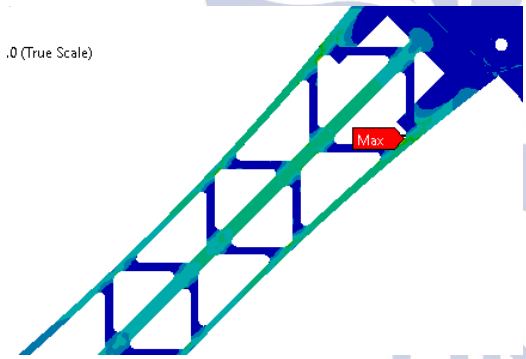
Setelah dilakukan simulasi *static structural*. Data tegangan equivalen dari variasi model frame ditampilkan. Data diperoleh berupa tegangan von-mises dari frame, Adapun data yang didapatkan ditunjukkan pada tabel

Tabel 8. Hasil pengujian tegangan vonmises pada variasi desain frame

	DJ F450	Desain 1	Desain 2	Desain 3
Min von-mises Stress (MPa)	2,253e-10	2,296e-6	2,4809e-6	1,039e-7
Max von-mises Stress (MPa)	11,675	10,492	21,521	22,082

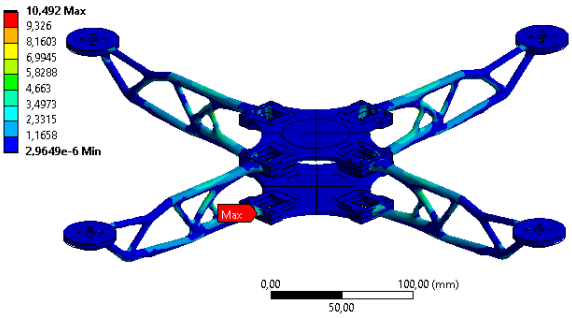


(a)

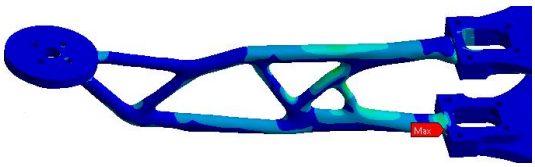


(b)

Gambar 7. Geometri frame F450; (a) Geometri frame, (b) detail persebaran tegangan pada arm,

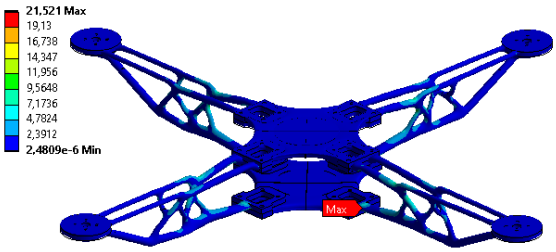


(a)

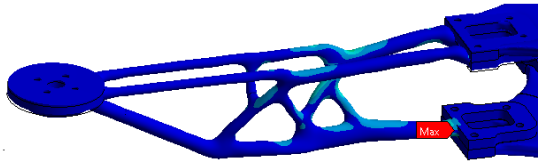


(b)

Gambar 8. Geometri frame 1; (a) Geometri frame, (b) detail persebaran tegangan pada arm,

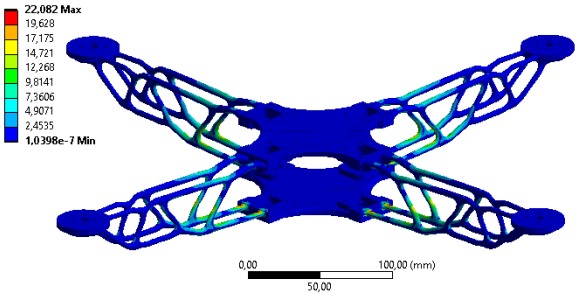


(a)

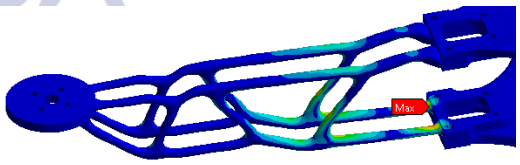


(b)

Gambar 9. Geometri frame 2; (a) Geometri frame, (b) detail persebaran tegangan pada arm,



(a)



(b)

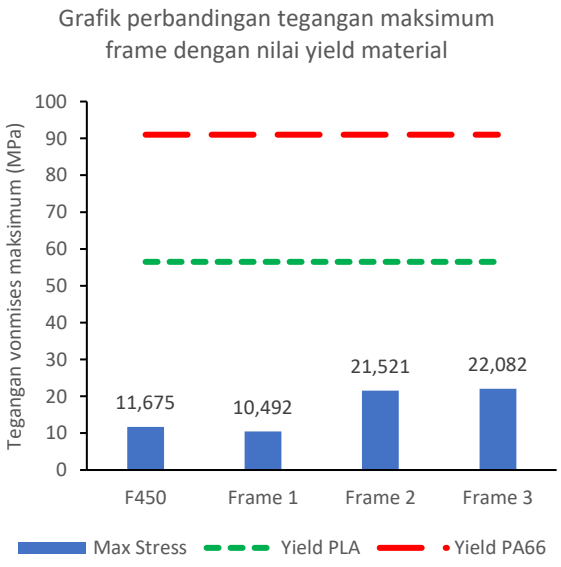
Gambar 10. Geometri frame 3; (a) Geometri frame, (b) detail persebaran tegangan pada arm,

Dapat dilihat pada gambar, lokasi tegangan maksimum hanya terkonsentrasi pada area kecil di sisi bawah, dekat pangkal arm sedangkan pada area lainnya terutama pada tengah arm terlihat hanya didominasi warna biru muda yang mana berarti tegangan yang terjadi kurang dari 4 MPa. Tegangan yang terjadi pada arm frame didominasi

pada region atas dan bawah batang penampang, hal ini dapat terjadi karena saat diberikan pembebanan, geometri penampang atas mengalami tekanan (compression) sedangkan pada bagian bawah mengalami tegangan (tension) yang mana geometri tersebut cukup jauh dari sumbu netral arm frame.

Pada gambar 8 dapat dilihat tegangan yang dialami frame 1 berkisar antara 1,1 – 10,4 MPa. Tegangan tertinggi yang dialami frame ditunjukkan dengan warna merah sedangkan nilai terendahnya ditunjukkan dengan warna biru. Seperti yang terjadi pada frame referensi, tegangan maksimum yang dialami ada pada nilai 11,6 MPa namun lokasi stress yang dialami hanya pada sebagian kecil area arm. Pada gambar 9 dapat dilihat tegangan yang dialami frame 2 berkisar antara 2,3 – 21,5 MPa. Dengan tegangan tertinggi yang dialami frame ditunjukkan dengan warna merah sedangkan nilai terendahnya ditunjukkan dengan warna biru. Jika dibandingkan dengan frame desain 1, tegangan maksimum yang dialami jauh lebih tinggi yang mana ada pada nilai 21,5.

Berbeda dari hasil simulasi pada frame desain 1 dan 2, pada frame model 3 tegangan terbesar frame dialami pada beberapa titik dengan besar tegangan berkisar antara 2,4 – 22,08 MPa Selain pada tumpuan pada bottom plate, geometri support arm juga mengalami tegangan cukup besar dan area yang lebih luas.

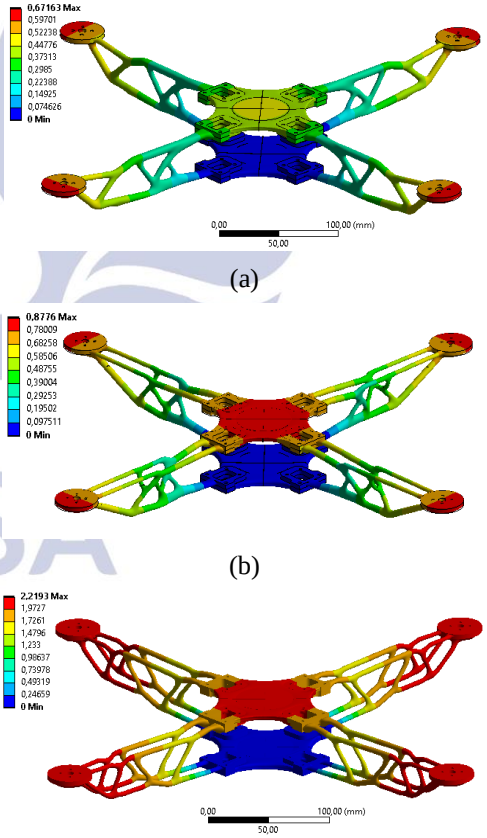


Dapat dilihat pada grafik, nilai tegangan maksimum yang terjadi pada frame 2 dan 3 memiliki nilai rata rata diatas nilai tegangan maksimum frame referensi dengan nilai paling kecil yang terjadi pada geometri frame 2 sedangkan nilai terbesar terjadi pada geometri frame 3. Sedangkan pada model frame 1 memiliki tegangan yang lebih kecil dari frame referensi. Dari ketiga variasi frame, tegangan terbesar terletak pada daerah sekitar sambungan arm dengan bottom plate. Hal ini, dapat terjadi karena pada bagian tersebut dekat dengan geometri "fixed" sehingga menjadi tumpuan pada saat terjadi beban statis. Meskipun memiliki nilai rata rata diatas frame referensi, tegangan maksimum yang terjadi masih diatas batas yield material PLA (ditunjukkan dengan garis putus putus berwarna hijau) yang berarti ketiga variasi desain aman untuk digunakan.xx

Deformasi Total Pada Frame

Tabel 8. Hasil pengujian tegangan vonmises pada variasi desain frame

	DJI F450	Desain 1	Desain 2	Desain 3
Min Deformation (mm)	0	0	0	0
Max Deformation (mm)	4,026	0,6163	0,8776	2,2193



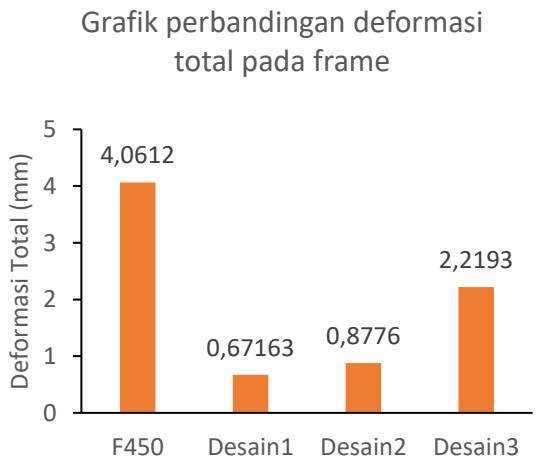
Gambar 11. Geometri frame output; (a) frame 1, (b) frame 2, (c) frame 3

Setelah dilakukan uji deformasi, besaran nilai displacement (deformasi) yang terjadi pada frame desain 1 hampir sama dengan frame referensi yaitu didominasi pada area pangkal dekat dudukan motor namun dengan besar

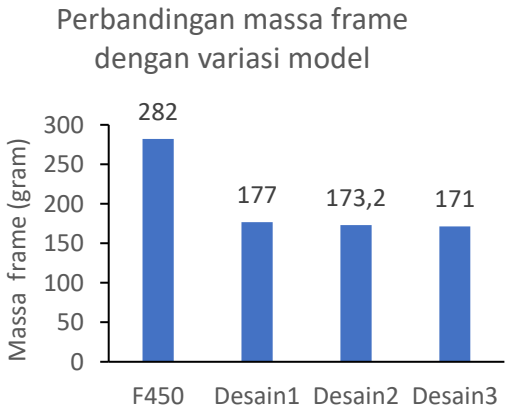
nilai defleksi yang lebih kecil. Besar defleksi yang terjadi adalah sebesar 0,67163mm seperti yang dapat dilihat pada gambar 11 (a). Walaupun defleksi maksimum terdapat pada ujung pangkal motor, bagian top plate dari frame terlihat mengalami warna hijau dan kuning yang berarti geometri tersebut mengalami defleksi kearah atas walau dengan nilai yang cukup kecil yaitu kurang dari 0,4mm.

Besar defleksi yang terjadi adalah sebesar 0.8776mm seperti yang dapat dilihat pada gambar 11 (b) Walaupun defleksi maksimum terdapat pada ujung pangkal motor, bagian top plate dari frame terlihat mengalami warna merah yang berarti geometri tersebut mengalami defleksi kearah atas.

Deformasi yang terjadi pada frame desain 3 masih didominasi pada area pangkal dekat dudukan motor hampir sama dengan frame desain 2 namun dengan besar nilai defleksi yang jauh lebih besar. Besar defleksi yang terjadi adalah sebesar 2.2193mm seperti yang dapat dilihat pada gambar 11 (c). Terlihat pada gambar, bagian top plate dari frame terlihat mengalami warna merah yang berarti geometri tersebut mengalami defleksi yang cukup besar hampir sama dengan defleksi pada dudukan motor.



Gambar 12. Perbandingan deformasi total pada frame



Gambar 13. Perbandingan massa akhir frame

Setelah dilakukan analisis desain, berat frame pada setiap variasi model dibandingkan. Pada gambar 13 dapat dilihat perbandingan berat frame pada setiap variasi model. Frame hasil desain generatif memiliki berat frame yang lebih ringan sekitar 37,2 – 39,3% daripada frame referensi. Hal ini dikarenakan pada frame hasil desain generatif mengalami optimasi desain sehingga elemen-elemen penyusun struktur frame berkurang.

PENUTUP

Simpulan

Berdasarkan hasil data pengujian yang telah diperoleh, setelah dilakukan analisis, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- Perancangan frame baru menggunakan desain generatif melalui beberapa tahapan yaitu input geometri, setting parameter hingga proses generate desain pada perangkat lunak. Pada proses ini didapatkan variasi model geometri frame yang merujuk pada gambar 6. Dari seluruh variasi frame yang dihasilkan, didapatkan berat kosong frame yang lebih ringan sekitar 37,2 – 39,3% daripada frame referensi.
- Frame hasil desain generatif dinilai cukup baik untuk digunakan sebagai frame replacement dari frame referensi mengingat massa frame yang lebih ringan dan tegangan yang terjadi masih dibawah nilai yield material. Hasil simulasi menunjukkan bahwa frame 1 memiliki nilai tegangan dan deformasi yang paling rendah dari seluruh model dimana nilai tegangannya yaitu 10,492 MPa dan nilai deformasi total maksimumnya sebesar 0,6163 mm yang mana masih dibawah nilai frame referensi dimana nilai tegangannya yaitu 11,675 MPa dan nilai deformasi total maksimumnya sebesar 4.026mm

Saran

- Dapat dikembangkan dengan melakukan simulasi impact dan atau fatigue analysis untuk melihat batas masa pakai frame dibandingkan dengan model pabrikan lainnya.
- Sangat disarankan untuk melakukan uji tensile pada spesimen dengan material seperti polylactid acid (PLA) atau polyamide 66 (PA66) untuk mendapatkan data sifat-sifat mekanik material yang dimasukkan dalam proses simulai lebih akurat.
- Dapat dikembangkan dengan melakukan analisis fluida sehingga dapat diketahui besar gaya hambat yang dihasilkan.
- Dapat dikembangkan dengan melakukan realisasi model pada frame 3D printing untuk mengetahui performa real time model.

DAFTAR PUSTAKA

Akhsat S., Aseem H., Shan T., Tasdeeq S. *Design, Fabrication and Modification of Small VTOL UAV*. Noida: Amity University. no. 07, pp. 11-15.

Aswin Kumar, V., Sivaguru, M., Rohini Janaki, B., Sumanth Eswar, K. S., Kiran, P., & Vijayanandh, R. (2021). "*Structural Optimization of Frame of the Multi-Rotor Unmanned Aerial Vehicle through Computational Structural Analysis"*. *Journal of Physics: Conference Series*, Vol *1849*(1): 012004 https://doi.org/ 10.1088/1742-6596/1849/1/012004

Bright, J., Suryaprakash, R., Akash, S., & Giridharan, A. (2021). "*Optimization of quadcopter frame using generative design and comparison with DJI F450 drone frame". IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol *1012(1): 012019. https://doi.org/ 10.1088/1757-899X/1012/1/012019*

Djizi, H., Zahzouh, Z., & Lakehal, A. (2022). "*Quadcopter Prototype Stability Analysis Using Matlab Simscape Library*". *The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty*, Vol *22* (2), hal 38–43. https://doi.org/10.2478/sbeef-2022-0018

Hartono, Budi. (2019). "*3D-Printed Autonomous Quadcopter"*. Makalah disajikan dalam Seminar Nasional-XVIII Rekayasa dan Aplikasi Teknik Mesin, Bandung, 9 Desember

Sagar, N., Esakki, B., Yang, L. J., Udayagiri, C., & Vepa, K. S. (2022). "*Design and Development of Unibody Quadcopter Structure Using Optimization and Additive manufacturing Techniques"*. *Designs*, vol *6*(1) https://doi.org/10.3390/designs6010008

Shelare, S. D., Aglawe, K. R., Khope, P. B. (2021). Computer aided modeling and finite element analysis of 3-D printed drone. Materials Today: Proceeding vol (473375–3379). https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.07.162

Saputro, I. E., Wikarta, A. (2018). *Optimasi Topologi Pada Geometri Frame "Impulse Rc Alien 4 Inch" Racing Quadcopter* Dengan Material *Polylactic Acid* Hasil *3d Printing*. Skripsi. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Saputro, I. E., Wikarta, A. (2019) "*Topology optimization on geometry of 3D printed "Impulse RC Alien 4 Inch" racing quadcopter frame with polylactic acid material"*. *AIP Conference Proceedings. Vol* 2187 (1): 050012. https://doi.org/10.1063/1.5138342

Singh, R., Kumar, R., Mishra, A., & Agarwal, A. (2020). "*Structural Analysis of Quadcopter Frame"*. *Materials Today: Proceedings*, Vol 22 (4): hal 3320-3329, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.295

Tang, Y., Dong, G., Zhou, Q., & Zhao, Y. F. (2018). "*Lattice Structure Design and Optimization with Additive Manufacturing Constraints*". *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, Vol *15*(4): hal 1546–1562. https://doi.org/ 10.1109/TASE.2017.2685643 \

Qin, Y., Xu, W., Lee, A., & Zhang, F. (2020). "*Gemini: A Compact Yet Efficient Bi-Copter UAV for Indoor Applications*". *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol *5*(2): hal 3213–3220. https://doi.org/10.1109/LRA.2020.2974718