

SIMULASI KOMPUTASI BANTALAN $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-ON-Si}_3\text{N}_4$ PADA TOTAL HIP PROSTHESIS DENGAN VARIASI RADIAL CLEARANCE

Kevin Togatorop^{1*}, Budi Setiyana², Mohammad Tauviquirrahman²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Soedarto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*Email : kevintogatorop6@gmail.com

Abstrak

Sejumlah studi sebelumnya mengenai total hip prosthesis telah menitikberatkan pada pengaruh jenis material, penerapan permukaan bertekstur, penggunaan pelapis, serta aspek desain dan geometri komponen. Faktor-faktor tersebut umumnya dianalisis berdasarkan parameter kekuatan, seperti tekanan kontak dan sejenisnya. Meski begitu, kajian yang mengevaluasi kinerja bantalan total hip prosthesis menggunakan parameter kekuatan yang lebih rinci dengan pendekatan dan kriteria berbeda masih terbatas. Penelitian ini menyajikan analisis mekanika kontak yang mencakup tekanan kontak, tegangan von Mises, deformasi, dan tegangan Tresca untuk total hip prosthesis berbahan $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-ON-Si}_3\text{N}_4$. Model elemen hingga dua dimensi dikembangkan untuk mendukung proses analisis tersebut. Simulasi numerik dilakukan dengan menerapkan beban fisiologis yang sesuai, seperti yang dialami sendi panggul manusia saat berjalan normal. Dengan memvariasikan ketebalan radial clearance, diperoleh perbedaan nilai parameter mekanika kontak, di mana peningkatan nilai radial clearance menyebabkan peningkatan nilai-nilai dari mekanika kontak tersebut.

Kata Kunci: metode elemen hingga; mekanika kontak; *total hip prosthesis*

Abstract

Previous studies on total hip prostheses have primarily focused on the effects of material type, surface texturing, coatings, and component design and geometry. These factors are generally analyzed based on strength-related parameters, such as contact pressure and similar metrics. However, studies that evaluate the performance of total hip prosthesis bearings using more detailed mechanical parameters and alternative evaluation approaches remain limited. This study presents a contact mechanics analysis that includes contact pressure, von Mises stress, deformation, and Tresca stress for a total hip prosthesis made of $\text{Si}_3\text{N}_4\text{-ON-Si}_3\text{N}_4$. A two-dimensional finite element model was developed to support this analysis. Numerical simulations were conducted by applying physiological loads that represent the actual conditions experienced by the human hip joint during normal walking. The simulation results indicate that variations in radial clearance significantly affect contact mechanics parameters, where increasing radial clearance leads to higher contact pressure, stress, and deformation within the prosthetic system..

Keywords: *Contact Mechanics; Finite Element Method (FEM); total hip prosthesis*

1. Pendahuluan

Operasi penggantian pada total hip replacement saat ini dianggap sebagai tindakan bedah yang sangat efektif untuk mengatasi peradangan pada sendi pinggul [4][10][9]. Salah satu elemen penting dalam prosedur ini yang perlu dianalisis guna mengurangi risiko kegagalan implan adalah komponen coupling, yang berfungsi sebagai titik artikulasi untuk memungkinkan berbagai gerakan pengguna implan. Dalam konteks ini, pemilihan material untuk coupling memegang peranan penting dalam meningkatkan performa sistem secara keseluruhan [1].

Jenis pasangan bantalan yang umum digunakan dalam prosedur pelapisan ulang sendi pinggul mencakup metal-on-metal, metal-on-polymer, ceramic-on-ceramic, dan hard-on-hard. Meskipun demikian, berbagai faktor seperti penuaan, kesalahan desain, penggunaan instrumen yang kurang tepat, tingkat keausan yang tinggi, serta pelepasan ion logam dapat menyebabkan degradasi tulang (osteolisis) yang berujung pada kelonggaran aseptik. Meskipun pasangan logam-ke-logam menunjukkan tingkat keausan volumetrik yang lebih rendah, pelepasan ion logam tetap menjadi penyebab utama peradangan dan kelonggaran aseptik [14]. Situasi ini mendorong riset untuk menemukan material baru yang memiliki biokompatibilitas tinggi dan sifat biodegradabel.

Salah satu kandidat material tersebut adalah silikon nitrida (Si_3N_4), yang menunjukkan tingkat keausan sebanding

dengan pasangan bantalan alumina (Al_2O_3). Karakteristik mekaniknya, seperti kekuatan lentur, modulus Weibull, dan ketangguhan retak, memperlihatkan stabilitas jangka panjang di bawah beban kompleks, sekaligus mendukung pertumbuhan jaringan tulang [5]. Selain itu, Si_3N_4 tidak menimbulkan efek sitotoksik, mampu bertahan terhadap tekanan mekanis, dan memiliki sifat fisikokimia yang mendukung aplikasinya dalam bidang medis [11]. Hasil uji keausan menunjukkan bahwa permukaan bantalan Si_3N_4 tetap halus dan mengilap setelah pengujian, sehingga menghasilkan koefisien gesek yang rendah [8]. Oleh karena itu, material ini berpotensi menjadi alternatif untuk penggantian sendi pinggul. Namun, uji in-vitro untuk mengevaluasi karakteristik material secara rinci sering kali memerlukan waktu lama dan biaya yang besar [5].

Metode elemen hingga telah banyak dimanfaatkan oleh peneliti sebagai alat komputasi yang andal dalam menganalisis tekanan kontak, karena mampu mengurangi biaya tinggi serta mempercepat waktu penelitian dibandingkan dengan pengujian dan studi laboratorium secara langsung [9]. Meskipun metode ini menawarkan berbagai keunggulan, masih banyak penelitian yang menggunakannya dengan pendekatan model dan kondisi pembebanan yang disederhanakan. Dalam studi mengenai artroplastik total pinggul, misalnya, Basri et al. (2019) dan Ammarullah et al. (2021)[7][2] menggunakan metode elemen hingga untuk mengevaluasi pengaruh geometri dan variasi konfigurasi lesung pipit terhadap performa pelumasan. Namun demikian, fokus penelitian tersebut belum mencakup analisis tekanan kontak secara mendalam, dan model elemen hingga yang digunakan masih sangat disederhanakan, dengan pembebanan 2D yang belum sepenuhnya merepresentasikan kondisi fisiologis sendi panggul manusia.

Tujuan utama dari analisis menggunakan metode elemen hingga (FEM) adalah untuk memperkirakan sejauh mana suatu desain teknik dapat diandalkan. Dalam konteks aplikasi struktural, tegangan von Mises akibat beban tertentu sering dijadikan indikator untuk menilai batas keamanan desain. FEM sendiri merupakan metode numerik yang digunakan untuk memperoleh solusi pendekatan terhadap distribusi variabel di suatu domain permasalahan yang sulit diselesaikan secara analitik [12]. Oleh karena itu, analisis terhadap tegangan von Mises pada dasarnya bertujuan untuk mengurangi potensi kegagalan implan dengan mengidentifikasi area yang mengalami tegangan minimum. Tegangan ini berkaitan erat dengan kemungkinan kegagalan material berdasarkan teori kegagalan von Mises, di mana semakin rendah nilai tegangan von Mises, maka semakin kecil pula kemungkinan terjadinya kegagalan struktural.

Metode elemen hingga merupakan pendekatan komputasi yang paling banyak digunakan untuk memprediksi tingkat keausan pada material bantalan sendi pinggul, sekaligus membantu menekan biaya dalam proses prediksi keausan secara in-vivo secara real-time. Berbagai studi telah dilakukan untuk mengevaluasi keausan material bantalan menggunakan metode ini, namun pengaruh radial clearance terhadap keausan masih relatif jarang dibahas. Beberapa pemodelan komputasi telah dilakukan terhadap keausan dan deformasi polietilen, dengan mempertimbangkan variasi radial clearance dan diameter kepala, yang menunjukkan bahwa peningkatan radial clearance dapat menurunkan keausan volumetrik [8]. Radial clearance sendiri merupakan parameter penting dalam sistem pelumasan pasangan bantalan logam-ke-logam [13]. Bantalan pinggul dengan clearance rendah memiliki kontak yang sangat konformal, sehingga menghasilkan luas area kontak yang besar. Ketika terjadi beban pada bagian tepi, area kontak ini dapat meluas hingga melewati batas cangkir, yang mengarah pada keausan tinggi [16]. Sementara itu, analisis keausan pasangan berlian poli kristalin (PCD-on-PCD) menggunakan metode elemen hingga menunjukkan bahwa jenis ini mengalami keausan paling rendah dibandingkan dengan pasangan logam-ke-logam maupun keramik-ke-keramik [15].

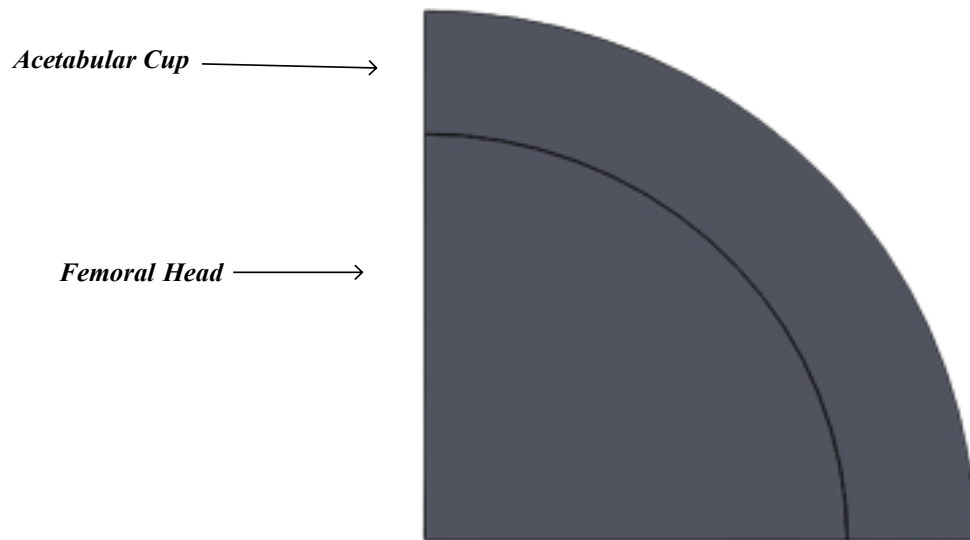
Penelitian ini memiliki tujuan untuk menganalisis tekanan kontak, tegangan von Mises, tegangan Tresca, dan deformasi pada implan pinggul berbahan Si_3N_4 – Si_3N_4 . Studi ini menggunakan pendekatan komputasi dua dimensi berbasis analisis elemen hingga. Tujuannya adalah untuk memperoleh pemahaman mengenai nilai optimal radial clearance yang dapat meminimalkan tekanan pada komponen implan dalam prosedur penggantian sendi pinggul. Pemodelan memuat gaya berjalan dan rentang gerak dalam ruang tiga dimensi yang disesuaikan dengan kondisi fisiologis sendi pinggul, sehingga menghasilkan simulasi yang lebih realistis. Selain itu, geometri model diperbarui untuk merepresentasikan perubahan pada permukaan akibat proses keausan.

2. Metode Perancangan

Perangkat lunak ABAQUS/CAE 2020 digunakan untuk menganalisis mekanika kontak dalam hal tekanan kontak. Beban yang diberikan meniru beban yang diberikan pada sendi pinggul manusia selama aktivitas berjalan normal, dibagi menjadi 32 tahap. Permukaan kontak tidak dilumasi dan dihitung berdasarkan kekasaran permukaan saja. Permukaan luar cangkir acetabular dibatasi tetap dan beban terkonsentrasi diterapkan ke daerah bawah kepala femoralis.

2.1. Model Geometri

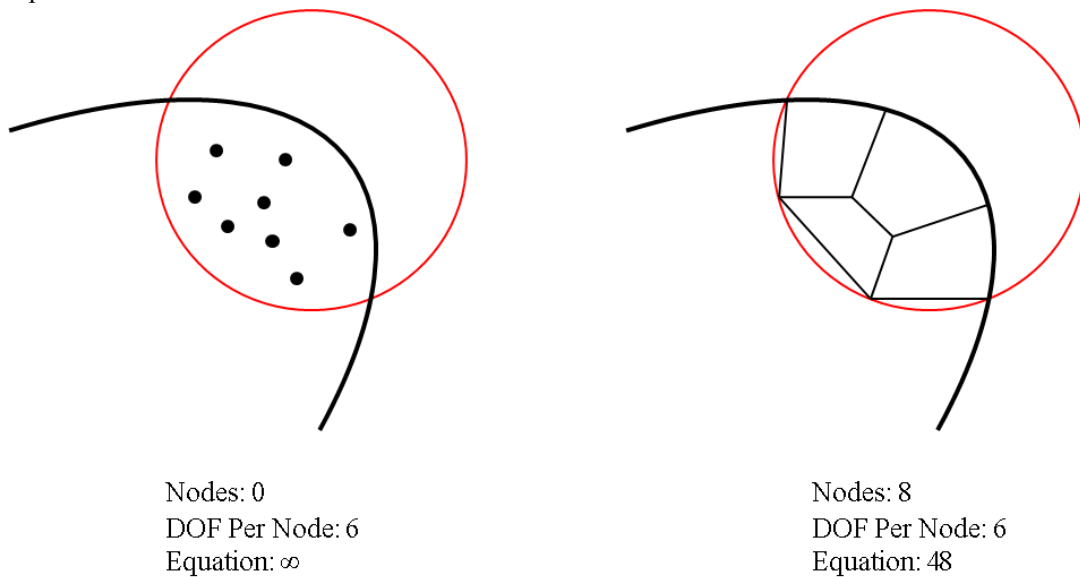
Model komponen bantalan dalam *total hip prosthesis* digunakan dalam penelitian ini untuk *acetabular cup* dan *femoral head* dengan ketebalan 28mm dan 5mm. Pada *radial clearance* diterapkan variasi ketebalan sebesar = 0.03mm; 0.05mm; 0.075mm; 0.1mm; 0.15mm; dan 0.3mm.



Gambar 1. Model Geometri

2.2. Meshing

Meshing merupakan tahapan dimana domain dibagi menjadi bagian-bagian kecil yang nantinya akan digunakan untuk perhitungan. Tujuan dilakukannya *meshing* yaitu untuk membuat perhitungan saat proses *running* menjadi lebih detail dan akurat. Selain dari ukurannya, bentuk *meshing* juga berpengaruh dalam proses simulasi. Model *mesh* ditunjukkan pada Gambar 2.

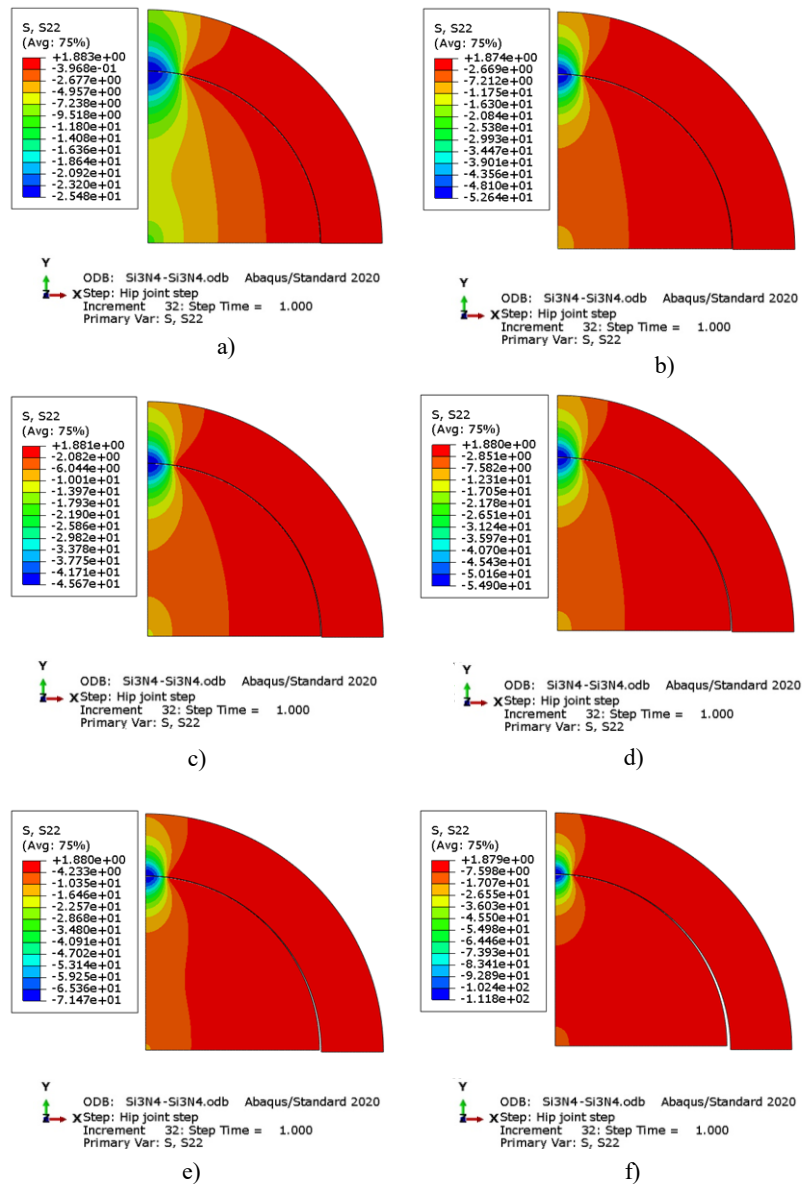


Gambar 2. Contoh konsep Meshing

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Distribusi pembebanan Tekanan Kontak

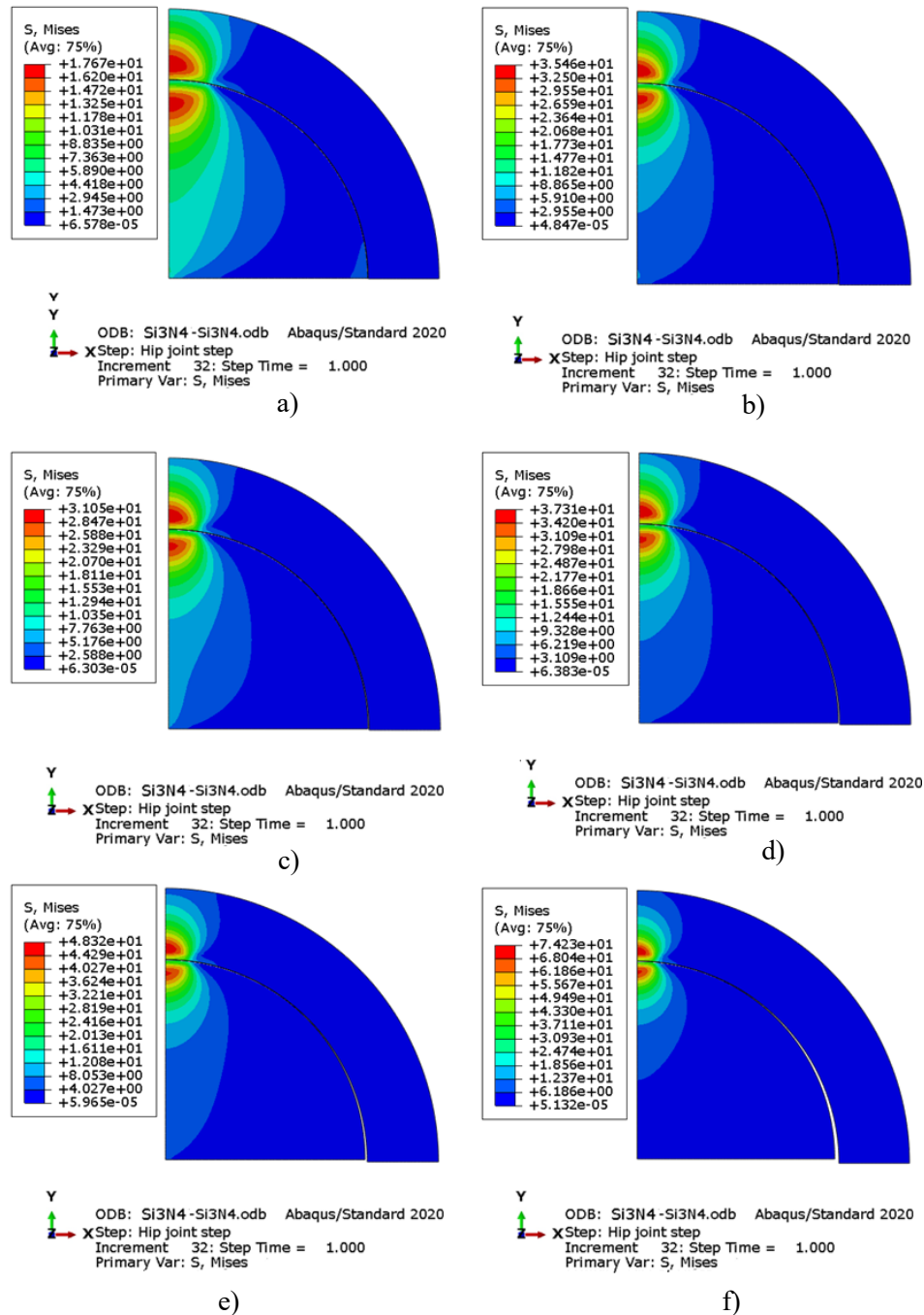
Hasil menunjukkan kontur tekanan kontak yang dialami bantalan total hip prosthesis untuk enam variasi nilai radial clearance. Daerah yang mengalami tekanan kontak paling besar ditampilkan dengan warna biru pada gambar. Kemudian besar tekanan kontak selanjutnya ditampilkan dengan warna biru muda, hijau, dan kuning secara berurutan menunjukkan semakin kecil tekanan kontak yang dialami. Daerah yang mengalami tekanan kontak paling kecil ditampilkan dengan warna merah pada gambar 3.



Gambar 3. Kontur Tekanan Kontak Hasil Simulasi Total Hip Prosthesis untuk radial clearance: a) 0.03; b) 0.05; c) 0.075; d) 0.1; e) 0.15; f) 0.3

3.2. Distribusi Tegangan Von Mises

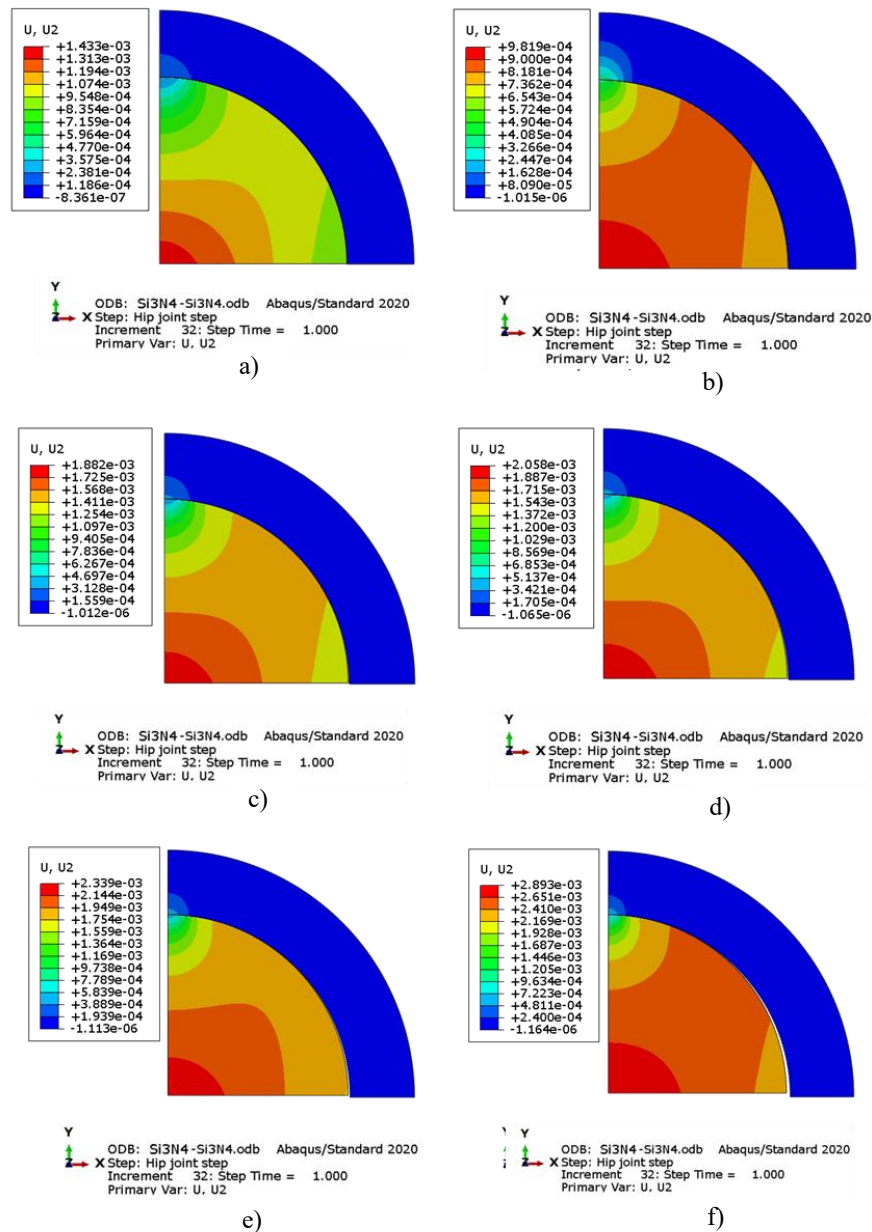
Hasil simulasi menunjukkan kontur tegangan von mises yang dialami bantalan total hip prosthesis untuk enam variasi nilai radial clearance. Daerah yang mengalami tegangan von mises paling besar ditampilkan dengan warna merah pada gambar. Kemudian besar tegangan von mises selanjutnya ditampilkan dengan warna kuning, hijau, dan biru muda secara berurutan menunjukkan semakin kecil tegangan von mises yang dialami. Daerah yang mengalami tegangan von mises paling kecil ditampilkan dengan warna biru pada gambar 4.



Gambar 4. Kontur Tegangan Von Mises Hasil Simulasi Total Hip Prosthesis untuk radial clearance: a) 0.03; b) 0.05; c) 0.075; d) 0.1; e) 0.15; f) 0.3

3.3. Distribusi Deformasi

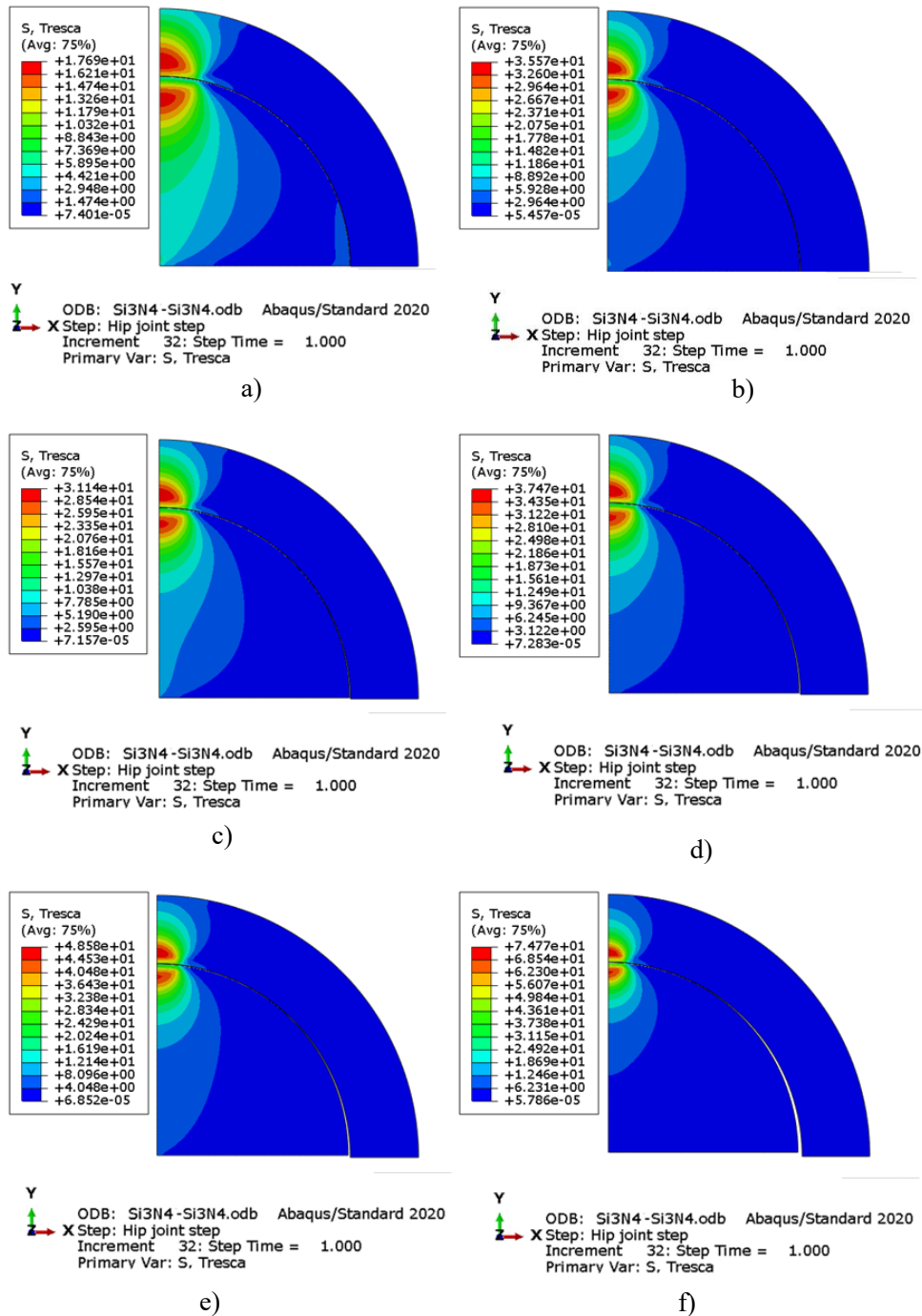
Hasil Simulasi menunjukkan kontur deformasi yang dialami bantalan total hip prosthesis untuk enam variasi nilai radial clearance. Daerah yang mengalami deformasi paling besar ditampilkan dengan warna merah pada gambar. Kemudian besar deformasi selanjutnya ditampilkan dengan warna kuning, hijau, dan biru muda secara berurutan menunjukkan semakin kecil deformasi yang dialami. Daerah yang mengalami deformasi paling kecil ditampilkan dengan warna biru pada gambar 5.



Gambar 5. Kontur Deformasi Hasil Simulasi Total Hip Prosthesis untuk radial clearance:
a) 0.03; b) 0.05; c) 0.075; d) 0.1; e) 0.15; f) 0.3

3.4. Distribusi Tegangan Tresca

Hasil simulasi menunjukkan kontur tegangan tresca yang dialami bantalan total hip prosthesis untuk enam variasi nilai radial clearance. Daerah yang mengalami tegangan tresca paling besar ditampilkan dengan warna merah pada gambar. Kemudian besar tegangan tresca selanjutnya ditampilkan dengan warna kuning, hijau, dan biru muda secara berurutan menunjukkan semakin kecil tegangan tresca yang dialami. Daerah yang mengalami tegangan tresca paling kecil ditampilkan dengan warna biru pada gambar 6.



Gambar 6. Kontur Tegangan Tresca Hasil Simulasi Total Hip Prosthesis untuk radial clearance: a) 0.03; b) 0.05; c) 0.075; d) 0.1; e) 0.15; f) 0.3

4. Kesimpulan

1. Ketebalan *radial clearance* memiliki pengaruh terhadap mekanika kontak
2. Untuk siklus beban dalam kondisi berjalan normal total hip prosthesis dari semua variasi nilai radial clearance, ditemukan bahwa nilai resultan gaya yang dihasilkan selalu berubah-ubah selama 32 fasa, dimana nilai resultan gaya tertinggi pada fasa ke-7 dan terendah pada fasa ke-30.
3. Nilai tekanan kontak akan meningkat seiring dengan semakin besarnya resultan gaya yang diberikan, dengan nilai tekanan kontak, tegangan von Mises, deformasi, dan tegangan Tresca untuk seluruh variasi nilai radial clearance bantalan dari yang paling kecil ke paling besar ditemukan pada variasi 0,03 mm; 0,05 mm; 0,075 mm; 0,1 mm; 0,15 mm; 0,3 mm.

5. Daftar Pustaka

- [1] Al Zoubi, N.F.; Tarlochan, F.; Mehboob, H.; Jarrar, F. *Design of Titanium Alloy Femoral Stem Cellular Structure for Stress Shielding and Stem Stability: Computational Analysis*. Appl. Sci. 2022, 12, 1548.
- [2] Ammarullah MI, Md Saad AP, Syahrom A, Basri H. *Contact pressure analysis of acetabular cup surface with dimple addition on total hip arthroplasty using finite element method*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021;1034(1):012001.
- [3] Ammarullah, M.I.; Afif, I.Y.; Maula, M.I.; Winarni, T.I.; Tauviqirrahman, M.; Bayuseno, A.P.; Basri, H.; Syahrom, A.; Md Saad, A.P.; Jamari. *Deformation Analysis of CoCrMo-on-CoCrMo Hip Implant Based on Body Mass Index Using 2D Finite Element Procedure*. J.
- [4] Arthritis Research, UK. *Hip Replacement Surgery—Patient Information*, 2011st ed.; Arthritis Research UK: Chesterfield, UK, 2011.
- [5] Bal B and Rahaman M. *Orthopedic applications of silicon nitride ceramics*. Acta Biomater 2012; 8: 2889–2898.
- [6] Bal BS, Khandkar A, Lakshminarayanan R, et al. *Fabrication and testing of silicon nitride bearings in total hip arthroplasty: winner of the 2007 “HAP” PAUL Award*. J Arthroplasty 2009; 24: 110–116.
- [7] Basri, H., Syahrom, A., Prakoso, A.T., Wicaksono, D., Amarullah, M.I., Ramadhoni, T.S. et al. (2019) *The Analysis of Dimple Geometry on Artificial Hip Joint to the Performance of Lubrication*. Journal of Physics: Conference Series, 1198, 1–10. [https://doi.org/10.1016/0959-4388\(94\)90075-2](https://doi.org/10.1016/0959-4388(94)90075-2).
- [8] Jamari, J.; Saputra, E.; Anwar, I.B.; Van Der Heide, E. *Study of an Additional Layer of Cement Mantle Hip Joints for Reducing Cracks*. J. Funct. Biomater. 2019, 10, 40.
- [9] Keele University. *A Guide for People Who Have Osteoarthritis*, 2014th ed.; Keele University: Staffordshire, UK, 2014.
- [10] London Health Sciences Centre. *My Guide to Total Hip Joint Replacement*, 2013rd ed.; London Health Sciences Centre: London, UK, 2013.
- [11] Neumann A, Reske T, Held M, et al. *Comparative investigation of the biocompatibility of various silicon nitride ceramic qualities in vitro*. J Mater Sci Mater Med 2004; 15: 1135–1140.
- [12] P. Dayan, “Computational modelling,” Curr. Opin. Neurobiol., vol. 4, no. 2, pp. 212–217, 1994, doi: 10.1016/0959-4388(94)90075-2.
- [13] Shankar S, Nithyaprakash R. *Wear prediction on silicon nitride bearing couple in human hip prosthesis using finite element concepts*. 2014;228(7):717–24.
- [14] Shankar S, Siddarth R, Nithyaprakash R and Uddin M S 2018 *Wear prediction of hard carbon coated hard-on-hard hip implants using finite element method* Int. J. Comput. Aided Eng. Technol. 10 440–56.
- [15] Uddin, M.S. & Chan, G.W.C. *Reducing stress concentration on the cup rim of hip implants under edge loading*. Int. J. Numerical Methods Biomed. Eng., 2018, 35(1), e3149. doi: 10.1002/cnm.3149.
- [16] Underwood RJ, Zografos A, Sayles RS, et al. *Edge loading in metal-on-metal hips: low clearance is a new risk factor*. Proc IMechE Part H: J Engineering in Medicine 2012; 226: 217–226.