

IMPLEMENTASI OPTIMASI TOPOLOGI SEBAGAI INFILL MODIFIER PADA HASIL CETAK 3D PRINTER BERBAHAS POLYLACTIC ACID DENGAN MENGGUNAKAN METODE TAGUCHI

Gilar Pandu Annanto^{*1}, Sri Mulyo Bondan Respati¹ dan Ahmad Hamami Azhar¹

¹ Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Wahid Hasyim
Jl. Menoreh Tengah X/22, Sampangan, Semarang 50236.

Abstrak

Dewasa ini metode *fused deposition modeling* menjadi semakin populer dan banyak digunakan. Metode FDM dikenal memiliki kemampuan untuk memproduksi komponen dari berbagai material polimer seperti PLA, ABS, dan PETG. Hasil cetak FDM dapat memiliki kekuatan yang berbeda – beda yang dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti material dan parameter cetak. Penelitian ini berfokus untuk meneliti kekuatan dari hasil cetak FDM yang dicetak dengan menggunakan metode penggabungan dengan hasil optimasi topologi. Area yang merupakan hasil optimasi topologi akan diberikan kerapatan senilai 60%, 75% & 90%, sedangkan diluar area tersebut akan diberikan kerapatan senilai 10%, 25%, & 40%. Adapun jenis infill yang digunakan adalah cubic, grid, & 3D honeycomb. Untuk mengetahui kombinasi yang paling optimal, digunakan metode Taguchi yang akan membatasi jumlah kombinasi spesimen yang dicetak serta menganalisis faktor yang paling berpengaruh untuk mendapatkan nilai kekuatan tertinggi. Dari hasil pengujian diketahui bahwa untuk mendapatkan nilai kekuatan yang optimal, parameter yang dapat digunakan adalah inner infill berjenis 3d honeycomb dengan kerapatan 90% dikombinasikan dengan outer infill berjenis 3d honeycomb dengan kerapatan 25%.

Kata kunci: 3d printing, FDM, kekuatan, PLA.

PENDAHULUAN

Additive manufacturing atau biasa dikenal dengan 3D printing merupakan salah satu cabang dari teknologi yang berbasis *rapid-prototyping* (Fernandez-Vincente dkk, 2016). Teknologi ini mampu merealisasikan sebuah model 3D menjadi sebuah bentuk fisik dengan menggunakan dasar konsep menambah lapisan demi lapisan, berbeda dengan teknologi manufaktur konvensional yang berbasis pengurangan material (Qattawi dkk, 2017). Disisi lain, teknologi *additive manufacturing* atau 3D printing juga memungkinkan pengguna untuk membuat bentuk fisik dari berbagai benda yang memiliki geometri yang cukup kompleks (Pearce dkk, 2010). Selain itu, teknologi ini juga memiliki mampu menghematan ongkos produksi serta menghasilkan limbah yang lebih sedikit sehingga teknologi ini layak menjadi salah satu teknologi yang patut untuk dipertimbangkan dalam sebuah industri karena mampu mempercepat fase perancangan dari suatu produk (Diegel dkk, 2010).

Fused deposition modeling merupakan cabang dari teknologi *additive manufacturing* yang cukup banyak cukup lazim dan banyak diterapkan oleh berbagai kalangan (Ruban dkk, 2014). *Fused deposition modelling* atau biasa

disingkat dengan FDM merupakan salah satu metode yang cukup banyak diaplikasikan karena kemudahan dalam penggunaannya, memiliki harga yang terjangkau, serta bahan baku yang memiliki berbagai banyak pilihan serta mudah untuk didapatkan (Urquizo dkk 2019). Mesin 3D printing berbasis FDM, memiliki kapabilitas dalam mengakselerasi pengembangan suatu produk dalam industri, hal ini dikarenakan kemudahan dalam membuat sebuah purwarupa dari konsep produk yang dirancang, disatu sisi, produk yang di cetak menggunakan metode ini juga tidak jarang memiliki kemampuan untuk dapat diterapkan secara langsung pada sebuah sistem (Srinivasan dkk, 2020). 3D printer berbasis FDM memiliki cara kerja yaitu melelehkan benang polimer yang dikenal sebagai *filament*. Hasil lelehan *filament* ini kemudian diendapkan pada sebuah permukaan lalu menumpuknya dengan lapisan – lapisan baru hingga terbentuk sebuah geometri (Chua dkk, 2014).

Terdapat cukup banyak jenis *filament* yang bisa didapatkan dengan mudah di pasaran, seperti *poly lactic acid (PLA)*, *polyethylene terephthalate glycol (PETG)*, dan *acrylonitrile butadiene styrene (ABS)*. PLA merupakan material yang memiliki kelebihan yaitu

kemudahan dalam perlakuan manufaktur serta biodegradable (Arockiam dkk, 2021). Selain itu, *filament PLA* juga merupakan *filament* yang paling mudah didapatkan dipasaran, oleh karena itu membuat jenis *filament* ini menjadi yang paling populer dibandingkan dengan jenis yang lainnya.

Dalam proses manufaktur, kekuatan merupakan salah satu parameter yang cukup penting karena akan digunakan sebagai penentu dalam spesifikasi suatu produk. Kekuatan dari hasil cetak yang menggunakan metode FDM terbilang cukup kompleks, hal ini dikarenakan kekuatan produk hasil cetak tidak hanya mengandalkan material *filament* saja, tetapi parameter – parameter seperti sudut orientasi, kerapatan isian, pola isian, ketebalan dinding dan beberapa parameter lainnya memiliki peran yang penting dalam menghasilkan sebuah produk dengan nilai kekuatan tertentu (Durgasyam dkk, 2019).

Penelitian ini berfokus untuk mengetahui kekuatan dari hasil cetak FDM yang dicetak dengan menggunakan metode penggabungan dengan hasil optimasi topologi. Area yang merupakan hasil optimasi topologi akan diberikan kerapatan senilai 60%, 75% & 90% , sedangkan diluar area tersebut akan diberikan kerapatan senilai 10%, 25%, & 40%. Adapun jenis infill yang digunakan adalah *cubic*, *grid*, & *3D honeycomb*. Untuk mengetahui kombinasi yang paling optimal, digunakan metode Taguchi yang akan membatasi jumlah kombinasi spesimen yang dicetak serta mengalisis faktor yang paling berpengaruh untuk mendapatkan nilai kekuatan tertinggi

METODOLOGI

Adapun alat yang digunakan dalam proses penelitian ini adalah mesin 3D *printer* berjenis FDM di laboratorium perancangan jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Wahid Hasyim. Tabel 1 menunjukkan spesifikasi lengkap dari mesin 3D *printer* yang digunakan dalam penelitian ini. Mesin uji tarik digunakan untuk menguji kekuatan setiap spesimen yang telah dicetak. Mesin uji tarik yang digunakan merupakan milik dari laboratorium material Jurusan Teknik Mesin Universitas Wahid Hasyim. Tabel 2 menunjukkan spesifikasi teknik dari mesin uji tarik yang digunakan. Bahan yang digunakan dalam pembuatan spesimen uji adalah *Poly-lactic Acid (PLA)*. Bahan ini merupakan salah

satu yang cukup mudah didapatkan dipasaran. Adapun spesifikasi dari bahan yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 3.

Tabel 1. Spesifikasi mesin 3D printer Ender 3

Nama	Keterangan
<i>Modeling technology</i>	FDM
<i>Printing size</i>	235*235*250 mm
<i>Filament size</i>	175 mm
<i>File format</i>	STL, OBJ, AMF
<i>Nozzle Diameter</i>	0,4 mm

Tabel 2. Spesifikasi mesin uji tarik

Parameter	Keterangan
<i>Capacity</i>	200 KN
<i>Speed (without loading)</i>	0-90 mm/min
<i>Accuracy</i>	1%
<i>Driving Method</i>	<i>Hydraulic system</i>
<i>Max space</i>	460 mm
<i>Grip for rod (rod diameter)</i>	10-40
<i>Grip for plate</i>	40×60 mm
<i>Effective space</i>	540 mm
<i>Effective space</i>	280

Tabel 3. Spesifikasi material PLA

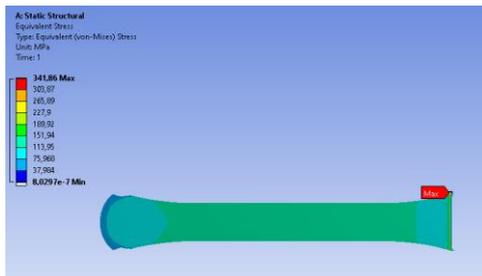
Parameter	Keterangan
Warna	Putih
Diameter	1,75 mm
<i>Roundness</i>	0,01-0,02 mm
<i>Tolerance</i>	
<i>Print Temperature</i>	230° - 250°C
<i>Print Bed Temperature</i>	70° - 100°C

Tabel 4. Variasi pola serta kerapatan isian spesimen

Infill	Kerapatan
<i>Rectilinear</i>	30%
<i>Stars</i>	30%
<i>3D Honeycomb</i>	30%
<i>Archimedean Chords</i>	30%
<i>Support Cubic</i>	30%

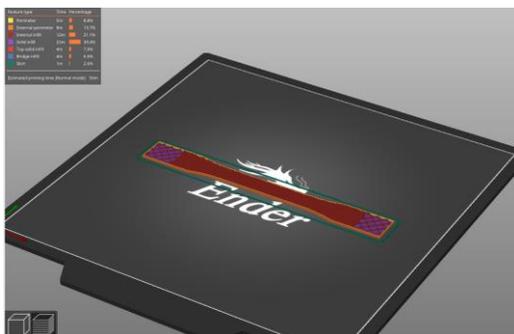
Langkah pertama yang dilakukan adalah memodelkan Spesimen uji menggunakan perangkat lunak berbasis CAD. Spesimen uji dimodelkan sesuai dengan standar ASTM D-638. Spesimen yang telah dimodelkan dikonversi menjadi file dengan ekstensi

stereolithography (*.STL) dan *parasolid* (*.x_t.). File dengan ekstensi *parasolid* kemudian dimasukkan ke dalam perangkat lunak berbasis CAE untuk dilakukan analisis tegangan untuk mendapatkan gambaran mengenai area kritis yang terjadi akibat pembebanan pada model tersebut. Area kritis tersebut kemudian dipisahkan dengan area yang non-kritis seperti yang terlihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Area kritis yang telah terpisah dengan area non-kritis pada model spesimen uji.

Area kritis yang sudah terpisah ini kemudian di konversi menjadi sebuah file dengan ekstensi *stereolithography*. Langkah selanjutnya adalah menggabungkan dua file *stereolithography* menjadi satu. Penggabungan dua file ini menggunakan perangkat lunak *slicer* yang juga berfungsi sebagai pembuat *gcode* untuk mesin *3D printing*. File *stereolithography* yang merupakan hasil dari perangkat lunak CAD diatur sebagai sebuah *part* yang selanjutnya akan diberikan pengaturan sebagai *outer area* sedangkan file *stereolithography* yang merupakan hasil dari perangkat lunak CAE diatur sebagai *modifier* yang selanjutnya akan diberikan pengaturan sebagai *inner area*. Gambar 2 menunjukkan hasil penggabungan dari dua file *stereolithography* yang merupakan *part* dan *modifier*.



Gambar 2. Hasil penggabungan dari dua file *stereolithography*.

Untuk mengetahui kombinasi jenis – jenis *infill* dan kerapatan *infill* yang akan diaplikasikan pada spesimen uji adalah dengan menggunakan metode *Taguchi*. Data pada metode *Taguchi* diatur 4 buah faktor dengan masing – masing 3 variasi setiap faktornya. 4 buah faktor yang diterapkan adalah *outer infill* yang terdiri dari *cubic*, *grid* & *3D honeycomb*, *inner infill* yang terdiri dari *cubic*, *grid* & *3D honeycomb*, *outer density* yang terdiri dari 10%, 25% & 30% serta *inner density* yang terdiri dari 60%, 75%, dan 90%.

Tabel 5. Kombinasi yang dihasilkan melalui metode *Taguchi*.

Kombinasi No	Outer Fill	Inner Fill	Outer Density	Inner Density
1	Cubic	Cubic	10	60
2	Cubic	Grid	25	75
3	Cubic	3D H Comb	40	90
4	Grid	Cubic	25	90
5	Grid	Grid	40	60
6	Grid	3D HComb	10	75
7	3D H Comb	Cubic	40	75
8	3D H Comb	Grid	10	90
9	3D H Comb	3D HComb	25	60

Metode *Taguchi* akan menghasilkan jumlah kombinasi minimal yang dapat digunakan sebagai acuan dalam mencari sebuah kombinasi yang optimal. Adapun kombinasi yang dihasilkan oleh metode *Taguchi* dapat terlihat pada **Tabel 5**.

Tabel 6. Hasil Pengujian tarik setiap kombinasi

Kombinasi No.	Yield 1 (MPa)	Yield 2 (MPa)	Yield 3 (MPa)
1	16,27	13,56	13,86
2	17,2	16,08	17,08
3	16,97	14,51	18,85
4	14,13	15,6	15,76
5	13,27	13,55	15,83
6	15,35	16,8	16,93
7	16,4	16,88	16,44
8	20,17	18,03	21,78
9	17,61	19,78	22,91

Hasil kombinasi ini kemudian diterapkan pada *file stereolithography* yang telah digabungkan dengan pengaturan *outer infill* dan *outer density* diterapkan pada bagian *part* serta pengaturan *inner infill* dan *inner infill* diterapkan pada bagian *modifier*. Langkah berikutnya adalah merubah *file stereolithography* yang telah diberikan pengaturan menjadi *file* berekstensi *.gcode agar dapat dimanufaktur oleh mesin 3D printing.

Tabel 7. lama waktu cetak.

Kombinasi No.	UTS 1 (MPa)	UTS 2 (MPa)	UTS 3 (MPa)	Waktu (Menit)
1	18,01	15,02	15,34	133
2	19,04	17,79	18,87	139
3	18,77	17,65	20,88	185
4	15,59	17,24	17,42	166
5	14,62	14,87	17,47	142
6	17,14	18,73	18,89	137
7	18,09	18,62	18,07	157
8	22,33	19,93	24,11	164
9	19,65	21,89	25,32	139

HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis Taguchi untuk yield stress

Terdapat 2 jenis klasifikasi faktor menurut Taguchi & Phadke, 1989, yaitu *control factor* dan *noise factor*. *control factor* adalah faktor yang ditentukan oleh perancang sementara *noise factor* adalah faktor yang tidak dapat dikendalikan seperti kelembaban ataupun temperature dari lingkungan. Sehingga, parameter *signal-to-noise ratio* (S/N ratio) digunakan untuk membuat sebuah proses lebih tidak sensitif terhadap perubahan pada factor-factor yang tidak dapat dikendalikan atau *noise factor*, yang bertujuan untuk dapat menghasilkan sebuah system yang *robust*. Terdapat 3 jenis dari S/N ratio berdasarkan kesesuaian dari hasil yaitu *smaller is better*, *nominal is better*, *bigger is better*. Di dalam pengujian Tarik, kekuatan Tarik harus memiliki nilai yang besar, sehingga opsi *bigger is the better* digunakan untuk menyelesaikan masalah ini. Adapun persamaan yang digunakan adalah :

$$\frac{S}{N} = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right] \quad (1)$$

Nilai n yang digunakan pada analisis *yield stress* ini adalah 1 karena nilai rata-rata hasil pengujian digunakan sebagai acuan perhitungan.

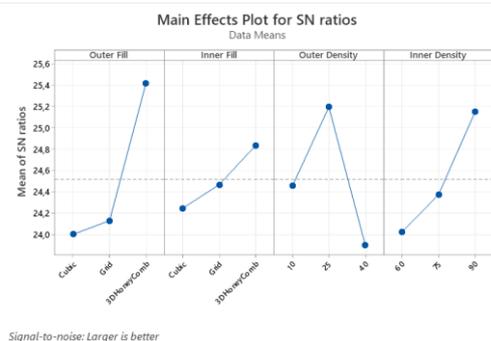
Tabel 7 menunjukkan nilai *mean*, *S/N Ratio* dan *standard deviation of mean* dari hasil *yield stress*. Efek dari setiap parameter dan masing – masing levelnya ditunjukkan pada tabel 9. Adapun pengaturan parameter untuk mendapatkan nilai *yield strength* yang optimal adalah dengan memilih nilai tertinggi dari S/N ratio untuk setiap factor, yang mana seperti yang ditunjukkan pada tabel 9 dan Gambar 3 adalah *outer fill* berjenis *3d honeycomb* dengan kerapatan 25% dengan *inner fill* dengan kerapatan 90%.

Tabel 8. Detail nilai yield stress berdasarkan analisis Taguchi

Kombinasi No.	Mean Yield Strength	S/N Ratio (dB)	SD of Mean
1	16,12	24,06	1,63
2	18,57	25,36	0,67
3	19,10	25,56	1,63
4	16,75	24,45	1,01
5	15,65	23,81	1,58
6	18,25	25,20	0,96
7	18,26	25,22	0,31
8	22,12	26,81	2,09
9	22,29	26,82	2,85

Tabel 9. Average performance of (S/N) ratio berdasarkan nilai yield stress.

Level	Outer Fill	Inner Fill	Outer Density	Inner Density
1	24,01	24,25	24,46	24,03
2	24,13	24,47	25,19	24,38
3	25,41	24,84	23,90	25,15
Delta	1,41	0,59	1,29	1,12
Rank	1	4	2	3



Gambar 3. Main effect plot untuk SN ratio berdasarkan nilai yield stress.

Dari tabel 9. diperoleh informasi bahwa apabila untuk menghasilkan spesimen dengan

nilai *yield stress* yang optimal, faktor utama yang paling berpengaruh adalah pada faktor *outer fill*, faktor berikutnya yang berpengaruh adalah *outer density*, lalu diikuti dengan *inner density* dan faktor yang memiliki pengaruh paling akhir adalah *inner fill*.

Prosedur analisis yang dilakukan untuk nilai *ultimate tensile stress* sama dengan prosedur pada analisis nilai *yield stress*. Nilai *ultimate tensile stress* harus memiliki nilai yang besar, sehingga opsi *bigger is the better* digunakan untuk menyelesaikan masalah ini.

Nilai *n* yang digunakan pada analisis *ultimate tensile stress* adalah 1 karena rata – rata dari setiap hasil pengujian digunakan sebagai acuan perhitungan. Tabel 10 menunjukkan hasil dari *ultimate tensile stress* dan S/N Ratio.

Efek dari setiap parameter dan masing – masing levelnya ditunjukkan pada tabel 11. Adapun pengaturan parameter untuk mendapatkan nilai *yield strength* yang optimal adalah dengan memilih nilai tertinggi dari S/N ratio untuk setiap factor, yang mana seperti yang ditunjukkan pada Table 10 dan Gambar 4 adalah *outer fill* berjenis *3d honeycomb* dengan kerapatan 25% dengan *inner fill* dengan kerapatan 90%.

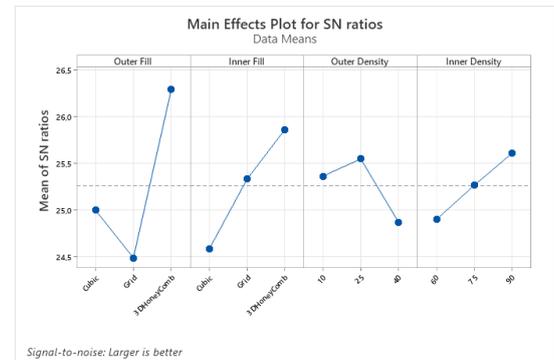
Tabel 10. Detail nilai *ultimate tensile stress* berdasarkan analisis Taguchi

Kombinasi No.	Mean Yield Strength	S/N Ratio (dB)	SD of Mean
1	16,12	24,06	1,63
2	18,57	25,36	0,67
3	19,10	25,56	1,63
4	16,75	24,45	1,01
5	15,65	23,81	1,58
6	18,25	25,20	0,96
7	18,26	25,22	0,31
8	22,12	26,81	2,09
9	22,29	26,82	2,85

Tabel 11. Average performance of (S/N) ratio berdasar nilai *ultimate tensile stress*

Level	Outer Fill	Inner Fill	Outer Density	Inner Density
1	25,00	24,58	25,36	24,90
2	24,49	25,33	25,55	25,27
3	26,29	25,86	24,87	25,61
Delta	1,80	1,28	0,68	0,71
Rank	1	2	4	3

Dari tabel 11, diperoleh informasi bahwa apabila untuk menghasilkan spesimen dengan *ultimate tensile stress* yang optimal, faktor utama yang paling berpengaruh adalah pada faktor *outer fill*, faktor berikutnya yang berpengaruh adalah *inner fill*, lalu diikuti dengan *inner density* dan faktor yang memiliki pengaruh paling akhir adalah *outer density*.



Gambar 4. Main effect plot untuk SN ratio berdasarkan nilai *ultimate tensile stress*.

PENUTUP

Kesimpulan

Proses manufaktur berbasis 3D *printing* dapat menghasilkan produk dengan lebih cepat dibandingkan dengan metode konvensional. Hasil cetak mampu memiliki karakteristik yang berbeda tergantung dengan beberapa faktor yang mempengaruhinya, salah satunya adalah pola isian atau *infill*. Dari penelitian yang telah dilakukan, diketahui bahwa untuk mendapatkan nilai kekuatan yang optimal, parameter yang dapat digunakan adalah inner infill berjenis *3d honeycomb* dengan kerapatan 90% dikombinasikan dengan outer infill berjenis *3d honeycomb* dengan kerapatan 25%.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kepada pihak Lembaga Penelitian dan Pengabdian Kepada Masyarakat (LP2M) Universitas Wahid Hasyim yang telah memberikan dukungan berupa moril dan materiil. Dukungan moril yang berupa kepercayaan LP2M kepada dosen untuk melaksanakan penelitian serta dukungan materiil yaitu bantuan dana operasional dalam skema hibah DIPA tahun 2021.

DAFTAR PUSTAKA

Arockiam, A. J., Subramanian, K., Padmanabhan, R. G., Selvaraj, R., Bagal, D. K., & Rajesh, S. (2021). A review on

- PLA with different fillers used as a filament in 3D printing. *Materials Today: Proceedings*.
- Chua, C. K., Leong, K. F., & An, J. (2020). Introduction to rapid prototyping of biomaterials. In *Rapid prototyping of biomaterials* (pp. 1-15). Woodhead Publishing.
- Primack, H.S., (1983), Method of Stabilizing Polyvalent Metal Solutions, *U.S. Patent No. 4,373,104*
- Cuan-Urquiza, E., Barocio, E., Tejada-Ortigoza, V., Pipes, R. B., Rodriguez, C. A., & Roman-Flores, A. (2019). Characterization of the mechanical properties of FFF structures and materials: A review on the experimental, computational and theoretical approaches. *Materials*, 12(6), 895.
- Diegel, O., Singamneni, S., Reay, S., & Withell, A. (2010). Tools for sustainable product design: additive manufacturing.
- Durgashyam, K., Reddy, M. I., Balakrishna, A., & Satyanarayana, K. (2019). Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition modeling method. *Materials Today: Proceedings*, 18, 2052-2059.
- Fernandez-Vicente, M., Calle, W., Ferrandiz, S., & Conejero, A. (2016). Effect of infill parameters on tensile mechanical behavior in desktop 3D printing. *3D printing and additive manufacturing*, 3(3), 183-192.
- Pearce, J., Blair, C., Laciak, K., Andrews, R., Nosrat, A., & Zelenika-Zovko, I. (2010). 3-D printing of open source appropriate technologies for self-directed sustainable development. *European Journal of Sustainable Development*, 3.
- Ruban, W., Vijayakumar, V., Dhanabal, P., & Pridhar, T. (2014). Effective process parameters in selective laser sintering. *International Journal of Rapid Manufacturing*, 4(2-4), 148-164.
- Blau, P.J., (2009), *Friction Science and Technology: From Concepts to Applications*, 2nd Ed., CRC Press, New York, pp. 183-219.
- Srinivasan, R., Ruban, W., Deepanraj, A., Bhuvanesh, R., & Bhuvanesh, T. (2020). Effect on infill density on mechanical properties of PETG part fabricated by fused deposition modelling. *Materials Today: Proceedings*, 27, 1838-1842.
- Hsu, S.M. and Shen, M.C., (2005), *Wear Mapping of Materials*, in Stachowiak, G.W. (Ed.). *Wear - Materials, Mechanisms and Practice*, John Wiley & Sons, London, pp. 369-423.
- Qattawi, A., Alrawi, B., & Guzman, A. (2017). Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: a design-for-manufacturing approach. *Procedia Manufacturing*, 10, 791-803.