



Perubahan Morfologik dan Kekasaran Permukaan Implan Gigi *Ti-Alloy* Dipengaruhi oleh Perbedaan Tekanan *Sandblasting TiO₂*

Morphologic Changes and Surface Roughness of Ti-Alloy Dental Implants Affected by Differences in TiO₂ Sandblasting Pressure

Albert,¹ Beverly C. Hamidjaja,² Trijani Suwandi,¹ Lia H. Andayani³

¹Departemen Periodonti Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Trisakti, Jakarta, Indonesia

²Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Trisakti, Jakarta, Indonesia

³Departemen Ilmu Kesehatan Gigi Masyarakat dan Pencegahan Fakultas Kedokteran Gigi Universitas Trisakti, Jakarta, Indonesia

Email: Albert@trisakti.ac.id

Received: February 12, 2025; Accepted: November 19, 2025; Published online: January 5, 2026

Abstract: This study aimed to examine the morphological changes and surface roughness of titanium alloy dental implants affected by variations in TiO₂ sandblasting pressure in the SA technique. A laboratory experimental study was conducted using 25 titanium alloy samples measured 10x10x2mm began with pre-treatment surface roughness testing. Sandblasting with TiO₂ was then performed at different pressures: no sandblasting (negative control), 500 kPa, 600 kPa, 700 kPa, and 800 kPa for 20 seconds, 20 mm distance, and 90° angle. Acid etching with 98% H₂SO₄ was carried out at 60°C for 60 minutes. Post-treatment surface roughness was measured and morphological changes were observed. The normality test was carried out using the Shapiro-Wilk test, then One-Way ANOVA statistical test was performed to evaluate the significance of the difference in Ra between groups. The results showed that the no-sandblasting group had a significantly lower surface roughness value than the sandblasted groups. SEM results revealed uniform morphology in sandblasted groups, and the 500 kPa group resulted in the deepest and most homogeneous porosity. In conclusion, variations in TiO₂ sandblasting pressure affect the morphology and surface roughness of titanium alloy, with 500 kPa providing the most optimal results for roughness and morphology.

Keywords: surface roughness; surface morphology; osseointegration; sandblasting pressure; TiO₂

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk melihat perubahan morfologi dan kekasaran permukaan implan gigi *titanium alloy* yang dipengaruhi oleh variasi tekanan *sandblasting TiO₂* dalam teknik SA. Studi eksperimental laboratorium dilakukan menggunakan 25 sampel *titanium alloy* berukuran 10x10x2 mm, diawali dengan pengujian kekasaran permukaan sebelum perlakuan. *Sandblasting TiO₂* dilakukan dengan tekanan berbeda-beda: tanpa *sandblasting* (kontrol negatif), 500 kPa, 600 kPa, 700 kPa, dan 800 kPa selama 20 detik, jarak 20 mm, dan sudut 90°. *Acid etching* dengan H₂SO₄ 98% dilakukan pada 60°C selama 60 menit. Kekasaran permukaan setelah perlakuan diukur serta perubahan morfologik. Uji normalitas dilakukan dengan uji Shapiro-Wilk, kemudian uji statistik One-Way ANOVA dilakukan untuk melihat signifikansi perbedaan Ra antar kelompok. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa kelompok tanpa *sandblasting* memiliki nilai kekasaran lebih rendah secara bermakna dibandingkan kelompok dengan *sandblasting*. Hasil SEM menunjukkan morfologi seragam pada kelompok *sandblasting*, dengan kelompok 500 kPa menghasilkan porositas terdalam dan paling homogen. Simpulan penelitian ini ialah variasi tekanan *sandblasting TiO₂* memengaruhi morfologi dan kekasaran permukaan *titanium alloy*, dengan tekanan 500 kPa memberikan hasil paling optimal dalam hal kekasaran dan morfologi.

Kata kunci: kekasaran permukaan; morfologi permukaan; osseointegrasi; tekanan *sandblasting*; TiO₂

PENDAHULUAN

Kualitas hidup manusia salah satunya ditentukan oleh kesehatan gigi dan mulut. Berdasarkan laporan dari Riset Kesehatan Dasar (Riskesdas) tahun 2018, masyarakat Indonesia yang mengalami kehilangan gigi mencapai angka 19%.¹ Kehilangan gigi akan menyebabkan gangguan pada fungsi mastikasi, fonetik, dan estetika sehingga berakibat buruk bagi penderitanya. *World Health Organization* (WHO) mengatakan bahwa dibutuhkan 20-21 gigi dalam kondisi baik pada pasien dewasa untuk mempertahankan nutrisi dan diet yang baik.²

Salah satu perawatan untuk mengatasi kehilangan gigi adalah implan gigi. Implan gigi merupakan suatu bahan biomaterial yang dimasukkan ke dalam jaringan periodontal untuk mencapai tujuan fungsional maupun estetika.³ Struktur implan dibagi menjadi tiga bagian, yaitu *fixture*, *abutment*, dan *crown*. *Fixture* atau badan implan merupakan infrastruktur yang ditanam ke dalam tulang alveolar sebagai penyangga untuk menyalurkan tekanan oklusal ke daerah sekitarnya. *Abutment* sebagai mesostruktur dipakai sebagai dudukan di bawah *crown* untuk menghubungkan antara *fixture* dengan *crown*. *Crown* atau suprastruktur merupakan hasil restorasi yang menggantikan mahkota gigi pasien.⁴ Kelebihan implan ialah memiliki estetika yang baik, meminimalisir resorpsi tulang, dan tidak perlu dilakukan preparasi pada gigi tetangga sehingga mengurangi resiko hipersensitivitas dentin akibat preparasi.⁵

Titanium merupakan logam yang unik dan telah dipakai cukup lama untuk merekonstruksi berbagai macam defek tulang, termasuk sebagai implan gigi.⁶ Titanium memiliki kekuatan yang baik, modulus elastisitas dan berat jenis rendah, mampu bertahan dalam kurun waktu lama, tidak toksik, tidak memicu alergi, dapat dicampur dengan logam lain, dan memiliki sifat osseointegrasi dan biokompatibilitas yang baik.⁷ Setelah 30 milidetik titanium secara spontan dapat membentuk suatu lapisan *oxide layer* yang bersifat stabil dan mampu menahan ion-ion logam agar tidak bereaksi dengan jaringan tubuh dan bersifat stabil sehingga tidak mudah larut. Lapisan ini mengurangi resiko korosi dan dapat melakukan *self healing* apabila terjadi kerusakan.³ Titanium yang dipakai untuk implan gigi saat ini ialah *titanium grade V* (Ti-6Al-4V). Jenis titanium ini memiliki kandungan titanium sebanyak 90% dan dicampur dengan beberapa logam lainnya seperti 6% aluminium, 4% vanadium, dan 0,25% besi.⁷ Aluminium berperan untuk meningkatkan kekuatan dan menurunkan berat titanium, vanadium berperan sebagai pengikat aluminium agar terhindar dari pembentukan senyawa Ti-Al yang menyebabkan korosi.³

Implan yang ditanam ke dalam jaringan pendukung gigi tidak dilapisi oleh ligamen, tulang rawan, maupun jaringan parut antara titanium dengan tulang sehingga dibutuhkan osseointegrasi yang baik pada implan gigi. Osseointegrasi didefinisikan sebagai kontak langsung yang baik secara struktural maupun fungsional antara tulang dan implan tanpa memengaruhi jaringan lunak. Perlekatan sel pada implan gigi terjadi pada tingkat kekasaran permukaan titanium sekitar 0,5-1,5 μm .^{8,9} Setelah terpasangnya implan pada rongga mulut, maka akan terbentuk jaringan peri implan yang merupakan jaringan periodontal tanpa adanya ligamen periodontal yang melapisi diantara implan dengan tulang alveolar.¹⁰ Kontak langsung tersebut harus dipertahankan dengan baik agar tidak terjadi kegagalan perawatan kehilangan gigi. Osseointegrasi berperan penting dalam mempertahankan perlekatan implan gigi dengan tulang alveolar.¹¹ Faktor-faktor yang dapat memengaruhi osseointegrasi ialah desain implan, kekasaran permukaan implan, dan kualitas tulang alveolar.¹²

Osseointegrasi dapat ditingkatkan dengan adanya modifikasi permukaan implan, salah satunya adalah *sandblasting*. Teknik *sandblasting* merupakan penyemprotan partikel abrasif yang dapat mengubah topografi dan meningkatkan nilai kekasaran permukaan implan gigi. Hasil *sandblasting* dipengaruhi oleh ukuran partikel, tekanan, dan jarak *sandblasting*.¹³ Salah satu partikel terbaru yang dipakai untuk *sandblasting* adalah TiO_2 . Partikel TiO_2 dianggap sebagai bahan yang aman dan tidak memberi dampak buruk pada tubuh manusia. TiO_2 seringkali dijadikan sebagai bahan alternatif Al_2O_3 karena residu partikel Al_2O_3 seringkali tertinggal pada permukaan implan sehingga dapat mengganggu osseointegrasi, sedangkan residu partikel TiO_2 tidak mengganggu osseointegrasi.¹⁴ Proses *sandblasting* seringkali dilanjutkan dengan *acid etching*

untuk menambah kekasaran permukaan implan gigi dan untuk menghilangkan kontaminasi partikel *sandblasting* sehingga mendapatkan permukaan yang bersih dan homogen.¹⁵ Penelitian ini bertujuan untuk melihat perubahan nilai kekasaran permukaan atau *average roughness* (Ra) dan morfologi permukaan *titanium alloy* akibat adanya perbedaan tekanan *sandblasting* TiO_2 .

METODE PENELITIAN

Penelitian diawali dengan persiapan 25 plat *titanium alloy* (Ti-6Al-4V) berukuran 10x10x2 mm. Sampel *titanium alloy* dibagi menjadi lima kelompok, yaitu: Kelompok I: Sampel tanpa perlakuan *sandblasting* (kontrol negatif); Kelompok II: Sampel yang diberi perlakuan *sandblasting* TiO_2 pada tekanan 500 kPa; Kelompok III: Sampel yang diberi perlakuan *sandblasting* TiO_2 pada tekanan 600 kPa; Kelompok IV: Sampel yang diberi perlakuan *sandblasting* TiO_2 pada tekanan 700 kPa; Kelompok V: Sampel yang diberi perlakuan *sandblasting* TiO_2 pada tekanan 800 kPa.

Kekasaran permukaan awal setiap sampel diukur sebelum perlakuan *sandblasting* menggunakan *surface roughness tester*. Rerata kekasaran permukaan (Ra) dicatat dari tiga area berbeda pada setiap sampel untuk memperoleh nilai kekasaran secara umum pada setiap sampel sebelum diberi perlakuan.

Partikel *sandblasting* ditembakkan ke seluruh permukaan setiap sampel selama 20 detik dari jarak 20 mm pada sudut 90°, dengan tekanan yang sesuai dengan empat kelompok perlakuan. Setelah perlakuan *sandblasting*, setiap sampel disimpan secara terpisah dalam botol kaca vial. Botol yang berisi sampel kemudian diisi dengan larutan H_2SO_4 yang sudah dipanaskan pada suhu 60°C hingga sampel terendam sepenuhnya. Sampel direndam selama 60 menit pada suhu 60°C dalam oven. Setelah 60 menit, larutan H_2SO_4 dikeluarkan dari botol kemudian dibilas dengan akuades selama 1 menit dengan 5x pengulangan. Sampel kemudian ditempatkan dalam inkubator pada suhu 37°C hingga benar-benar kering.

Kekasaran permukaan setiap sampel diukur menggunakan penguji kekasaran permukaan setelah menjalani *sandblasting* dan *acid etching* (SA). Prosedur pengukuran mengikuti langkah-langkah yang sama seperti pengukuran kekasaran permukaan awal sebelum perlakuan. Dua sampel dari setiap kelompok perlakuan diamati menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM) dan dilakukan analisis terhadap morfologi permukaan *titanium alloy* tersebut. Morfologi permukaan sampel diamati pada perbesaran 500x, 1000x, dan 5000x.

Hasil data uji SEM disajikan secara deskriptif. Uji normalitas untuk data kekasaran permukaan (Ra) dilakukan menggunakan Uji Shapiro-Wilk. Uji One-Way ANOVA kemudian dilakukan untuk mengetahui perbedaan bermakna di antara kelompok perlakuan.

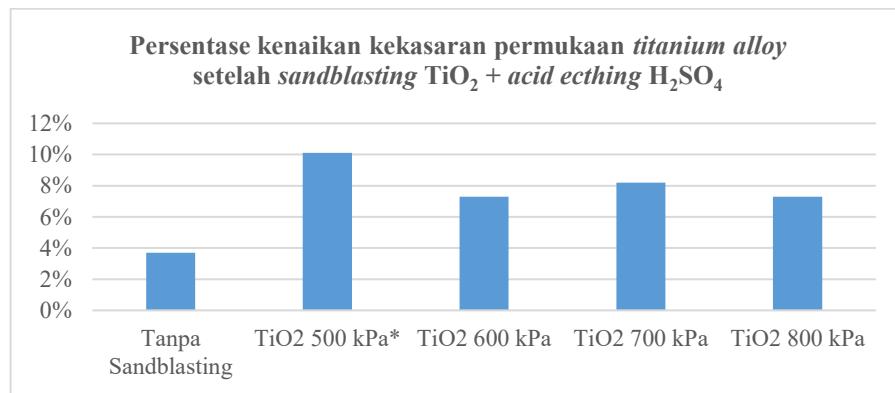
HASIL PENELITIAN

Tabel 1 memperlihatkan bahwa kekasaran permukaan pada kelompok I (tanpa *sandblasting*) memiliki nilai yang jauh lebih rendah dibandingkan kelompok lainnya yang diberikan perlakuan *sandblasting*. Selain itu, nilai kekasaran permukaan pada kelompok *sandblasting* dengan tekanan 500 kPa menghasilkan nilai Ra tertinggi dibandingkan kelompok lainnya.

Tabel 1. Perubahan nilai Ra pada kelompok sebelum dan sesudah perlakuan

Kelompok perlakuan	Rerata ± Simpangan Baku (μm)	
	Sebelum perlakuan	Setelah perlakuan
1 Tanpa <i>Sandblasting</i>	1,09 ± 0,05	1,13 ± 0,06
2 TiO_2 500 kPa + H_2SO_4 98%	1,09 ± 0,03	1,20 ± 0,04
3 TiO_2 600 kPa + H_2SO_4 98%	1,09 ± 0,07	1,17 ± 0,07
4 TiO_2 700 kPa + H_2SO_4 98%	1,10 ± 0,06	1,19 ± 0,05
5 TiO_2 800 kPa + H_2SO_4 98%	1,10 ± 0,04	1,18 ± 0,05

Gambar 1 memperlihatkan persentase kenaikan Ra setiap kelompok. Peningkatan kekasaran permukaan terendah terjadi pada kelompok tanpa *sandblasting*, sedangkan kekasaran permukaan tertinggi pada kelompok *sandblasting* dengan tekanan 500 kPa. Perbedaan persentase kenaikan kekasaran permukaan pada kelompok tanpa *sandblasting* juga sangat bermakna dibandingkan kelompok dengan *sandblasting*.



Gambar 1. Persentase kenaikan Ra pada setiap kelompok

Morfologi permukaan setiap sampel dilihat menggunakan *Scanning Electron Microscope* (SEM). Tabel 2 memperlihatkan hasil uji SEM yang menunjukkan adanya perbedaan topografi setiap kelompok pada perbesaran 500x, 1000x, dan 5000x. Perbedaan kekasaran permukaan setiap kelompok dapat dilihat dari perbedaan tingkat kontras hasil uji SEM. Perbedaan topografi permukaan juga dapat dilihat dari bentuk porositas dan tingkat kedalaman ceruk-ceruk yang terbentuk pada permukaan sampel.

BAHASAN

Hasil penelitian menunjukkan bahwa persentase kenaikan Ra terendah terdapat pada kelompok tanpa *sandblasting* (3,7%). Kelompok dengan penambahan perlakuan *sandblasting* menunjukkan kenaikan persentase nilai Ra yang jauh lebih tinggi jika dibandingkan dengan kelompok tanpa *sandblasting* (Gambar 1). Hal ini membuktikan bahwa perlakuan *sandblasting* dapat meningkatkan osseointegrasi implan gigi jauh lebih tinggi dibandingkan tanpa *sandblasting*.

Persentase kenaikan tertinggi terjadi pada kelompok *sandblasting* dengan tekanan 500 kPa (10,1%). Setelah kelompok perlakuan ini, terjadi penurunan kenaikan Ra, yaitu pada kelompok *sandblasting* dengan tekanan 700 kPa (8,2%). Kelompok perlakuan *sandblasting* dengan tekanan 600 kPa dan 800 kPa memiliki persentase kenaikan Ra terendah jika dibandingkan dengan semua kelompok dengan perlakuan *sandblasting* (7,3%), walaupun angka ini masih jauh lebih tinggi dibandingkan kelompok tanpa *sandblasting*. Hal ini menunjukkan bahwa kelompok perlakuan *sandblasting* dengan tekanan 500 kPa menghasilkan kekasaran permukaan tertinggi yang dapat membantu dalam meningkatkan osseointegrasi dan proliferasi sel pada permukaan *titanium alloy* sebagai bahan dasar implan gigi.

Hasil uji SEM menunjukkan bahwa sampel *pre-test* yang tidak diberi perlakuan apapun memperlihatkan permukaan yang halus, poros minimal, dan hanya terdapat ceruk-ceruk kecil yang tidak merata. Pada kelompok tanpa *sandblasting* yang hanya diberi perlakuan *acid etching* 98% menunjukkan permukaan yang lebih kasar dibandingkan kelompok *pre-test*. Hal ini dapat dilihat dengan adanya permukaan yang berporos sebagian dan ceruk yang lebih dalam dibandingkan kelompok *pre-test* (Tabel 2). Gambaran permukaan yang lebih kontras menunjukkan adanya permukaan semakin tidak merata dan terdapat perbedaan kedalaman yang lebih besar.

Kelompok *sandblasting* TiO₂ 500 kPa menunjukkan gambaran yang berporos sepenuhnya dengan bentuk poros yang bulat dan homogen sehingga terdapat peningkatan kekasaran permukaan pada sampel secara keseluruhan.

Tabel 2. Perbedaan morfologi permukaan pada setiap kelompok perlakuan

Perlakuan	Perbesaran 500x	Perbesaran 1000x	Perbesaran 5000x
Pre-test			
Tanpa sandblasting			
TiO_2 500 kPa			
TiO_2 600 kPa			
TiO_2 700 kPa			
TiO_2 800 kPa			

Selain itu, kelompok ini menunjukkan adanya tingkat kontras yang paling tinggi dibandingkan kelompok lainnya dengan warna gambar yang paling terang. Kelompok *sandblasting* TiO_2 600 kPa memiliki hasil yang serupa dengan kelompok *sandblasting* TiO_2 500 kPa, namun kelompok ini menunjukkan tingkat kontras yang lebih rendah. Hal ini ditunjukkan dengan adanya warna gambar yang kurang terang sehingga terdapat penurunan tingkat kekasaran permukaan pada kelompok ini sehingga menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan *sandblasting* yang diberikan pada sampel tidak berarti kekasaran permukaan sampel pasti akan semakin tinggi.¹⁶

Kelompok *sandblasting* TiO_2 700 kPa juga memiliki gambaran serupa dengan kelompok *sandblasting* TiO_2 600 kPa, namun kelompok ini memiliki tingkat kontras yang sedikit lebih tinggi jika dibandingkan dengan kelompok *sandblasting* TiO_2 600 kPa sehingga kekasaran permukaannya lebih tinggi. Pada kelompok *sandblasting* TiO_2 800 kPa terjadi perubahan morfologi pada permukaan sampel kelompok ini dibandingkan kelompok *sandblasting* TiO_2 500

kPa, 600 kPa, dan 700 kPa. Pada perbesaran 1000x dapat dilihat bahwa permukaan sampel memiliki tingkat kontras yang tidak merata dengan porus yang irreguler. Pada perbesaran 5000x semakin jelas menunjukkan bahwa permukaan yang dihasilkan pada perlakuan ini tidak memiliki kedalaman yang sama dan sangat tidak beraturan. Hal ini dapat terjadi karena adanya deformasi yang berlebihan akibat tekanan yang terlalu tinggi sehingga merusak permukaan *titanium alloy* secara berlebihan dan berdampak buruk bagi keberhasilan osseointegrasi.¹⁶

Tingkat kekasaran permukaan dan morfologi permukaan yang dihasilkan pada penelitian ini menunjukkan bahwa semakin tinggi tekanan *sandblasting* yang digunakan akan terjadi peningkatan kekasaran permukaan pada *titanium alloy* (Ti-6Al-4V), namun pada titik tertentu akan terjadi penurunan kekasaran permukaan sehingga perlu mengetahui tekanan yang paling optimal untuk menghasilkan kekasaran permukaan yang paling tinggi pada Ti-6Al-4V.¹⁶ Maka dari itu, penelitian ini telah menunjukkan bahwa tekanan paling optimal untuk perlakuan *sandblasting* adalah pada tekanan 500 kPa.

SIMPULAN

Perbedaan tekanan *sandblasting* TiO_2 berpengaruh pada nilai kekasaran dan morfologi permukaan *titanium alloy*, dengan tekanan 500 kPa memberikan nilai kekasaran tertinggi dan morfologi permukaan yang homogen sehingga baik untuk osseointegrasi. Saran untuk penelitian ini adalah dibutuhkannya uji biokompatibilitas *titanium alloy* untuk mengetahui tingkat perlekatan dan proliferasi sel yang terjadi disekitar *titanium alloy* sebagai bahan dasar implan gigi.

Konflik Kepentingan

Penulis menyatakan tidak ada konflik kepentingan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

1. Marthinu LT, Bidjuni M. Penyakit karies pada personil Detasemen Gegana Satuan Brimob Polda Sulawesi Utara tahun 2019. *JIGIM* (Jurnal Ilm Gigi dan Mulut). 2020;3(2):58–64. Doi: 10.47718/jgm.v3i2.1436
2. Campos FL, Rodrigues LG, Campos JR, Rhodes GAC, Moraes GF, Chalub LLFH, et al. Association between shortened dental configurations and health outcomes: a scoping review. *BMC Oral Health*. 2024;24(1):1–19. Available from: <https://doi.org/10.1186/s12903-023-03714-4>
3. Handoko SA. Dental Implant: a literature review. Denpasar: Progr Stud Sarj Kedokt Gigi Dan Profesi Dr Gigi Fak Kedokt Univ Udayana. 2022; Available from: <https://www.scribd.com/document/657505507/6011e271bde731af1c2bf1468b63d004>
4. Nilawati N. Pengenalan Implan Gigi: Teori Singkat dan Praktik Sederhana (1st ed). Mulawarmanti D, editor. Bandung: Indonesia Emas Group; 2024. p. 1–126.
5. Ananda N, Dwi Sulistyani L, Bachtiar WE. Pertimbangan penggunaan implan gigi pada lansia. *Insisiva Dent J Maj Kedokteran Gigi Insisiva*. 2017;6(1):47–55. Doi: 10.18196/di.6181
6. Leni D, Gunawarman, Affi J, Yetri Y. Laju oksidasi titanium murni (Cpti Grade Tipe 340) berlapis hydroxyapatite (Ha) yang disinter dalam tungku perlakuan panas. *Met J Sist Mek dan Termal*. 2019;3(1):46–50. Doi: <https://doi.org/10.25077/metal.3.1.46-50.2019>
7. Fitriani CY, Wibawa A. Biokompatibilitas material titanium implan gigi. *Insisiva Dent J Maj Kedokt Gigi Insisiva*. 2019;8(2):53–8. Doi: <https://doi.org/10.18196/10.18196/di.8208>
8. Chakravorty N, Jaiprakash A, Ivanovski S, Xiao Y. Implant surface modifications and osseointegration. Springer Ser Biomater Sci Eng. 2016;8:107–31. Available from: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-53574-5_4
9. Yadav S, Upadhyay M, Roberts WE. Biomechanical and histomorphometric properties of four different mini-implant surfaces. *Eur J Orthod*. 2015;37(6):627–35. Doi: 10.1093/ejo/cju097
10. Zafira AL. Modifikasi Permukaan titanium implan secara kimia dalam meningkatkan proses osseointegrasi pada perawatan implan [Skripsi]. Makassar: Universitas Hasanuddin; 2023.
11. Rifai Y. Osseointegrasi pada perawatan implan gigi dengan penambahan platelet rich plasma [Tesis]. Makassar: Universitas Hasanuddin; 2022.
12. Mangal K, Dhamande MM, Sathe S, Godbole S, Patel RM. An overview of the implant therapy: The esthetic approach. *Int J Curr Res Rev*. 2021;13(2):106–12. Doi: 10.31782/IJCR.2021.13209
13. Yuda AW, Supriadi S, Saragih AS. Surface modification of Ti-alloy based bone implant by sandblasting. AIP

- Conf Proc. 2019;2193(020015):1–8. Doi: <https://doi.org/10.1063/1.5139335>
- 14. Yurtutan ME KA. Evaluation of the effects of different sand particles that used in dental implant roughened for osseointegration. *BMC Oral Health*. 2018;18(1):1–8. Doi: 10.1186/s12903-018-0509-3
 - 15. Hung KY, Lin YC FH. The effects of acid etching on the nanomorphological surface characteristics and activation energy of titanium medical materials. *Materials (Basel)*. 2017;10(10):1164. Doi: 10.3390/ma10101164
 - 16. Begg H, Riley M, de Villiers Lovelock H. Mechanization of the Grit blasting process for thermal spray coating applications: a parameter study. *J Therm Spray Technol*. 2016;25(1–2):12–20. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11666-015-0324-1>