

Perancangan Aktuator Pneumatik Lunak dengan Metode Fused Deposition Modelling (FDM) Menggunakan Mesin 3D Printer

Ilham Saputra¹, Firman Alhaffis²

¹Mechanical Engineering Department, College of Engineering, National Yunlin University of Science and Technology
No. 123, Section 3, Daxue Rd, Douliu City, Yunlin County, Taiwan

²Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bengkalis
Jalan Bathin Alam, Desa Sungai Alam, Kecamatan Bengkalis, Provinsi Riau, Indonesia
*E-mail: d1101103@yuntech.edu.tw

Abstract

One area of robotics focused on in many countries today is soft robotics. Soft robotics has great potential to drive and become new manipulators in industrial and medical applications. In intelligent advanced control systems, due to the highly nonlinear and time-varying physical characteristics of air pressure, it is difficult to adjust the pneumatic actuator for precise motion control. However, developed countries such as Europe, America and Japan have succeeded in developing several soft pneumatic actuators. Applications of soft actuators can be widely used in medical surgery, nursing, rehabilitation engineering, industry and biomedical fields. However, the disadvantages are that the structure is complex and relatively expensive, and a related research topic is currently addressing the dynamic behavior modes of one-dimensional liberation.

In this study, we propose the Fused Deposition Modeling (FDM) method in 3D printing for the design of a soft actuator that can be controlled using a pneumatic system. This study used TPU (thermoplastic polyurethane) filaments which are thermoplastic elastomer materials. This filament has a low Shore rate, making it easy to bend, soft and flexible. The results of this study are that the process of printing soft actuators based on a pneumatic system can be created using a 3D printing machine. The soft actuator has the shape of a human finger. The maximum pressure from the actuator to produce a 90°-degree bend is 400 KPa.

Keywords: fused deposition modeling (FDM); soft pneumatic actuators; soft robotics; 3d printing,

Abstrak

Salah satu bidang robotika yang menjadi fokus dibanyak negara saat ini adalah robotika lunak. Robotika lunak memiliki potensi besar untuk menggerakkan dan menjadi manipulator baru dalam aplikasi industri dan medis. Dalam sistem kontrol canggih yang cerdas, karena karakteristik fisik tekanan udara yang sangat nonlinier dan bervariasi waktu, sulit untuk menyesuaikan aktuator pneumatik untuk kontrol gerakan yang tepat. Namun, negara-negara maju seperti Eropa, Amerika dan Jepang telah berhasil mengembangkan sejumlah aktuator pneumatik lunak. Pengaplikasian aktuator lunak dapat digunakan secara luas di bidang operasi medis, keperawatan, teknik rehabilitasi, industri dan biomedis. Namun kerugiannya adalah strukturnya kompleks dan relatif mahal, dan topik penelitian terkait saat ini membahas mode perilaku dinamis dari kebebasan satu dimensi.

Pada penelitian ini kami mengusulkan metode *Fused Deposition Modelling* (FDM) dalam pencetakan 3D untuk perancangan sebuah aktuator lunak yang dapat dikontrol menggunakan sistem pneumatik. Penelitian ini menggunakan filamen TPU (*thermoplastic polyurethane*) yang merupakan material elastomer termoplastik. Filamen ini memiliki tingkat *Shore* rendah, sehingga mudah ditebuk, lembut dan fleksibel. Hasil dari penelitian ini yaitu proses pencetakan aktuator lunak berbasis sistem pneumatik dapat dilakukan menggunakan mesin 3D Printing. Aktuator lunak memiliki bentuk seperti jari manusia. Tekanan maksimum dari aktuator untuk menghasilkan tekukan 90° adalah 400 KPa.

Kata kunci: aktuator pneumatik lunak; fused deposition modelling (FDM); robotika lunak; 3d printing

1. Pendahuluan

Robotika lunak menekankan penggunaan bahan lunak dan fleksibel dalam aplikasi robotika daripada sambungan keras kaku yang ditemukan pada robot tradisional. Peningkatan derajat kebebasan dimungkinkan dengan bahan lunak. Robotika lunak menawarkan berbagai aplikasi, termasuk bio-robotika, robotika medis, robotika industri, dan robot ruang angkasa [1]–[3]. Tujuan utama robot lunak adalah untuk menghasilkan robot yang cocok dengan tujuan dan meniru gerakan alami saat dikendalikan sepenuhnya oleh komputer atau manusia [4].

Robotika lunak semakin populer di berbagai industri karena keunggulannya yang berbeda. Robot lunak lebih fleksibel dan mampu memanipulasi objek kecil atau rapuh daripada robot kaku biasa. Bahan lunak, di sisi lain, dapat

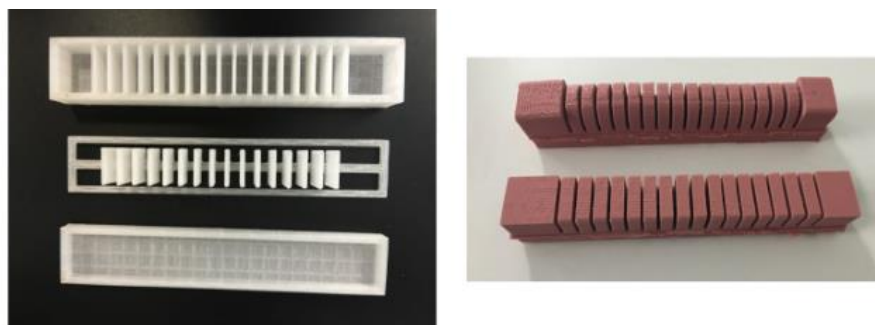
bertindak sebagai penyerap atau penyangga selama kecelakaan, membuat interaksi manusia dengan robot lunak menjadi lebih aman. Robot lunak juga dapat menyelesaikan tugas-tugas yang menantang seperti menekuk, mengeriting, dan memutar yang tidak dapat dilakukan oleh robot kaku karena tingkat kebebasannya yang terbatas [5]. Robot lunak semakin populer di bidang medis dan manufaktur dalam beberapa tahun terakhir sebagai hasil dari keunggulan yang berbeda daripada robot tradisional [6].

Salah satu komponen yang menjadi fokus dalam penelitian robotika lunak adalah aktuator. Aktuator pneumatik lunak telah menarik perhatian para peneliti dan institusi di seluruh dunia sebagai cabang penting dalam bidang robotika lunak karena potensi nilai aplikasinya di berbagai bidang. Dalam situasi tertentu, ini dapat digunakan sebagai alat bedah untuk menggenggam atau memanipulasi benda dari sebuah gripper [7], [8]. Orang yang tidak dapat melakukan tugas dengan tangan mereka dapat menggunakan gripper robot lunak pneumatik untuk membantu mereka. Gambar 1. menggambarkan kemampuan robot lunak untuk menahan berbagai hal, termasuk gelas, bola lampu dan buah.



Gambar 1. Eksperimen penggenggam robot lunak [8]

Di Australia Hu et al. [9] melakukan optimasi desain dari sebuah aktuator lunak menggunakan metode *finite element modelling*. Efek dari berbagai parameter aktuator dipelajari untuk mendapatkan pemahaman yang lebih baik tentang kinerja aktuasi untuk aktuator pneumatik yang akan digunakan untuk aplikasi robot lunak. Dengan menggunakan model struktur statis yang dikembangkan untuk aktuator jaringan pneumatik, parameter desain kritis dievaluasi secara numerik, termasuk efek tekanan input, ketebalan dinding, ketebalan lapisan bawah, jarak antara ruang berurutan, dan bentuk penampang saluran pada saluran deformasi aktuator. Pada gambar 2. Ditunjukkan metode fabrikasi yang digunakan dalam penelitian ini merupakan dengan memanfaatkan sistem cetakan yang dihasilkan menggunakan mesin 3d printer dan menuangkan cairan untuk menghasilkan aktuator lembut. Ketelitian yang tinggi dibutuhkan dalam penelitian ini dalam upaya menghasilkan desain yang optimal dan juga tingkat campuran dari cairan yang digunakan untuk menghasilkan kelenturan aktuator yang diinginkan.



Gambar 2. Fabrikasi aktuator lunak (a) Cetakan 3D Print dan (b) Hasil cetak aktuator [9]

Dalam penelitian ini kami mengusulkan sebuah metode FDM untuk menghasilkan aktuator berkekuatan tinggi dengan proses pencetakan menggunakan material TPU (*thermoplastic polyurethane*) yang dapat menahan tekanan sebesar ≥ 400 KPa. Metode FDM dapat menghemat waktu dan juga menghasilkan kualitas cetak yang lebih baik jika dilihat dari aspek ketelitian dan kecepatan fabrikasi aktuator. Aktuator yang dicetak pada penelitian berikut terdiri dari 16 ruangan ekspansi yang berbentuk jari. Aktuator yang dihasilkan dapat dengan aman menahan muatan tekanan 4 kg

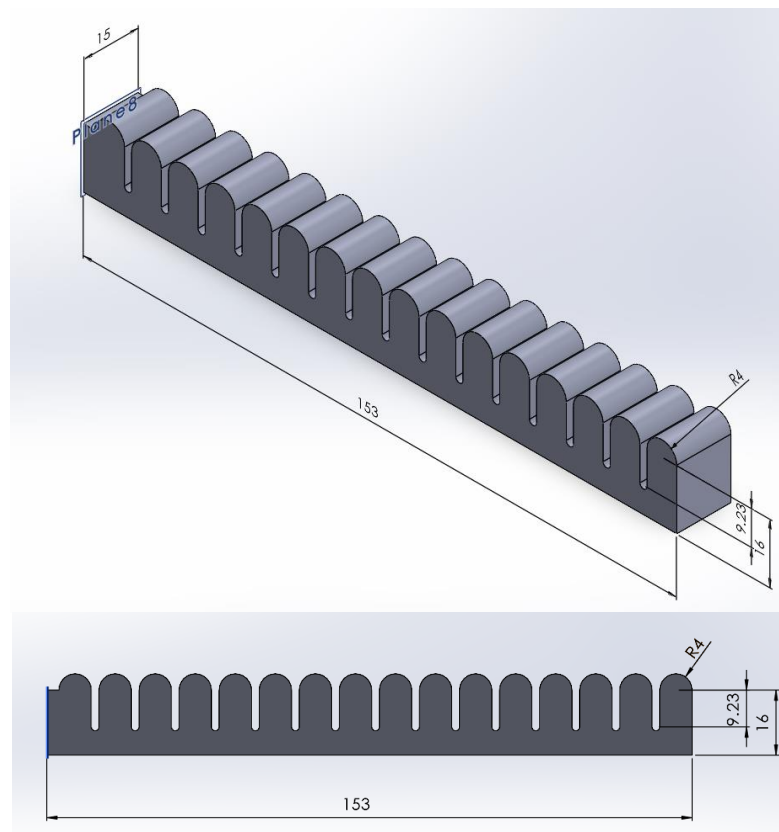
pada tekanan input 400 KPa. Metode dan rancangan aktuator pneumatik lunak akan disajikan pada Bagian 2, dilanjutkan dengan proses fabrikasi pada Bagian 3. Hasil percobaan pada gripper buatan akan disajikan pada Bagian 4, dengan kesimpulan pada Bagian 5.

2. Material dan metode penelitian

Metode yang digunakan dalam fabrikasi adalah dengan pelapisan model fusi pada aktuator dengan mesin 3D printer, aktuator yang dapat dicetak menggunakan material filamen flexible TPU sebagai langkah pendekatan dalam model robotika lunak yang memiliki sifat fleksibilitas yang tinggi. Sistem yang diaplikasikan dalam upaya control aktuator lunak yang dirancang adalah menggunakan pneumatik. Sistem pneumatik memiliki kecepatan yang tinggi, murah dan sederhana dalam perawatan sehingga dinilai mencakup nilai efisiensi dalam sebuah hubungan antara mesin dan robot dalam pengembangan lebih lanjut.

2.1. Desain aktuator lunak

Polygerinos et al. [10] Aktuator pneumatik dibuat menggunakan proses pencetakan injeksi menggunakan resin silikon. Penampang persegi berongga pneumatik dibagi secara lateral oleh ruang di antara setiap sel, yang dihubungkan secara pneumatik oleh saluran pusat. Dengan memberi tekanan pada sejumlah tabung dan ruang tertanam di dalam elastomer, karakteristik tekukan aktuator dimungkinkan. Ruang dan saluran interior ini mengembang di bawah tekanan, menghasilkan gerakan pembengkokan dan ekspansi. Area yang paling sesuai dengan area pneumatik adalah area yang menunjukkan fenomena ekspansi [11]. Studi ini mengeksplorasi penerapan desain yang dijelaskan untuk pembuatan aditif bahan elastomer. Untuk menilai potensi dan kendala aktuator pneumatik lunak yang dibuat secara FDM, aktuator dihubungkan ke pengaturan uji laboratorium. Dari desain model yang dihasilkan, aktuator Pneumatik dijelaskan oleh desain yang ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Desain aktuator pneumatik lunak

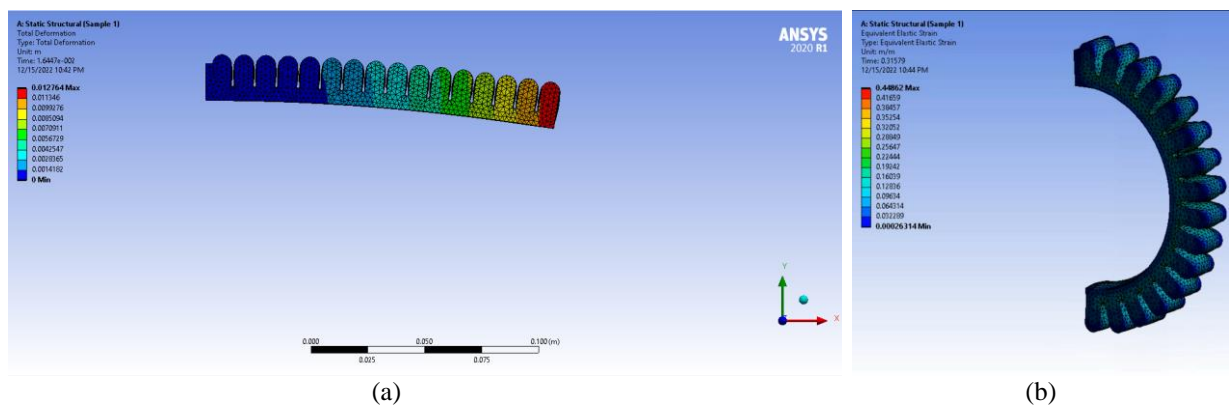
Variasi desain telah diproduksi di sebuah proses iteratif. Desain yang dipilih memiliki 16 ruangan ekspansi yang menghasilkan tekukan yang dapat memungkinkan aktuator melakukan tekukan sebesar 360 derajat. Desain pada gambar 3. Menampilkan masing-masing ruangan memiliki diameter 8mm, dengan ketebalan dinding dari masing-masing area 1.8mm pada landasan dan 0.8 dari ruang ekspansi. Selanjutnya lebar aktuator dirancang lebih lebar 15mm dan memiliki bentuk oval. Lapisan dasar pada aktuator menghasilkan tekanan langsung yang lebih besar dibanding dari masing-masing ruangnya sehingga perlu diperhatikan kualitas cetak pada lapisan dasar dan terkadang perlu menambahkan ketebalannya. Namun, ketebalan pada dinding dasar mempengaruhi dari hasil tekukan aktuator yang semakin kecil dengan muatan yang sama. Sehingga, desain perlu diperhatikan secara terperinci sebelum proses cetak

pada mesin 3d printer. Selain itu, jenis material filamen yang digunakan dalam proses fabrikasi mempengaruhi kualitas lentur, sehingga filamen yang terlalu lembut juga akan menghasilkan kekuatan yang minim dan sebaliknya material yang terlalu keras akan menghasilkan aktuator yang kaku.

2.2. Analisis metode elemen hingga

Dalam upaya memvalidasi desain yang ditetapkan pada bab-bab sebelumnya, pendekatan metode elemen hingga digunakan. Simulasi tekukan nonlinier dibangun untuk membantu dengan harapan untuk pengujian eksperimental dan untuk memberikan wawasan tentang kemampuan virtual aktuator cetak 3D. Untuk memeriksa bagaimana aktuator menekuk ketika terkena tekanan udara konstan dan karakteristik hiperelastik bahan silikon, simulasi *Finite Element Method* (FEM) telah dilakukan. Gerakan tekanan vs. perpindahan yang terkait dengan titik referensi pada komponen adalah hasil yang diantisipasi dari model simulasi ini. Tujuan dari model ini adalah untuk membandingkan pergerakan ruangan ekspansi pada aktuator yang dibuat secara FDM dan untuk memperkirakan potensi kesalahan. Model elemen hingga dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak *Computer Aided Engineering* (CAE) *Ansys Mechanical 2020 R1* di bawah simulasi standar/implisit.

Bahan silikon diterapkan pada komponen aktuator, yang dipandang sebagai sebuah kontinum. Karena hiperelastisitas material, deformasi bentuk yang panjang, kontak permukaan, dan pengaruh gravitasi diantisipasi. Semua elemen ini telah dimasukkan ke dalam model elemen hingga, dan perhitungan fenomena tekukan dua langkah telah dilakukan. Dalam proses *meshing* pada aktuator dihasilkan tetrahedron kuadratik 0.002m ukuran elemen dengan tekanan konstan. Sisi aktuator yang berhubungan dengan adaptor telah menetapkan kondisi batas. Tekanan statis dikirim secara ortogonal ke semua permukaan ruang internal dan saluran menggunakan model kontinum tertutup. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, langkah ini menghasilkan satu set koordinat referensi awal dari mana langkah tekanan dihasilkan, mulai dari 0 KPa hingga 400 KPa dengan gravitasi yang disebarkan ke seluruh model. Kontak diri, pendekatan permukaan ke permukaan tanpa gesekan digunakan untuk mengkarakterisasi interaksi kontak antara dinding luar setiap ruang.



Gambar 4. Hasil simulasi elemen hingga untuk aktuator, berdasarkan mode bahan hiperelastik *YEOH*. (a) Perpindahan awal di bawah pengaruh gravitasi. (b) Hasil deformasi pada tekanan udara 400 KPa di dalam ruangan.

3. Pengaturan parameter cetak

Dalam proses fabrikasi aktuator perlu diperhatikan karakteristik dari parameter printer yang diperlukan dan disesuaikan untuk menghasilkan kualitas yang baik. Proses cetak yang digunakan harus memperhatikan ketebalan dari masing-masing dinding tanpa ada kebocoran sehingga proses aktuasi pada aktuator dapat berjalan. Pada tahapan ini mesin 3D printer Infinity3DP X12-Plus V2 digunakan sebagai mesin cetak dengan menggunakan beberapa konfigurasi seperti penggunaan nozel bersuhu tinggi berdiameter 0.4 mm. Adapun parameter pada proses cetak dapat dilihat pada tabel 1.

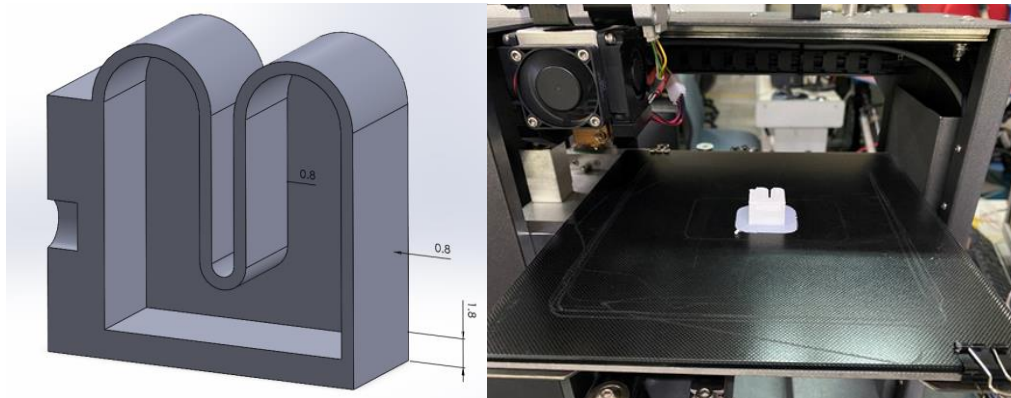
Tabel 1. Parameter mesin pada proses cetak

Printer Setting			
Layer height (mm)	0.2	Print speed (mm/s)	60
Initial layer height (mm)	0.3	Initial layer speed (mm/s)	30
Wall thickness	0.8	Printing temperature (°C)	230
Fill density (%)	100	Build plate temperature (°C)	60
Infill overlap (%)	10	Support on build plate only	
Brim	No		

Model CAD yang dibuat dengan Solidworks 2022 diekspor dalam file stl. menggunakan perangkat lunak pemodel 3D parametrik *Ultimaker Cura*. Dalam proses menterjemahkan aktuator 3D menjadi pemotongan-pemotongan irisan untuk dapat diproses menjadi *G-Code* dihasilkan tahapan pembuatan dalam satu aktuator selama 2 jam 28 menit.

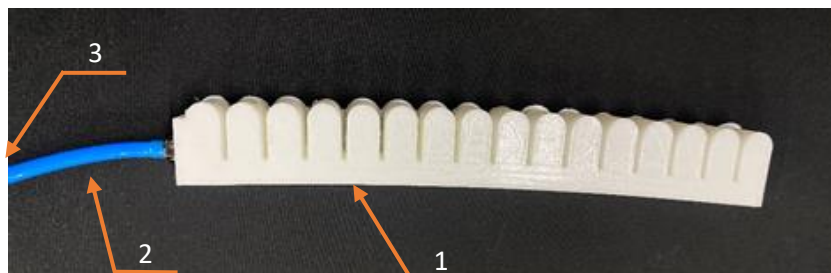
4. Proses Fabrikasi

Hasil dari proses cetak aktuator lunak ditunjukkan pada gambar 6. Sebelum proses akhir pencetakan, prototipe dilakukan untuk melakukan evaluasi terhadap parameter yang digunakan dapat dengan maksimal. Prototipe berbentuk 2-3 ruangan ekspansi yang dapat dilakukan aktuasi terhadap muatan angin. Selanjutnya tingkat kebocoran dari protipe dianalisa dengan memanfaatkan media air sebagai pendeteksi kebocoran udara pada prototipe. Desain prototipe dapat dilihat pada gambar 5.



Gambar 5. Prototipe ruangan ekspansi. Kiri: Desain prototipe. Kanan: Hasil prototipe

Dari hasil percobaan pembuatan prototipe didapatkan parameter yang digunakan diatas yang telah dilakukan penyesuaian dari penelitian sebelumnya. Tujuan dari pengaturan laboratorium selanjutnya dilakukan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6, adalah untuk menilai deformasi posisi (a) aktuator pneumatik lunak sebagai respons terhadap tekanan.



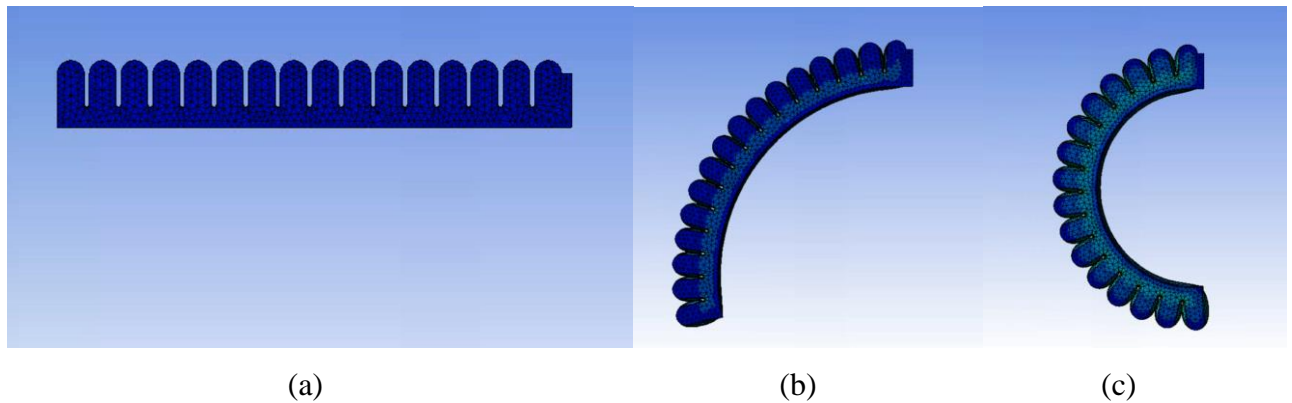
Gambar 6. (1). Aktuator (2). Konektor pneumatik (3). Selang pneumatik



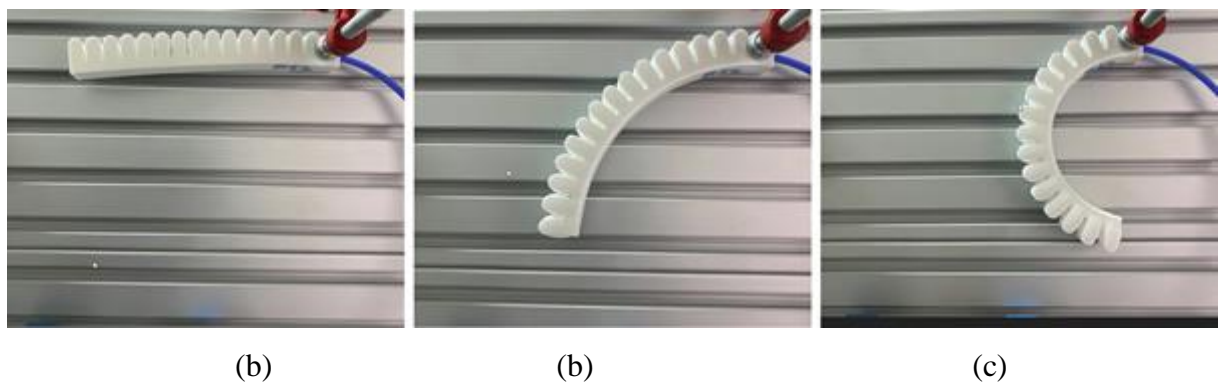
Gambar 7. Proses percobaan hasil akhir aktuator

5. Hasil dan Pembahasan

Dalam konfigurasi ini, perpindahan ujung depan diukur antara 0 dan 400 KPa. Konfigurasi ini sesuai dengan platform evaluasi yang disarankan [12]. Selang yang berukuran 3mm dipasang pada aktuator untuk menghubungkan aktuator dengan muatan melalui katup pneumatik tekan satu arah. Tekanan p dinaikkan perlahan dan diukur secara bertahap setiap 100 KPa seperti yang ditunjukkan pada gambar 9. Dari hasil eksperimen yang dilakukan aktuator pneumatik lunak dapat melakukan tekukan hingga 90 derajat seperti yang ditunjukkan pada gambar 8 sesuai yang ditunjukkan pada simulasi di perangkat lunak.



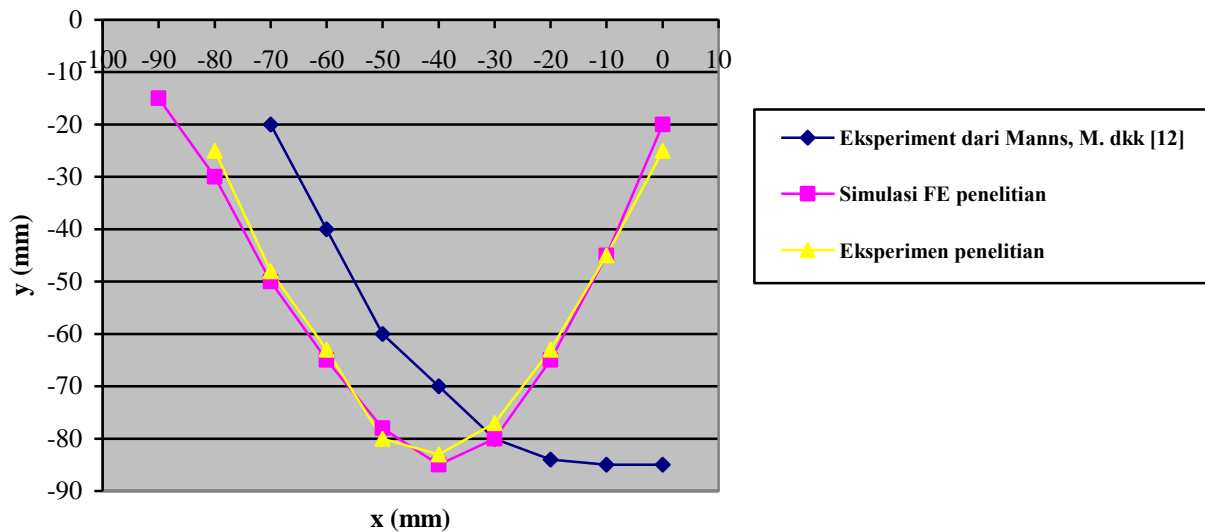
Gambar 8. Simulasi. (a) 0 KPa. (b) 200 KPa. (c) 400 KPa.



Gambar 9. Percobaan ekspansi pada hasil aktuator. (a) 0 KPa = 0°, (b) 200 KPa = 45°, (c) 400 KPa = 90°

Parameter yang di cetak pada aktuator telah mengalami hasil yang lebih baik jika dibandingkan dengan hasil dari penelitian pada pada penelitian yang dilakukan oleh Manns, M. dkk [12]. Pada aktuator pneumatik lunak yang dihasilkan dalam penelitian ini didapatkan aktuator dapat menahan muatan sebesar ≥ 400 KPa, hal ini disimpulkan kekuatan aktuator yang dihasilkan jauh lebih besar jika dibandingkan pada model [12] yang hanya menahan muatan 100 KPa untuk menghasilkan tekukan sebesar 90 derajat.

Dalam beberapa kondisi hasil cetak suhu ruangan juga mempengaruhi hasil dari fabrikasi. Sehingga untuk memastikan proses muatan dapat diterima oleh aktuator terkadang perlu ditambahkan lem yang bersifat melapiskan pada permukaan dari setiap ruangan ekspansi. Ketebalan dinding sebesar 0.8 mm pada ruangan perlu diperhatikan dengan penyesuaian dari diameter nozzle pada mesin 3d printer. Karena jika kelipatan pada dinding diharapkan kelipatan dari ukuran nozzle. Pada kondisi ini digunakan ketebalan dinding 2×0.4 mm (diameter printer nozzle). Dari hasil percobaan yang kami lakukan saat melakukan proses fabrikasi dengan ketebalan 3×0.4 mm (1.2 mm) didapatkan kebocoran yang terjadi dari ruangan ekspansi minim terjadi. Namun tekukan yang dihasilkan dari aktuator akan terjadi pengurangan yang signifikan. Sehingga dalam penelitian kami memutuskan ketebalan dinding pada ruangan ekspansi sebesar 0.8mm dan ketebalan pada dasar dari aktuator 1.8 mm. Gambar 10 menunjukkan plot x-y dari ujung aktuator pada tingkat tekanan yang berbeda berkisar hingga tekanan bagian dalam p dari 55 KPa dibandingkan dengan studi sebelumnya dari Manns, M. dkk [12].



Gambar 10. Grafik posisi aktuator selama proses muatan diberikan mulai 0 – 400 KPa

Evaluasi yang dapat dilihat dari eksperimen Manns, M. dkk [12] bahwa aktuator berbahan TPU dapat dengan kaku sebelum mengalami muatan. Kurva menunjukkan posisi awal aktuator pada penelitian tidak berpengaruh banyak terhadap gaya gravitasi. Hal ini dipengaruhi oleh tingkat *shore hardness* pada filamen yang digunakan. Aktuator akan membentuk tekukan 90 derajat dan akan terus menekuk Ketika diberikan buatan lebih dari 400 KPa. Dengan pengecualian *offset* awal, simulasi FE dari aktuator secara akurat dapat menangkap bentuk perpindahan percobaan dari hasil cetak. Selanjutnya, pada titik terbesar dari kurva perpindahan diperlihatkan bahwa pada simulasi dengan tekanan maksimum memberikan posisi yang lebih besar, namun pada eksperimen didapatkan perbedaan kondisi. Hal ini dipengaruhi oleh kualitas cetak dari aktuator yang dipengaruhi dari reaksi perlakuan panas dari perubahan bentuk filamen. Muatan yang diberikan pada percobaan Manns yaitu sebesar 55 KPa pada kondisi maksimum, aktuator pneumatik lunak yang diuji dalam penelitian ini dapat menghasilkan radius lebih besar sehingga posisi maksimum pada kondisi titik koordinat -90,-25 dengan muatan maksimum yang dapat diberikan sebesar 400 KPa.

Kurva perpindahan serupa telah dicapai oleh aktuator yang difabrikasi langsung oleh 3d printer dibandingkan dengan studi Manns, M. dkk [12] (lihat Gambar 10). Perpindahan aktuator yang diaktuator tidak terpengaruh secara signifikan oleh modifikasi desain yang sesuai dengan proses produksi. Dinding yang tiga kali lebih tipis dari [12] memberikan perubahan nyata ketika tingkat tekanan diperhitungkan. Simulasi numerik perpindahan aktuator dari pengujian fisik telah menghasilkan tekukan yang memuaskan. Pergeseran antara simulasi dan eksperimen masih tidak selaras. Karena beberapa bahan pendukung masih ada di rongga aktuator yang dibuat secara aditif, dihipotesiskan bahwa ini adalah hasil dari perbedaan massa.

Kurva perpindahan masing-masing (eksperimen dan simulasi) diimbangi dengan cara konsentris (gambar 10). Penjelasan yang mungkin adalah bahwa material yang disimulasikan lebih kaku daripada yang diproduksi oleh filamen yang lebih lunak. Dengan demikian, disarankan untuk menggunakan pemodelan material yang lebih canggih daripada model YEOH hiperelastik yang digunakan dalam simulasi ini.

6. Kesimpulan dan Saran

Dalam penelitian ini, aktuator yang dibuat dengan filamen TPU dan dibuat secara aditif dibandingkan. Aktuator dalam penelitian ini nantinya dapat digunakan dalam gripper robot lunak, yang memiliki manfaat baik untuk aplikasi ke berbagai objek melalui adaptasi bentuk dan keamanan interaksi manusia dan robot fisik. Aktuator pneumatik lunak berbasis silikon yang dicetak 3D telah didemonstrasikan. Distorsi geometrisnya menyerupai aktuator yang dilemparkan secara tradisional. Dengan demikian, kebutuhan penting terpenuhi memungkinkan aktuator yang dibuat secara aditif berfungsi sebagai pengganti cetakan tradisional, dan juga dengan menggunakan material yang memiliki kekuatan yang tinggi ketebalan dinding dapat dikurangi secara signifikan tiga kali lebih tipis [12]. Karena banyaknya variasi geometri alternatif yang dapat dicetak 3D dalam waktu yang lebih singkat daripada yang diizinkan oleh pengecoran manual saat ini, potensi ini dapat menghadirkan peluang untuk merampingkan eksplorasi di masa mendatang. Namun, potensi ini mungkin dibatasi oleh batasan material filament saat ini yang dihasilkan kekuatan yang lebih namun potensi kebocoran karena rongga yang terdapat pada aktuator.

Material filamen yang terdapat dipasaran dengan kekuatan *shore hardness* tertentu telah diaplikasikan dan didemonstrasikan dalam penelitian ini untuk fabrikasi aktuator pneumatik lunak. Simulasi elemen hingga dilakukan dalam upaya mencari sifat mekanik material dengan pemanfaatan sistem komputasi. Simulasi menunjukkan terjadi

penyimpangan kurang dari 5% dari dari hasil eksperimental. Studi dilanjutkan pada aktuator dalam upaya menjaga kualitas aktuator yang diproduksi dengan menggunakan geometri beragam.

Dalam fabrikasi aktuator pneumatik lunak menggunakan metode FDM pada mesin 3D Printer disarankan untuk menggunakan pendekatan peningkatan iterative untuk mengembangkan desain aktuator yang semirip mungkin dengan bentuk dari ruang ekspansi seperti jari manusia. Pengembangan lebih lanjut bagaimanapun dalam geometri aktuator lunak dilakukan dengan sistem *trial and error* yang melibatkan simulasi dan evaluasi dari setiap geometri yang dihasilkan. Bahkan dengan beberapa geometri sederhana dengan melakukan studi pada parameter bentuk dari aktuator, hasil aktuator yang diinginkan dapat dicapai. Sehingga fabrikasi aktuator lunak masih menghadirkan tantangan bagi banyak peneliti dari robotika lunak.

Daftar Pustaka

- [1] G. Andrikopoulos, G. Nikolakopoulos, and S. Manesis, "A Survey on applications of Pneumatic Artificial Muscles," in *2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, Corfu, Greece, Jun. 2011, pp. 1439–1446. doi: 10.1109/MED.2011.5982983.
- [2] K. J. Kim and S. Tadokoro, Eds., *Electroactive polymers for robotic applications: artificial muscles and sensors*. London: Springer, 2007.
- [3] C.-Y. Cheng, J.-C. Renn, I. Saputra, and C.-E. Shi, "Smart Grasping of a Soft Robotic Gripper Using NI Vision Builder Automated Inspection Based on LabVIEW Program," *Int. J. Mech. Eng. Robot. Res.*, pp. 737–744, 2022, doi: 10.18178/ijmerr.11.10.737-744.
- [4] J. Nagase, S. Wakimoto, T. Satoh, N. Saga, and K. Suzumori, "Design of a variable-stiffness robotic hand using pneumatic soft rubber actuators," *Smart Mater. Struct.*, vol. 20, no. 10, p. 105015, Oct. 2011, doi: 10.1088/0964-1726/20/10/105015.
- [5] H. K. Yap, H. Y. Ng, and C.-H. Yeow, "High-Force Soft Printable Pneumatics for Soft Robotic Applications," *Soft Robot.*, vol. 3, no. 3, pp. 144–158, Sep. 2016, doi: 10.1089/soro.2016.0030.
- [6] B. Mosadegh *et al.*, "Pneumatic Networks for Soft Robotics that Actuate Rapidly," *Adv. Funct. Mater.*, vol. 24, no. 15, pp. 2163–2170, Apr. 2014, doi: 10.1002/adfm.201303288.
- [7] R. B. N. Scharff, E. L. Doubrovski, W. A. Poelman, P. P. Jonker, C. C. L. Wang, and J. M. P. Geraedts, "Towards Behavior Design of a 3D-Printed Soft Robotic Hand," in *Soft Robotics: Trends, Applications and Challenges*, vol. 17, C. Laschi, J. Rossiter, F. Iida, M. Cianchetti, and L. Margheri, Eds. Cham: Springer International Publishing, 2017, pp. 23–29. doi: 10.1007/978-3-319-46460-2_4.
- [8] D. Rus and M. T. Tolley, "Design, fabrication and control of soft robots," *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 467–475, May 2015, doi: 10.1038/nature14543.
- [9] W. Hu, R. Mutlu, W. Li, and G. Alici, "A Structural Optimisation Method for a Soft Pneumatic Actuator," *Robotics*, vol. 7, no. 2, p. 24, Jun. 2018, doi: 10.3390/robotics7020024.
- [10] P. Polygerinos *et al.*, *Towards a soft pneumatic glove for hand rehabilitation*. 2013, p. 1517. doi: 10.1109/IROS.2013.6696549.
- [11] R. V. Martinez *et al.*, "Robotic tentacles with three-dimensional mobility based on flexible elastomers," *Adv. Mater. Deerfield Beach Fla.*, vol. 25, no. 2, pp. 205–212, Jan. 2013, doi: 10.1002/adma.201203002.
- [12] M. Manns, J. Morales, and P. Frohn, "Additive manufacturing of silicon based PneuNets as soft robotic actuators".