

Pengaruh variasi parameter cetak dan *post process* terhadap tingkat kekerasan spesimen hasil cetak tiga dimensi berbasis *stereolithography* (SLA)

Aris Sandi^{1*}, Muslim Mahardika¹, Sukmaji Indro Cahyono¹, Urip Agus Salim¹,
Juan Pratama¹, Budi Arifvianto¹

¹Departemen Teknik Mesin dan Industri, Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada
Jl. Grafika 2 Yogyakarta 55281

*Email korespondensi: aris.sandi750@mail.ugm.ac.id

Received Feb 13, 2022; Accepted Feb 24, 2022; Published Mar 8, 2022

Abstrak. Keunggulan 3D *printing stereolithography* (SLA) dalam mencetak spesimen dengan geometri yang kompleks dan kekasaran permukaan yang rendah menjadikan teknologi ini semakin banyak digunakan di berbagai bidang. Terlepas dari keunggulan yang dimiliki, sifat mekanis spesimen hasil cetak SLA yang rendah menjadi salah satu kekurangan utamanya. Dari beberapa penelitian telah dilakukan pengujian mekanis yang menunjukkan bahwa parameter cetak mempengaruhi sifat mekanis spesimen hasil cetak. Pada penelitian ini, pengaruh variasi parameter cetak dan *post process* pada kekerasan spesimen hasil cetak 3D *printer* SLA diteliti. Variasi parameter cetak pada penelitian ini antara lain *build orientation* (0° dan 90°), *layer thickness* (0,05, 0,1, 0,15, dan 0,2 mm), dan *curing time* (10, 20, 30, dan 40 menit). Hasil penelitian menunjukkan bahwa parameter cetak dan *post process* terbukti mempengaruhi tingkat kekerasan spesimen hasil cetak. Tingkat kekerasan tertinggi yang bernilai 87,9 *Shore D* didapatkan pada variasi *build orientation* 0° dengan *layer thickness* 0,05 mm dan *curing time* 40 menit.

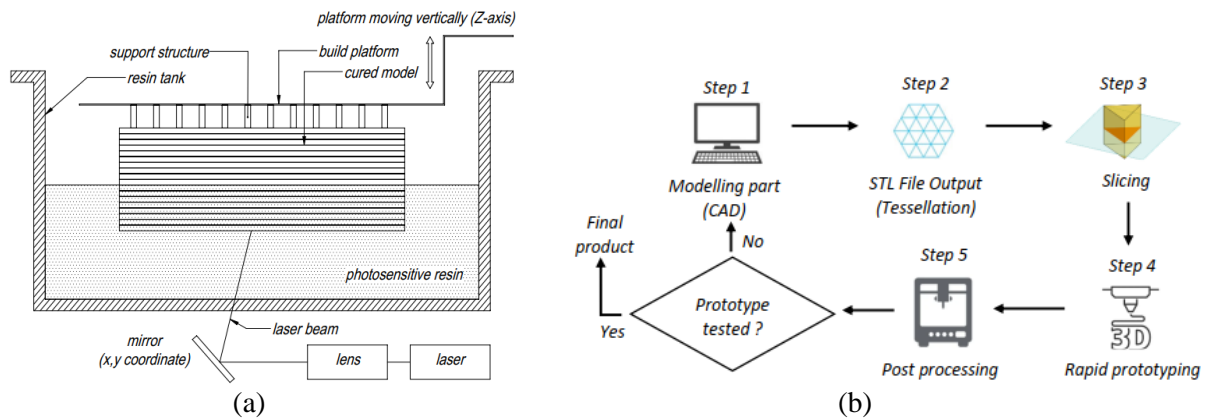
Kata kunci: *Stereolithography*; *Layer Thickness*, *Build Orientation*, *Curing Time*, *Shore D Hardness*, PLA

1. Pendahuluan

Teknik 3D *printing* (3DP) merupakan metode yang digunakan untuk membuat produk mekanis yang memiliki beberapa keunggulan seperti mampu mencetak geometri yang kompleks dengan penggunaan bahan yang relatif lebih hemat tanpa membutuhkan cetakan (*molding*) dan *tool* yang mahal [1]–[4]. Jika dibandingkan dengan proses pencetakan secara konvensional seperti *casting*, proses pencetakan menggunakan 3DP memiliki rentang waktu proses yang lebih singkat [5], fleksibilitas dalam melakukan desain produk [6], dan kualitas permukaan hasil cetak yang tinggi [7]. Dewasa ini, telah dikembangkan beberapa teknik 3DP untuk material polimer, misalnya *Selective Laser Sintering* (SLS) [8], *Laminated Object Manufacturing* (LOM) [9], *Fused Deposition Modeling* (FDM) [10], [11], dan *stereolithography* (SLA) [12]. Di antara berbagai teknik 3DP tersebut, SLA memiliki tingkat akurasi yang baik [13] serta mampu menghasilkan produk dengan kekasaran permukaan dan porositas yang rendah [2][14].

Secara prinsip, SLA menggunakan dua proses. Pertama, model spesimen didesain menggunakan *software computer aided design* (CAD) dengan luaran *format file standard tessellation language* (STL). *File STL* tersebut diolah dengan bantuan *slicer software* untuk mendapatkan lapisan yang diiris secara horizontal

sesuai dengan ketebalan lapisan yang diinginkan. *File* luaran dari *licer software* diterapkan pada mesin 3DP SLA untuk dilakukan proses fabrikasi lapis demi lapis (resin dipadatkan menggunakan sinar laser UV) dengan parameter cetak yang telah ditentukan. Proses ini akan terus berulang hingga spesimen tercetak seutuhnya sesuai dengan geometri desain, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 (a). Selanjutnya, spesimen cetak dibersihkan dengan pelarut *tripropylene glycol monomethyl ether* (TPM) dan *isopropanol* dengan persentase yang tinggi (>95%) dan ditempatkan ke dalam *postcuring oven* untuk membangun silang (*cross linkages*) dengan bantuan sinar UV [15], sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1 (b).



Gambar 1. (a) Mekanisme SLA dan (b) Tahapan proses pada SLA

Dengan beberapa keunggulan yang dimilikinya, teknik 3DP SLA telah digunakan di berbagai bidang selama dua dekade terakhir, seperti biomedis, elektronik, teknik mesin dan teknik sipil [16][17]. Meski demikian, kelemahan teknik SLA saat ini masih ditemui, antara lain rendahnya sifat mekanis material hasil cetak yang diperoleh [18]. Sifat mekanis material hasil SLA dipengaruhi oleh parameter cetak yang digunakan [19]. Oleh karenanya, diperlukan pengaturan parameter cetak seperti *build orientation*, *layer thickness*, dan *post process* untuk mendapatkan spesimen hasil cetak dengan sifat mekanis yang lebih baik. *Build orientation* merupakan salah satu parameter yang berpengaruh terhadap kekerasan material hasil cetak 3DP SLA [20]. Hu dkk. (2019) melakukan penelitian dengan variasi *build orientation* 0°, 45°, dan 90° dengan tetap di sekitar sumbu X. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa *build orientation* 0° menghasilkan tingkat kekerasan tertinggi dari spesimen hasil cetak [20]. Parameter berikutnya adalah *layer thickness*, dimana parameter ini tidak hanya mempengaruhi sifat mekanis tetapi juga akurasi dimensi, serta kualitas permukaan [2], [21]–[26]. Chockalingam dkk. (2006) melakukan penelitian dengan variasi *layer thickness* 100, 125, dan 150 μm . Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa semakin kecil *layer thickness*, maka semakin tinggi kekuatan mekanisnya [22].

Selain parameter cetak, *post process* seperti *washing* dan *curing* juga memberikan pengaruh terhadap sifat mekanis spesimen hasil cetak [20], [27]–[29]. Salah satu variasi yang digunakan untuk mendapatkan hasil yang optimal yaitu dengan memvariasikan waktu lamanya *curing*. Dari hasil penelitiannya, Nowacki dkk. (2021) menyimpulkan bahwa hasil pengujian mekanis paling optimal didapatkan pada *curing time* minimal 30 menit [27]. Di sisi lain, Aati dkk. (2022) melakukan penelitian mengenai pengaruh variasi *curing time* terhadap kekerasan material, dengan *layer thickness* 100 μm dan *curing time* 0, 5, 10, dan 20 menit. Dari hasil penelitian tersebut, diketahui bahwa nilai kekerasan meningkat seiring dengan peningkatan *curing time* [28]. Hal serupa juga dinyatakan oleh Pszczółkowski dan Dzadz (2020) serta Hu dkk. (2019), bahwa semakin lama *curing time*, maka nilai kekerasan material semakin meningkat [20][29].

Berdasarkan beberapa penelitian terdahulu, uji mekanis yang difokuskan pada uji kekerasan pada umumnya menggunakan uji *Vickers* [27][28]. Akan tetapi, hasil cetak SLA merupakan material polimer dimana penggunaan pengujian *Vickers* bukanlah metode yang tepat. Uji kekerasan untuk material polimer seharusnya menggunakan pengujian *Shore D hardness* yang mana dikhususkan untuk material polimer, seperti yang dilakukan oleh Hu dkk. (2019). Meskipun demikian, penelitian yang dilakukan oleh Hu dkk. (2019) hanya difokuskan pada *build orientation* serta *curing time* tanpa adanya variasi *layer thickness*.

Oleh karenanya, dibutuhkan suatu penelitian untuk mengkonfirmasi serta melengkapi hasil penelitian sebelumnya terkait pengujian kekerasan pada hasil cetak SLA menggunakan uji *Shore D Hardness*. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan informasi mengenai pengaruh variasi parameter cetak terhadap kekerasan material hasil cetak SLA. Penelitian ini dilakukan pada material *3D printing UV Sensitive Resin Basic Clear Anycubic* dengan memvariasikan *build orientation* (0° dan 90°), *layer thickness* (0,05, 0,1, 0,15, dan 0,2 mm), dan *curing time* (10, 20, 30, dan 40 menit) pada proses SLA.

2. Material dan Metode Penelitian

2.1 Material

Pada penelitian ini, resin yang digunakan yaitu *3D printing UV Sensitive Resin Basic Clear Anycubic* yang dibeli dari Anycubic (*Shenzen Anycubic Technology Co., Ltd. China*) untuk membuat spesimen yang akan diuji kekerasan serta cairan alkohol 96% untuk proses *washing* yang mana proses ini merupakan proses menghilangkan resin yang tidak diawetkan yang masih menempel pada spesimen. Komposisi material resin yang digunakan pada penelitian ini disajikan pada Tabel 1 dan sifat-sifat dari resin ini terdapat pada Tabel 2.

Tabel 1. Komposisi *3D printing UV Sensitive Resin Anycubic* [30]

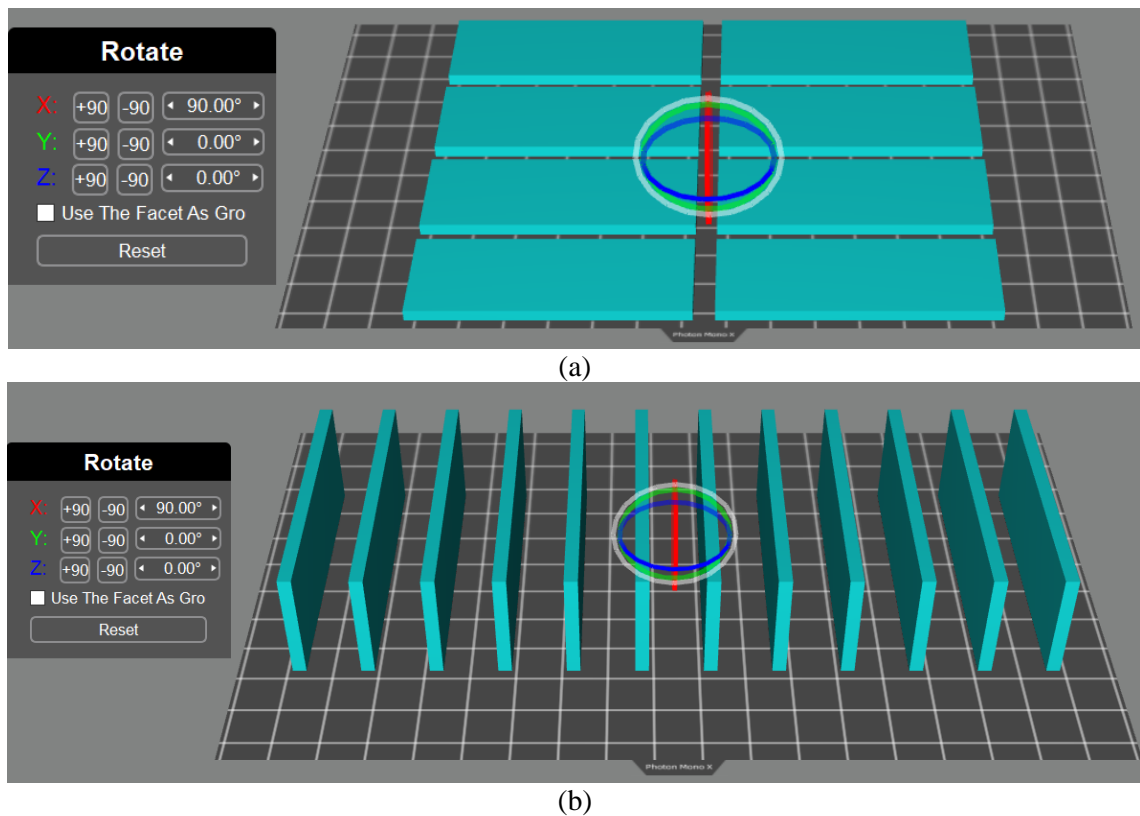
| <i>Composition</i> | | |
|--|---|-------------|
| <i>CAS: 71302-80-2</i> | <i>Fatty Acid, soya, epoxidized, Bu esters</i> | 45 % |
| <i>CAS: 29590-42-9</i> <i>EINECS: 249-707-8</i> <i>Index number: 607-244-00-2</i> | <i>Isooctyl acrylate</i> <i>Aquatic Acute 1, H400; Aquatic Chronic 1, H410; Skin Irrit. 2, H315; Eye Irrit. 2; H319; STOT SE 3, H335</i> | 30 % |
| <i>CAS: 94108-97-1</i> <i>EC number: 302-434-9</i> | <i>2-[[2,2-bis[(1-oxoallyl)oxy]methyl]-2-ethyl-1,3-propanediyl diacrylate</i> <i>Skin Irrit. 2, H315; Eye Irrit. 2, H319; Skin Sens. 1, H317</i> | 15 % |
| <i>CAS: 474510-57-1</i> <i>ELINCS: 444-860-9</i> <i>Index number: 606-140-00-4</i> | <i>2-hydroxy-1-(4-(4-(2-hydroxy-2-methylpropionyl)benzyl)phenyl)-2-methylpropan-1-one</i> <i>STOT RE 2, H373; Aquatic Acute 1, H400; Aquatic Chronic 1, H410</i> | 5 % |
| <i>CAS: 1328-53-6</i> <i>EINECS: 215-524-7</i> | <i>Polychloro copper phthalocyanine</i> | 5 % |

Tabel 2. *Resin properties UV Sensitive Resin Anycubic* [30]

| <i>Feature</i> | <i>Value</i> |
|----------------------------|-------------------------------|
| <i>Solidify wavelength</i> | <i>405 nm</i> |
| <i>Shelf life</i> | <i>12 months</i> |
| <i>Hardness (D)</i> | <i>79</i> |
| <i>Viscosity @25°C</i> | <i>552 mpa.s</i> |
| <i>Liquid density</i> | <i>1.100 g/cm³</i> |
| <i>Solid density</i> | <i>1.184 g/cm³</i> |
| <i>Tensile strength</i> | <i>23.4 MPa</i> |
| <i>Elongation</i> | <i>14.20 %</i> |
| <i>Bottom exposure</i> | <i>20-60 s</i> |
| <i>Normal exposure</i> | <i>5-15 s</i> |

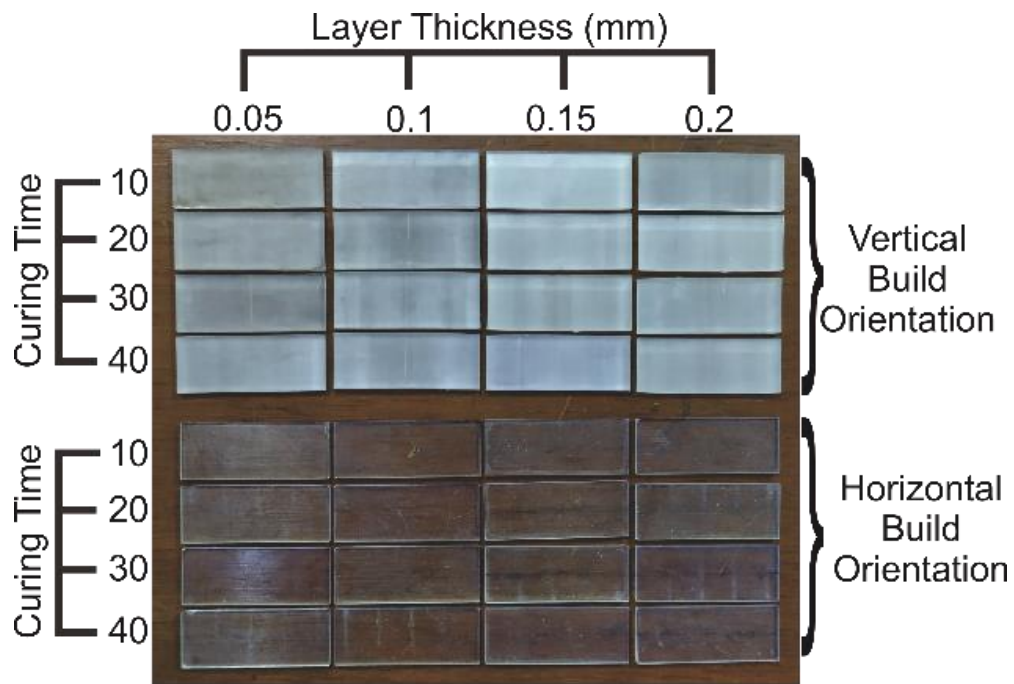
2.2 Pembuatan Spesimen

Dalam penelitian ini, spesimen dicetak dengan menggunakan mesin SLA 3DP Anycubic Photon Mono X. Selain itu, mesin Anycubic *Wash and Cure 2.0* digunakan untuk proses *washing* dan *curing* spesimen. Spesimen yang digunakan dalam penelitian dirancang dengan menggunakan *software Solidworks* untuk membuat desain 3D lalu disimpan dalam *format file standard tessellation language (STL)*. *File STL* yang dihasilkan pada *software CAD* diolah dengan bantuan *Photon Workshop slicer software* untuk mendapatkan lapisan yang diiris secara horizontal sesuai dengan ketebalan lapisan yang diinginkan. Pada *slicer software* ini, *build orientation* diatur seperti yang terlihat pada Gambar 2 (a) untuk *build orientation* 0° dan Gambar 2 (b) untuk *build orientation* 90° .



Gambar 2. Build orientation spesimen (a) 0° dan (b) 90°

Parameter pencetakan dan *design of experiment* (DoE) yang digunakan untuk spesimen penelitian ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4. File luaran dari *slicer software* yaitu *sliced file* (*.pwm) diterapkan pada mesin 3DP SLA untuk dilakukan proses fabrikasi dengan parameter cetak yang telah ditentukan. Spesimen hasil cetak dibersihkan (*washing*) menggunakan alkohol 96% selama lima menit lalu spesimen disinari (*curing*) dengan variasi *curing time* yang terlihat pada Tabel 3. Dalam eksperimen ini, sebanyak 32 spesimen telah dibuat untuk setiap pengujian. Spesimen pengujian berbentuk persegi panjang dengan dimensi $65 \times 25 \times 6$ mm seperti yang terlihat pada Gambar 3, mengikuti standar ASTM D2240 [31].



Gambar 3. Spesimen hasil cetak

Tabel 3. Parameter cetak yang digunakan
Slicing setting

| <i>Parameter</i> | <i>Value</i> |
|---------------------------------|----------------------|
| <i>Layer Thickness (mm)</i> | 0,05; 0,1; 0,15; 0,2 |
| <i>Normal Exposure Time (s)</i> | 15 |
| <i>Off Time (s)</i> | 0,5 |
| <i>Bottom Exposure Time (s)</i> | 40 |
| <i>Bottom Layers</i> | 1 |
| <i>Z Lift Distance (mm)</i> | 10 |
| <i>Z Lift Speed (mm/s)</i> | 1 |
| <i>Z Retract Speed (mm/s)</i> | 1 |
| <i>Anti-alias</i> | 1 |
| <i>Build orientation (deg)</i> | 0° dan 90° |
| <i>Post process</i> | |
| <i>Washing time (minute)</i> | 5 |
| <i>Curing time (minute)</i> | 10; 20; 30; 40 |

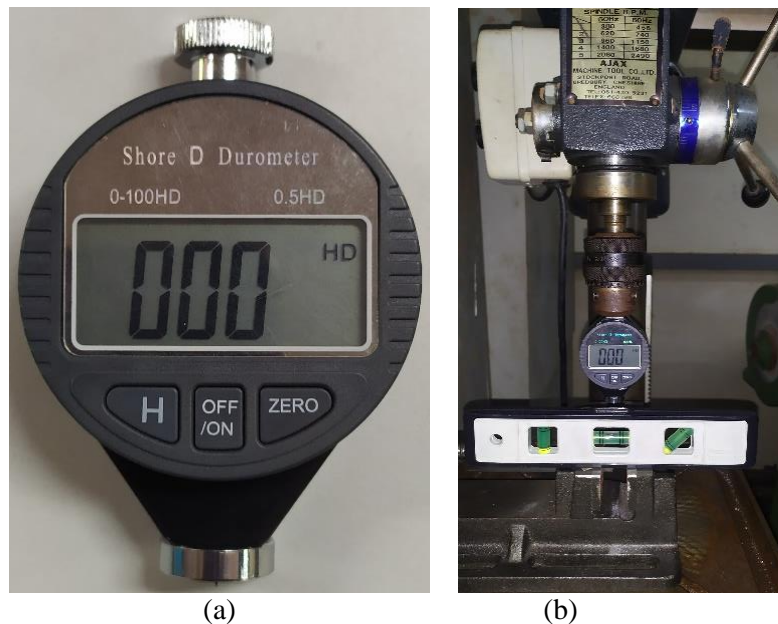
Tabel 4. *Design of experiment (DoE)*

| Run | Build orientation (deg) | Layer Thickness (mm) | Curing time (minute) | Washing time (minute) | Normal Exposure Time (s) |
|------------|--------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------|---------------------------------|
| 1 | 0 | 0,05 | 10 | 10 | 15 |
| 2 | 0 | 0,05 | 20 | 10 | 15 |
| 3 | 0 | 0,05 | 30 | 10 | 15 |
| 4 | 0 | 0,05 | 40 | 10 | 15 |
| 5 | 0 | 0,1 | 10 | 10 | 15 |
| 6 | 0 | 0,1 | 20 | 10 | 15 |
| 7 | 0 | 0,1 | 30 | 10 | 15 |
| 8 | 0 | 0,1 | 40 | 10 | 15 |
| 9 | 0 | 0,15 | 10 | 10 | 15 |
| 10 | 0 | 0,15 | 20 | 10 | 15 |
| 11 | 0 | 0,15 | 30 | 10 | 15 |
| 12 | 0 | 0,15 | 40 | 10 | 15 |
| 13 | 0 | 0,2 | 10 | 10 | 15 |
| 14 | 0 | 0,2 | 20 | 10 | 15 |
| 15 | 0 | 0,2 | 30 | 10 | 15 |
| 16 | 0 | 0,2 | 40 | 10 | 15 |
| 17 | 90 | 0,05 | 10 | 10 | 15 |
| 18 | 90 | 0,05 | 20 | 10 | 15 |
| 19 | 90 | 0,05 | 30 | 10 | 15 |
| 20 | 90 | 0,05 | 40 | 10 | 15 |
| 21 | 90 | 0,1 | 10 | 10 | 15 |
| 22 | 90 | 0,1 | 20 | 10 | 15 |
| 23 | 90 | 0,1 | 30 | 10 | 15 |
| 24 | 90 | 0,1 | 40 | 10 | 15 |
| 25 | 90 | 0,15 | 10 | 10 | 15 |
| 26 | 90 | 0,15 | 20 | 10 | 15 |
| 27 | 90 | 0,15 | 30 | 10 | 15 |
| 28 | 90 | 0,15 | 40 | 10 | 15 |
| 29 | 90 | 0,2 | 10 | 10 | 15 |
| 30 | 90 | 0,2 | 20 | 10 | 15 |
| 31 | 90 | 0,2 | 30 | 10 | 15 |
| 32 | 90 | 0,2 | 40 | 10 | 15 |

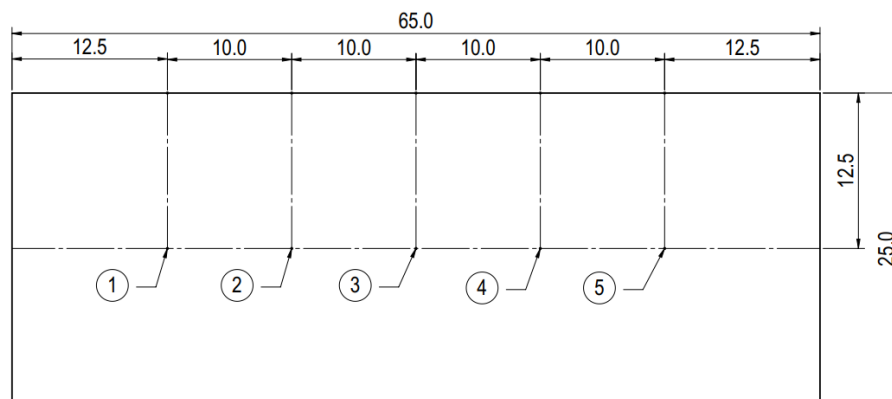
2.3 Prosedur Pengujian

Pengukuran kekerasan dilakukan dengan menggunakan *Digital Shore D Durometer* seperti yang terlihat pada Gambar 4 (a). Sebelum proses uji kekerasan, *Digital Shore D Durometer* dipasang pada *spindle drill machine* dengan tujuan agar tekanan yang diberikan pada spesimen stabil seperti yang terlihat pada Gambar 4 (b). Proses pengukuran kekerasan dilakukan di dalam ruangan dengan suhu 28°C dan kelembaban 72%.

Proses pengukuran kekerasan dilakukan pada lima titik yang berbeda dengan jarak antar titik pengukuran setidaknya 6 mm. Titik pertama pengukuran setidaknya terletak pada jarak 12 mm dari tepi spesimen dan terdapat lima titik pengukuran dengan jarak setidaknya 6 mm antar titik pengukuran lainnya seperti yang terlihat pada Gambar 5. Spesimen diletakkan pada *base* secara tegak lurus di bawah indenter lalu *hand shank* pada *drill machine* ditekan hingga kaki indenter bersentuhan penuh dengan spesimen untuk memastikan bahwa indenter tertancap pada permukaan spesimen.



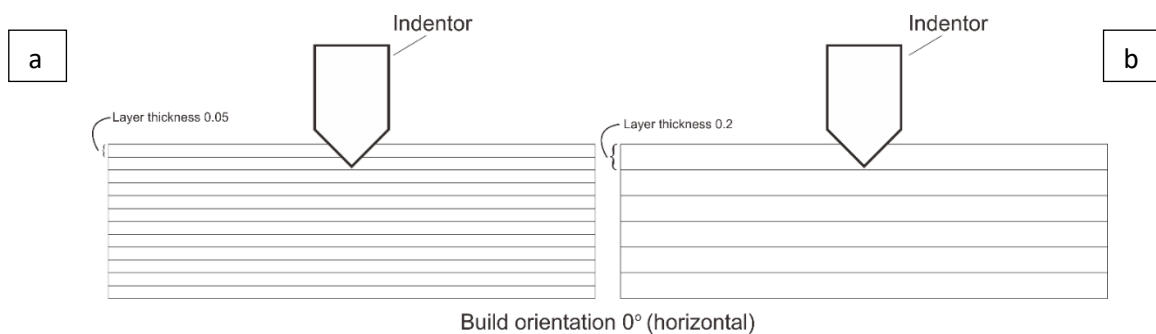
Gambar 4. (a) Digital Shore D Durometer dan (b) Durometer terpasang di spindle drill machine



Gambar 5. Ilustrasi titik pengujian pada spesimen

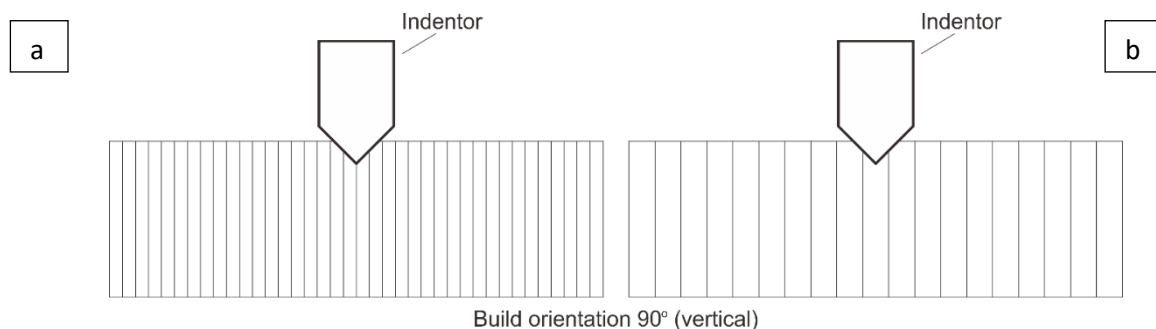
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian kekerasan pada *build orientation* 0° dan 90° ditunjukkan pada Tabel 5. Kemudian nilai rata-rata beserta simpangan digunakan sebagai representasi hasil pengujian kekerasan untuk *build orientation* 0° dan 90° , dimana masing-masing ditunjukkan pada Gambar 8 (a) dan (b). Pada grafik, nilai kontrol diambil dari *datasheet* material Anycubic yaitu senilai 79 Shore D Hardness. Pada *build orientation* 0° , terlihat bahwa nilai kekerasan berbanding terbalik dengan *layer thickness*. Semakin tebal *layer thickness*, maka nilai kekerasan semakin kecil. Hal tersebut disebabkan karena semakin kecil atau tipis *layer thickness* maka akan semakin banyak lapisan yang menahan beban, seperti yang diilustrasikan pada Gambar 6. Berdasarkan Gambar 6 (a), terlihat bahwa pada *layer thickness* 0,05 mm, jumlah *layer* yang menahan beban penetrasi lebih banyak dibandingkan pada *layer thickness* 0,2 mm (Gambar 6 (b)). Selain itu, semakin banyak lapisan yang dicetak akan membutuhkan beban penetrasi indenter yang lebih besar karena harus menembus ikatan antar *layer* yang memiliki delaminasi atau rongga yang sangat kecil dan memiliki tingkat kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan pada bagian tengah *layer* itu sendiri [32].



Gambar 6. Ilustrasi lapisan yang menahan beban penetrasi pada *build orientation* 0° dan *layer thickness* (a) 0,05 mm dan (b) 0,2 mm

Di sisi lain, nilai kekerasan juga dipengaruhi oleh *curing time*. Grafik Gambar 8 menunjukkan bahwa nilai kekerasan tertinggi terdapat pada *curing time* 40 menit. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin lama *curing time*, maka nilai kekerasan semakin besar. Hal tersebut sesuai dengan hasil penelitian Hu dkk. (2019) [20] dan Aati dkk. (2022) [28]. Hal ini juga mendukung fenomena yang diilustrasikan pada Gambar 7. *Curing time* menyebabkan ikatan antar lapisan menjadi lebih baik sehingga dibutuhkan beban penetrasi yang lebih tinggi pada spesimen dengan *curing* 40 menit. Akan tetapi, *layer thickness* lebih memegang peranan dalam konsistensi hasil kekerasan. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 8 (a), dimana pada grafik terlihat jelas bahwa semakin tebal *layer thickness*, maka akan semakin besar pula deviasi dari hasil pengujian. Sedangkan nilai deviasi tidak terpaut jauh pada *curing time* yang berbeda dalam *layer thickness* yang sama.

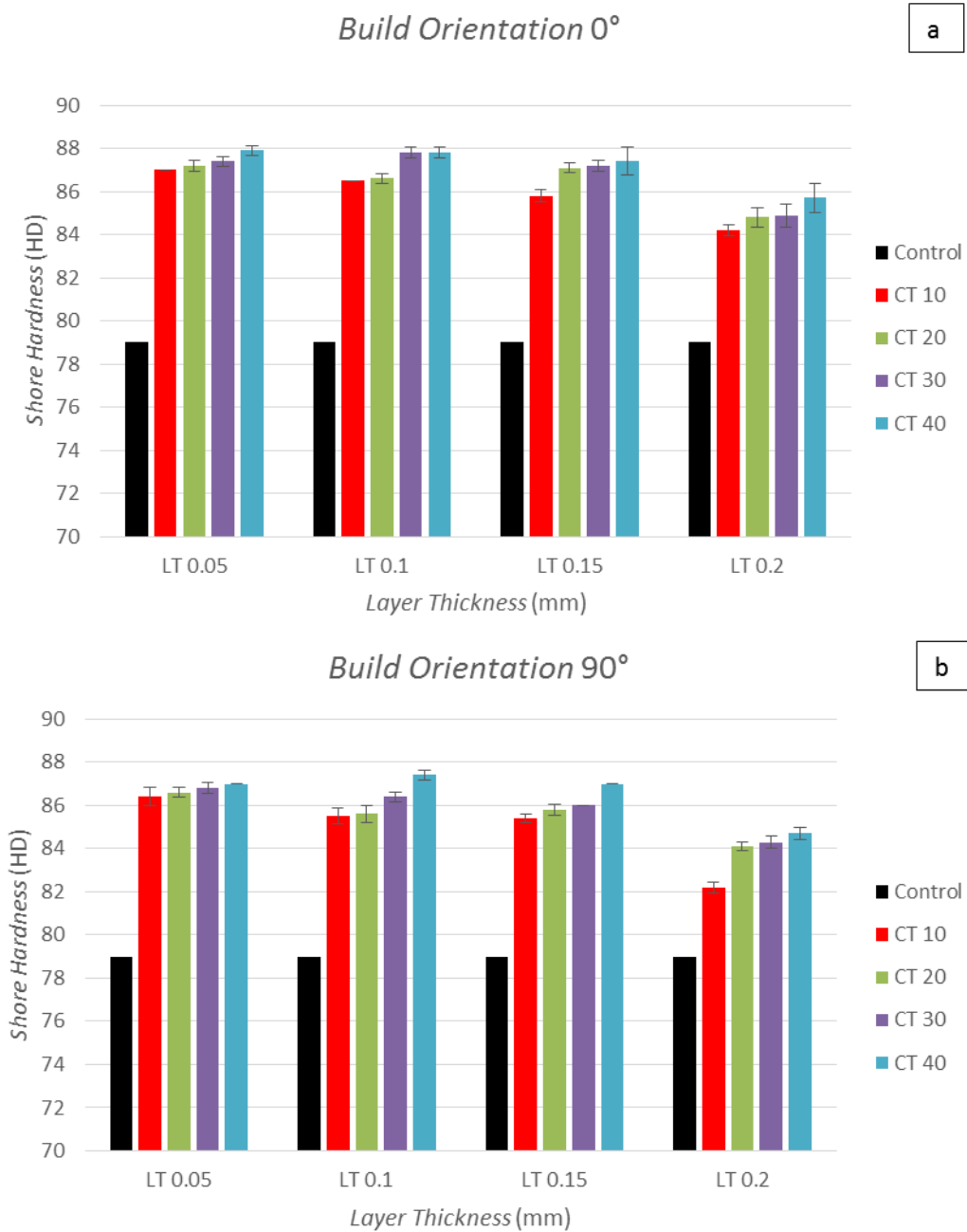


Gambar 7. Ilustrasi lapisan yang menahan beban penetrasi pada *build orientation* 90° dan *layer thickness* (a) 0,05 mm dan (b) 0,2 mm

Serupa dengan *build orientation* 0° , pada *build orientation* 90° pun terlihat (Gambar 8 (b)) bahwa semakin tebal *layer thickness*, maka nilai kekerasan semakin kecil. Hal tersebut disebabkan karena kekuatan ikatan antar lapisan lebih tinggi dibandingkan kekuatan pada satu lapisan itu sendiri [32]. Pada proses pengukuran kekerasan spesimen dengan *build orientation* 90° dan *layer thickness* yang besar, indenter mungkin hanya menekan pada satu *layer* sehingga nilai kekerasan tidak melibatkan kekuatan antar lapisan melainkan kekuatan *layer* itu sendiri seperti yang diilustrasikan pada Gambar 7. Nilai pengukuran kekerasan spesimen pada *build orientation* 90° lebih kecil dibandingkan dengan *build orientation* 0° yang terlihat pada Tabel 5. Hal ini disebabkan karena jalur arah tekan dari indenter berada pada persimpangan antar lapisan spesimen yang dicetak searah vertikal dengan orientasi lapisan yang sejajar dengan arah indenter [33].

Hal yang sama juga berlaku pada pengaruh *curing time* pada nilai kekerasan. Dari grafik terlihat bahwa nilai kekerasan tertinggi terdapat pada *curing time* 40 menit. Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa semakin lama *curing time*, maka nilai kekerasan semakin besar yang sesuai dengan hasil penelitian Hu dkk. (2019) [20] dan Aati dkk. (2022) [28]. Hal tersebut disebabkan karena *curing time* dapat meningkatkan derajat polimerisasi pada resin fotopolimer yang mana pada proses pencetakan pada 3DP menyebabkan intensitas pengawetan yang kurang mencukupi pada tiap lapisan tambahan yang mengurangi efisiensi ikatan silang [34]. Oleh karena itu, monomer pada resin yang tidak diawetkan sebagian diharapkan dapat diubah menjadi polimer yang dapat meningkatkan derajat polimerisasi dengan

melakukan proses *curing* [34]. Akan tetapi, peningkatan kekerasan material pada Gambar 8 (a) dan (b) hanya terjadi pada rentang *curing time* tertentu, seperti disebutkan pada penelitian Nowacki dkk. (2021) [27].



Gambar 8. Perbandingan *layer thickness* terhadap kekerasan pada dengan variasi *curing time* (a) *build orientation* 0° dan (b) *build orientation* 90°

Tabel 5. Hasil pengukuran kekerasan spesimen

| Run | Build Orientation (deg) | Layer thickness (mm) | Curing Time (min) | Washing Time (min) | Normal Exposure Time (s) | Hasil Pengukuran (Shore D Hardness) | | | | | Rata-rata | Deviasi |
|-----|-------------------------|----------------------|-------------------|--------------------|--------------------------|-------------------------------------|---|---|---|---|-----------|---------|
| | | | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | | |
| | | | | | | | | | | | | |

| | | | | | | | | | | | rata | | |
|-----------|---|------|------|----|----|----------|----------|----------|----------|----------|-------------|------|------|
| 1 | 0 | 0.05 | 10 | 5 | 15 | 87 | 87 | 87 | 87 | 87 | 87 | 0 | |
| 2 | | 0.05 | 20 | 5 | 15 | 87. 5 | 87 | 87. 5 | 87 | 87 | 87.2 | 0.27 | |
| 3 | | 0.05 | 30 | 5 | 15 | 87. 5 | 87 | 87. 5 | 87. 5 | 87. 5 | 87.4 | 0.22 | |
| 4 | | 0.05 | 40 | 5 | 15 | 88 | 87. 5 | 88 | 88 | 88 | 87.9 | 0.22 | |
| 5 | | 0.1 | 10 | 5 | 15 | 86. 5 | 86. 5 | 86. 5 | 86. 5 | 86. 5 | 86.5 | 0 | |
| 6 | | 0.1 | 20 | 5 | 15 | 86. 5 | 86. 5 | 86. 5 | 86. 5 | 87 | 86.6 | 0.22 | |
| 7 | | 0.1 | 30 | 5 | 15 | 87. 5 | 88 | 88 | 87. 5 | 88 | 87.8 | 0.27 | |
| 8 | | 0.1 | 40 | 5 | 15 | 87. 5 | 88 | 88 | 88 | 87. 5 | 87.8 | 0.27 | |
| 9 | | 0.15 | 10 | 5 | 15 | 85. 5 | 86 | 86 | 86 | 85. 5 | 85.8 | 0.27 | |
| 10 | | 0.15 | 20 | 5 | 15 | 87 | 87 | 87. 5 | 87 | 87 | 87.1 | 0.22 | |
| 11 | | 0.15 | 30 | 5 | 15 | 87 | 87. 5 | 87 | 87. 5 | 87 | 87.2 | 0.27 | |
| 12 | | 0.15 | 40 | 5 | 15 | 86. 5 | 87 | 88 | 87. 5 | 88 | 87.4 | 0.65 | |
| 13 | | 0.2 | 10 | 5 | 15 | 84. 5 | 84 | 84 | 84. 5 | 84 | 84.2 | 0.27 | |
| 14 | | 0.2 | 20 | 5 | 15 | 84 | 85 | 85 | 85 | 85 | 84.8 | 0.45 | |
| 15 | | 0.2 | 30 | 5 | 15 | 84 | 85 | 85 | 85 | 85. 5 | 84.9 | 0.55 | |
| 16 | | 0.2 | 40 | 5 | 15 | 85 | 85 | 86. 5 | 86 | 86 | 85.7 | 0.67 | |
| 17 | | 0.05 | 10 | 5 | 15 | 86. 5 | 86 | 87 | 86. 5 | 86 | 86.4 | 0.42 | |
| 18 | | 0.05 | 20 | 5 | 15 | 86. 5 | 86. 5 | 86. 5 | 87 | 86. 5 | 86.6 | 0.22 | |
| 19 | | 0.05 | 30 | 5 | 15 | 87 | 86. 5 | 87 | 87 | 86. 5 | 86.8 | 0.27 | |
| 20 | | 0.05 | 40 | 5 | 15 | 87 | 87 | 87 | 87 | 87 | 87 | 0 | |
| 21 | | 90 | 0.1 | 10 | 5 | 15 | 85 | 85. 5 | 85. 5 | 86 | 85. 5 | 85.5 | 0.35 |
| 22 | | | 0.1 | 20 | 5 | 15 | 85. 5 | 86 | 85. 5 | 86 | 85 | 85.6 | 0.42 |
| 23 | | | 0.1 | 30 | 5 | 15 | 86. 5 | 86. 5 | 86. 5 | 86 | 86. 5 | 86.4 | 0.22 |
| 24 | | | 0.1 | 40 | 5 | 15 | 87 | 87. 5 | 87. 5 | 87. 5 | 87. 5 | 87.4 | 0.22 |
| 25 | | | 0.15 | 10 | 5 | 15 | 85 | 85. 5 | 85. 5 | 85. 5 | 85. 5 | 85.4 | 0.22 |
| 26 | | | 0.15 | 20 | 5 | 15 | 86 | 85. 5 | 86 | 86 | 85. 5 | 85.8 | 0.27 |

| | | | | | | | | | | | |
|----|------|----|---|----|----------|----------|----------|----------|----------|------|------|
| 27 | 0.15 | 30 | 5 | 15 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 86 | 0 |
| 28 | 0.15 | 40 | 5 | 15 | 87 | 87 | 87 | 87 | 87 | 87 | 0 |
| 29 | 0.2 | 10 | 5 | 15 | 82. 5 | 82 | 82 | 82 | 82. 5 | 82.2 | 0.27 |
| 30 | 0.2 | 20 | 5 | 15 | 84 | 84 | 84 | 84 | 84. 5 | 84.1 | 0.22 |
| 31 | 0.2 | 30 | 5 | 15 | 84 | 84. 5 | 84. 5 | 84. 5 | 84 | 84.3 | 0.27 |
| 32 | 0.2 | 40 | 5 | 15 | 84. 5 | 85 | 84. 5 | 84. 5 | 85 | 84.7 | 0.27 |

4. Kesimpulan

Dari hasil eksperimen dalam penelitian ini, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- 1) *Layer thickness* mempengaruhi nilai kekerasan pada spesimen hasil cetak 3DP berbasis SLA. Semakin kecil *layer thickness*, maka semakin besar nilai kekerasannya.
- 2) *Curing time* berpengaruh terhadap nilai kekerasan, di mana semakin lama *curing time*, maka semakin tinggi nilai kekerasannya. Pada penelitian ini, nilai kekerasan tertinggi terdapat pada perlakuan *post processing* dengan *curing time* 40 menit.
- 3) *Build orientation* memiliki pengaruh terhadap nilai kekerasan pada spesimen hasil cetak 3DP berbasis SLA. Nilai kekerasan spesimen tertinggi didapatkan pada *build orientation* 0°.

5. Daftar Pustaka

- [1] M Pérez, D Carou, E M Rubio, and R Teti “Current advances in additive manufacturing,” *Procedia CIRP* vol 88 pp 439–444 2020 doi: 10.1016/j.procir.2020.05.076
- [2] Özdilli Özgür “Comparison of the Surface Quality of the Products Manufactured by the Plastic Injection Molding and SLA and FDM Method” *Uluslararası Muhendis Arastirma ve Gelistirme Derg* no June pp 428–437 Jun 2021 doi: 10.29137/umagd.762942
- [3] B Arifvianto *et al* “Sliding wear characteristics of FDM-processed polylactic-acid in bovine blood serum” *J Mech Eng Sci* vol 13 no 4 pp 5848–5861 2019 doi: <https://doi.org/10.15282/jmes.13.4.2019.10.0466>
- [4] B Arifvianto, Y B Wirawan, U A Salim, S Suyitno, and M Mahardika “Effects of extruder temperatures and raster orientations on mechanical properties of the FFF-processed polylactic-acid (PLA) material” *Rapid Prototyp J* vol 27 no 10 pp 1761–1775 2021 doi: 10.1108/RPJ-10-2019-0270
- [5] M Asif *et al* “A new photopolymer extrusion 5-axis 3D printer,” *Addit Manuf* vol 23 no June pp 355–361 Oct 2018 doi: 10.1016/j.addma.2018.08.026
- [6] D G Bekas, Y Hou, Y Liu, and A Panesar “3D printing to enable multifunctionality in polymer-based composites: A review” *Compos Part B Eng* vol 179 no September p 107540 Dec 2019 doi: 10.1016/j.compositesb.2019.107540
- [7] N Shahrubudin, T C Lee, and R Ramlan “An overview on 3D printing technology: Technological, materials, and applications,” *Procedia Manuf* vol 35 pp 1286–1296 2019 doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.089
- [8] J Kruth, P Mercelis, J Van Vaerenbergh, L Froyen, and M Rombouts “Binding mechanisms in selective laser sintering and selective laser melting” *Rapid Prototyp J* vol 11 no 1 pp 26–36 Feb 2005 doi: 10.1108/13552540510573365
- [9] B Mueller and D Kochan “Laminated object manufacturing for rapid tooling and patternmaking in foundry industry” *Comput Ind* vol 39 no 1 pp 47–53 Jun 1999 doi: 10.1016/S0166-3615(98)00127-4
- [10] M H Too *et al* “Investigation of 3D Non-Random Porous Structures by Fused Deposition Modelling,” *Int J Adv Manuf Technol* vol 19 no 3 pp 217–223 Feb 2002 doi: 10.1007/s001700200016
- [11] J Pratama *et al* “A review on reinforcement methods for polymeric materials processed using fused filament fabrication (FFF)” *Polymers (Basel)* vol 13 no 22 pp 1–25 2021 doi: 10.3390/polym13224022
- [12] M Gurr and R Mühlaupt “Rapid Prototyping” in *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* no March 2015 Elsevier 2016 pp 1–27

- [13] Y-G Jeong, W-S Lee and K-B Lee “Accuracy evaluation of dental models manufactured by CAD/CAM milling method and 3D printing method” *J Adv Prosthodont* vol 10 no 3 p 245 2018 doi: 10.4047/jap.2018.10.3.245
- [14] B Vieira Magaldi, M de Oliveira da Costa Maia Pinto, R Thiré, and A C Araujo “Comparison of the porosity of scaffolds manufactured by two additive manufacturing technologies: SLA and FDM” 2017 doi: 10.26678/ABCM.COBEM2017.COB17-1460
- [15] H Gebhardt *Additive Manufacturing /3D Printing* vol 35 no 3 2014
- [16] S Singh and S Ramakrishna “Biomedical applications of additive manufacturing: Present and future” *Curr Opin Biomed Eng* vol 2 pp 105–115 Jun 2017 doi: 10.1016/j.cobme.2017.05.006
- [17] Z-X Low, Y T Chua, B M Ray, D Mattia, I S Metcalfe, and D A Patterson “Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques” *J Memb Sci* vol 523 no May 2016 pp 596–613 Feb 2017 doi: 10.1016/j.memsci.2016.10.006
- [18] J Frketic, T Dickens, and S Ramakrishnan “Automated manufacturing and processing of fiber-reinforced polymer (FRP) composites: An additive review of contemporary and modern techniques for advanced materials manufacturing” *Addit Manuf* vol 14 pp 69–86 Mar 2017 doi: 10.1016/j.addma.2017.01.003
- [19] R B S Gowda, C S Udayagiri, and D D Narendra “Studies on the Process Parameters of Rapid Prototyping Technique (Stereolithography) for the Betterment of Part Quality” *Int J Manuf Eng* vol 2014 pp 1–11 Dec 2014 doi: 10.1155/2014/804705
- [20] G Hu *et al* “Optimizing the hardness of SLA printed objects by using the neural network and genetic algorithm” *Procedia Manuf* vol 38 no Faim 2019 pp 117–124 2019 doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.016
- [21] R Harris, N Hopkinson, H Newlyn, R Hague, and P Dickens “Layer thickness and draft angle selection for stereolithography injection mould tooling” *Int J Prod Res* vol 40 no 3 pp 719–729 Jan. 2002 doi: 10.1080/00207540110091875
- [22] K Chockalingam, N Jawahar, and U Chandrasekhar “Influence of layer thickness on mechanical properties in stereolithography” *Rapid Prototyp J* vol 12 no 2 pp 106–113 Mar 2006 doi: 10.1108/13552540610652456
- [23] C Arnold, D Monsees, J Hey, and R Schweyen “Surface Quality of 3D-Printed Models as a Function of Various Printing Parameters” *Materials (Basel)* vol 12 no 12 p 1970 Jun 2019, doi: 10.3390/ma12121970
- [24] D Seprianto, R Sugiantoro, Siproni, Yahya, and M Erwin “The Effect of Rectangular Parallel Key Manufacturing Process Parameters Made with Stereolithography DLP 3D Printer Technology Against Impact Strength” *J Phys Conf Ser* vol 1500 no 1 2020 doi: 10.1088/1742-6596/1500/1/012028
- [25] G-S Park, S-K Kim, S-J Heo, J-Y Koak, and D-G Seo “Effects of Printing Parameters on the Fit of Implant-Supported 3D Printing Resin Prosthetics” *Materials (Basel)* vol 12 no 16 p 2533 Aug 2019 doi: 10.3390/ma12162533
- [26] S M You, S G You, S Y Kang, S Y Bae, and J H Kim “Evaluation of the accuracy (trueness and precision) of a maxillary trial denture according to the layer thickness: An in vitro study” *J Prosthet. Dent* vol 125 no 1 pp 139–145 2021 doi: 10.1016/j.prosdent.2019.12.014
- [27] B Nowacki, P Kowol, M Koziol, P Olesik, J Wiczorek, and K Waclawiak “Effect of post-process curing and washing time on mechanical properties of mslaprintouts” *Materials (Basel)* vol 14 no 17 pp 1–13 2021 doi: 10.3390/ma14174856
- [28] S Aati *et al* “Effect of post-curing light exposure time on the physico-mechanical properties and cytotoxicity of 3D-printed denture base material” *Dent Mater* vol 38 no 1 pp 57–67 2022 doi: 10.1016/j.dental.2021.10.011
- [29] Ł Dżadz and B Pszczółkowski “Analysis of the influence of UV light exposure time on hardness and density properties of SLA models” *Tech Sci* vol 23 no 2020 pp 175–184 2020 doi: 10.31648/ts.6119
- [30] N Shaec and W Wang “UV Resin; Safety Data Sheet (SDS)” no 453 pp 1–8, 2015 [Online] Available: <https://cdn.website-editor.net/77957cc2bab9412e863746d91116db70/files/uploaded/MDS.PDF>

- [31] ASTM International “Standard Test Method for Rubber Property - Durometer Hardness” vol 05 no Reapproved pp 1–13 2010 doi: 10.1520/D2240-15.2
- [32] M Kurimoto, Y Manabe, S Mitsumoto, and Y Suzuok, “Layer interface effects on dielectric breakdown strength of 3D printed rubber insulator using stereolithography” *Addit Manuf* vol 46 no March p 102069 Oct 2021 doi: 10.1016/j.addma.2021.102069
- [33] N Alharbi, R Osman, and D Wismeijer “Effects of build direction on the mechanical properties of 3D-printed complete coverage interim dental restorations” *J Prosthet Dent* vol 115 no 6 pp 760–767 2016 doi: 10.1016/j.prosdent.2015.12.002
- [34] D Kim *et al* “Effects of Post-Curing Time on the Mechanical and Color Properties of Three-Dimensional Printed Crown and Bridge Materials” *Polymers (Basel)* vol 12 no 11 p 2762 Nov 2020 doi: 10.3390/polym12112762

