

Pemodelan Metode Elemen Hingga Kontak Femoral Head dengan Acetabular Liner pada Sendi Panggul Buatan dengan Variasi Diameter Celah pada Acetabular Liner

*Rifky Ismail^{a,b}, Sugiyanto^a, Henry Kristianto^a, Eko Saputra^a, Jamari^a

^aDepartemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. Sudharto Kampus UNDIP Tembalang Semarang 50275

^bCentre for Biomechanics, Biomaterial, Biomechatronics and Biosignal Processing (CBIOM3S) UNDIP
Gedung Laboratorium Terpadu, Lantai 5, Jl. Prof. Sudharto Kampus UNDIP Tembalang Semarang 50275

*E-mail: r_ismail@undip.ac.id

Abstrak

Sendi panggul buatan (*artificial hip joint*) memiliki beberapa komponen utama, yaitu *stem*, *femoral head* dan *acetabular shell* yang terbuat dari material logam dan *acetabular liner* yang terbuat dari komponen polimer dengan jenis UHMWPE (*ultra-high-molecular-weight polyethylene*). Pada desain sendi panggul buatan, yang diproduksi oleh UNDIP terdapat alternatif desain permesinan komponen *acetabular liner* yang memiliki celah pada titik pusat *acetabular liner*-nya. Untuk menguji alternatif desain ini, perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui efek dari celah yang terdapat pada pusat *acetabular liner* terhadap distribusi *contact pressure* dan tegangan von Mises. Penelitian ini dilakukan dengan tujuan mengetahui pengaruh dari variasi diameter celah yang terdapat pada *acetabular liner* sendi panggul buatan produk UNDIP terhadap tekanan kontak dan tegangan von Mises. Penelitian dilakukan menggunakan metode elemen hingga dengan software ABAQUS. *Femoral head* dimodelkan menggunakan material stainless steel AISI 316L dan *acetabular liner* dimodelkan menggunakan material UHMWPE. Beban yang diberikan pada kontak *femoral head* dan *acetabular liner* ini dimodelkan sebesar 5 N menuju titik pusat *acetabular liner* dengan variasi diameter celah: 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm dan 3 mm. Jumlah elemen yang digunakan sebanyak 9000 buah setelah dikonfirmasi validitas penentuan mesh. Hasil simulasi menunjukkan bahwa terdapat konsentrasi tegangan pada tepi celah yang ditandai dengan tingginya *contact pressure* dan tegangan von Mises. Nilai tertinggi kedua luaran ini terlihat pada diameter celah sebesar 2 mm yang nilai maksimumnya mencapai 4 kali dari besar *contact pressure* dan tegangan von Mises pada diameter celah yang lain. Fenomena ini diperkirakan disebabkan karena tepi dari celah berimpit dengan tepi dari jari-jari kontak yang terbentuk pada sistem kontak mekanik femoral head dan *acetabular liner*. Adanya kenaikan yang dramatis ini dapat mengakibatkan naiknya keausan (*wear*) dan munculnya kemungkinan terjadinya deformasi plastis yang lebih besar pada *liner*. Rekomendasi yang diberikan pada pemberian celah ini adalah sebaiknya dihindari untuk mengurangi terjadinya *wear* dan deformasi plastis yang terlalu besar. Dalam kondisi celah tidak dapat dihindari maka diameter celah tidak lebih dari 14% dari diameter *femoral head*.

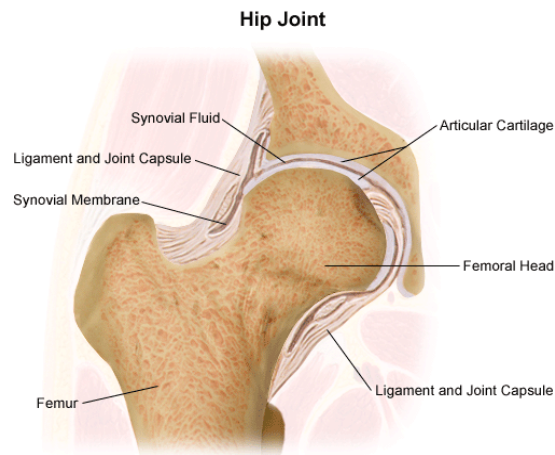
Kata kunci: *acetabular liner*, celah, metode elemen hingga, UHMWPE, variasi diameter

1. Pendahuluan

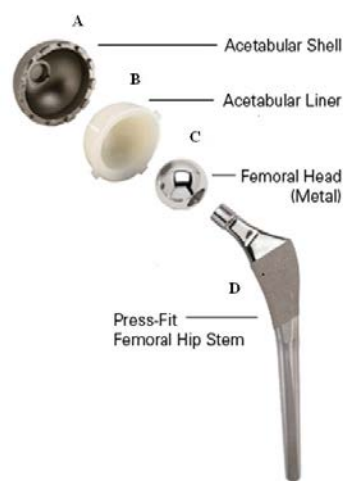
Sendi Panggul (*hip joint*) adalah sendi dimana tulang *femur* (paha) dan *pelvis* (panggul) bertemu dengan bentuk sendi berbentuk bola dan mangkok. Kepala tulang paha yang berbentuk bola disebut dengan *femoral head* bertemu dengan mangkok *acetabulum* yang merupakan bagian dari tulang *pelvis* pada sendi panggul dengan disertai lapisan *articular cartilage*. Adanya *articular cartilage* pada sendi ini menjadikan kemampuannya bergerak hampir tanpa gesekan dan tidak menimbulkan rasa sakit [1]. Kontak pada sendi panggul dan beberapa jaringan pendukung pada sendi panggul manusia dapat dilihat pada Gambar 1.

Dalam perkembangannya, sendi panggul alami/asli manusia terkadang perlu mengalami penggantian menggunakan sendi panggul buatan (*artificial hip joint*) akibat adanya peradangan sendi, berkurangnya cairan sinovial sendi, menipisnya *articular cartilage*, atau trauma kecelakaan. Proses penggantian sendi panggul ini terdapat dua macam, *hemi arthroplasty* (HA) dan *total hip replacement* (THR) atau *total hip arthroplasty* (THA). Pada penelitian ini, kajian akan difokuskan pada proses THR. Komponen sendi panggul buatan pada jenis unipolar yang sering dijumpai pada pasien THR dapat dilihat pada Gambar 2.

Pada proses pembuatan sendi panggul buatan, terdapat gagasan untuk membentuk celah celah silindris pada komponen *acetabular liner* yang terbuat dari material UHMWPE (*Ultra-high-molecular-weight polyethylene*). Celah rongga yang terdapat pada *liner* UHMWPE ini dimaksudkan untuk menjadi tempat pengumpulan partikel *wear* yang terjadi akibat gesekan *femoral head* dengan *liner* saat sendi bekerja. Celah ini juga menjadikan proses permesinan menjadi lebih mudah dilakukan mengingat saat proses permesinan dilakukan terhadap komponen *liner* ini, celah akan membantu mengurangi tingkat kesulitan permesinan sebagai konsekuensi dari proses permesinan benda kerja.



Gambar 1. Bagian-bagian hip joint [2]



Gambar 2. Komponen-komponen pada artificial hip joint [3]

Pada saat sendi panggul buatan digunakan, kontak yang terjadi antara femoral head yang terbuat dari material stainless steel AISI 316L dengan acetabular liner UHMWPE dengan adanya celah perlu dianalisis secara mendalam. Hal ini disebabkan karena adanya celah dapat memicu terjadinya konsentrasi tegangan yang dapat mengakibatkan wear berlebih, deformasi plastis material UHMWPE atau fracture pada bibir celah. Salah satu metode yang mudah untuk mengamati fenomena kontak mekanik pada sendi panggul buatan dengan adanya celah ini adalah menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*).

Beberapa penelitian sebelumnya menggunakan *finite element method* (FEM) telah dilakukan untuk berbagai macam kasus mekanika kontak pada sendi panggul buatan dengan fokus pada sendi panggul buatan produk UNDIP [4-7]. Penelitian menggunakan FEM berfungsi untuk mendapatkan fenomena kontak yang terjadi tanpa perlu melakukan eksperimen. Dalam kasus ini, untuk mengamati pengaruh adanya celah pada komponen liner yang terbuat dari UHMWPE maka dilakukan penelitian ini. Tujuan utama penelitian ini adalah mengamati pengaruh dimensi diameter celah pada liner terhadap beberapa parameter simulasi seperti tekanan kontak (*contact pressure*) dan tegangan von Mises yang terjadi.

2. Metode penelitian

2.1. Bahan

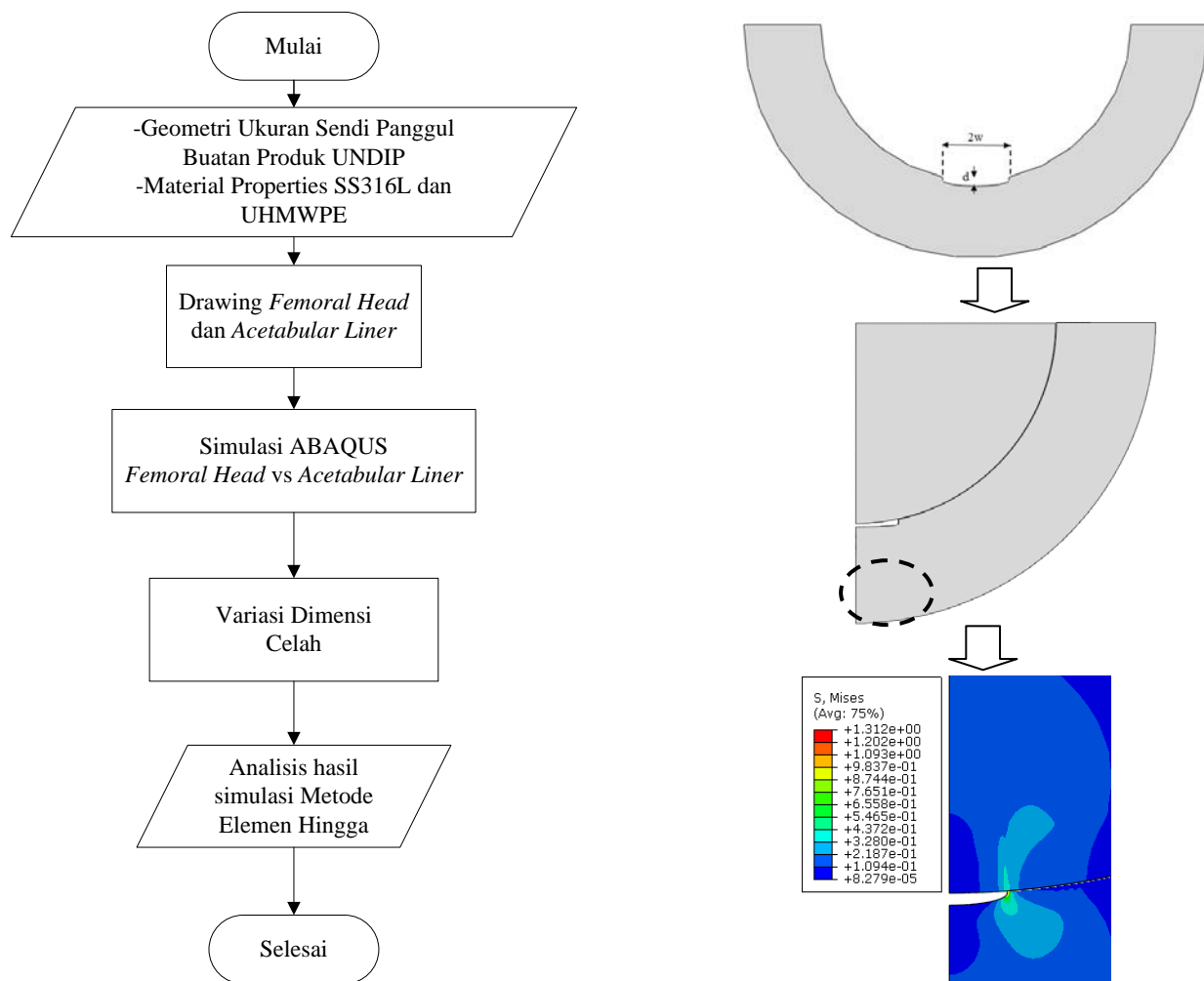
Dalam melakukan simulasi FEM, bahan yang dimodelkan dalam penelitian ini adalah material stainless steel AISI 316L untuk komponen femoral head dan UHMWPE untuk komponen acetabular liner. Sifat mekanik material yang dimodelkan dalam penelitian ini dapat dilihat pada Tabel 1. Pada Tabel 1 juga ditunjukkan geometri pada komponen femoral head dan acetabular liner. Radius femoral head yang digunakan dalam penelitian ini adalah 14 mm ($d = 28$ mm), yang merupakan ukuran paling banyak digunakan oleh pasien di Indonesia. Terdapat gap antara radius femoral head dengan liner sebesar 0,05 mm. Gap ini berfungsi untuk masuknya cairan sinovial saat sendi panggul digunakan. Bentuk dan ukuran dari sendi panggul buatan yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada sendi panggul buatan yang dibuat oleh Lab EDT, Departemen Teknik Mesin UNDIP.

Tabel 1. Geometri, jenis material dan sifat mekanis yang digunakan dalam simulasi FEM.

Komponen	Radius (mm)	Jenis Material	Modulus Elastisitas (MPa)	Poisson's ratio
Femoral Head	14	SS316L	193.000	0,3
Acetabular liner	14,05	UHMWPE	945	0,45

2.2. Prosedur Penelitian

Proses simulasi dilakukan dengan mengikuti diagram alir yang diperlihatkan pada Gambar 3. Software FEM yang digunakan dalam simulasi ini adalah ABAQUS dan proses simulasinya dilaksanakan di Laboratorium Perancangan Teknik dan Tribologi Departemen Teknik Mesin UNDIP. Celah yang dimodelkan diletakkan di tengah komponen *acetabular liner* dengan kedalaman celah sebesar $d = 0,2$ mm. Lebar celah divariasikan dengan w sebesar 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm dan 3 mm. Variasi dimensi celah ini diberikan untuk melihat pengaruh yang ditimbulkannya terhadap tekanan kontak (*contact pressure*) dan tegangan von Mises.



Gambar 3. Diagram alir penelitian yang dilakukan dan model yang digunakan dalam simulasi FEM menggunakan software ABAQUS.

Setelah melakukan validasi sensitivitas *mesh*, jumlah elemen FEM yang digunakan dalam penelitian ini sebanyak 9000 elemen mampu memberikan hasil yang akurat berupa tegangan kontak. Beban yang diberikan dalam sistem kontak ini menggunakan beban yang rendah, yaitu sebesar 5 N. Simulasi FEM menggunakan model axis-simetrik 2 dimensi yang menggambarkan suatu penampakan dari sisi melingkar. Hasil yang disajikan dalam simulasi ini berbentuk 2 dimensi.

3. Hasil dan pembahasan

Hasil yang dibahas dalam penelitian ini adalah *contact pressure* arah vertikal yang didalam ABAQUS didapatkan dari hasil simulasi S22 dengan satuan MPa dan tegangan von Mises dengan satuan MPa. Tekanan kontak

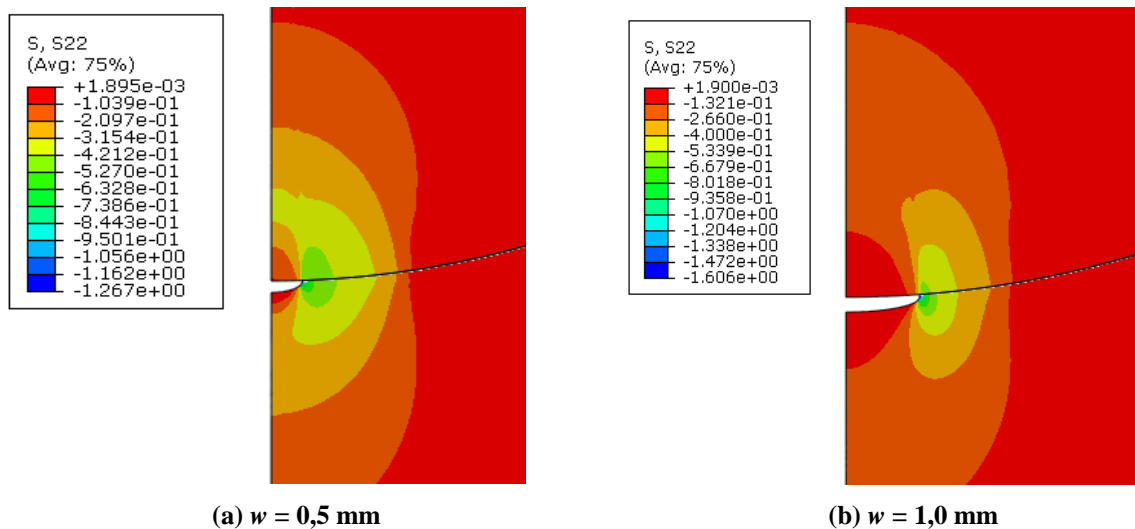
yang didapatkan menggunakan FEM merupakan salah satu parameter penting dalam proses perhitungan keausan sebagaimana dijelaskan oleh beberapa peneliti [8].

3.1. Contact Pressure

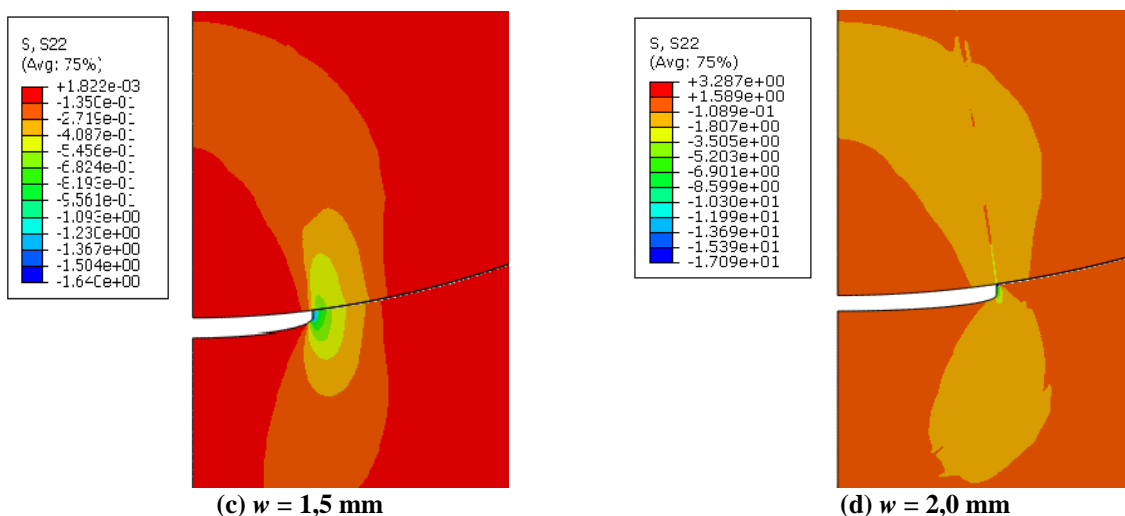
Contact pressure hasil simulasi dengan variasi diameter celah pada dasar acetabular liner diperlihatkan pada Gambar 4. Hasil simulasi pada Gambar 4a-4f menunjukkan adanya kenaikan konsentrasi tegangan pada ujung dari celah. Naiknya konsentrasi tegangan pada suatu sistem kontak sering berakibat kontra produktif terhadap sistem kontak karena mendorong deformasi plastis dan fracture pada daerah yang mengalami kenaikan konsentrasi tegangan. Jika dikaitkan dengan perhitungan wear maka munculnya konsentrasi tegangan dapat mengakibatkan munculnya excessive wear yang tidak diharapkan. Keausan yang berlebihan pada sistem kontak artificial hip joint dapat mengakibatkan umur pakai sendi panggul buatan lebih rendah dari desain awal, sekitar 15 tahun penggunaan oleh pasien.

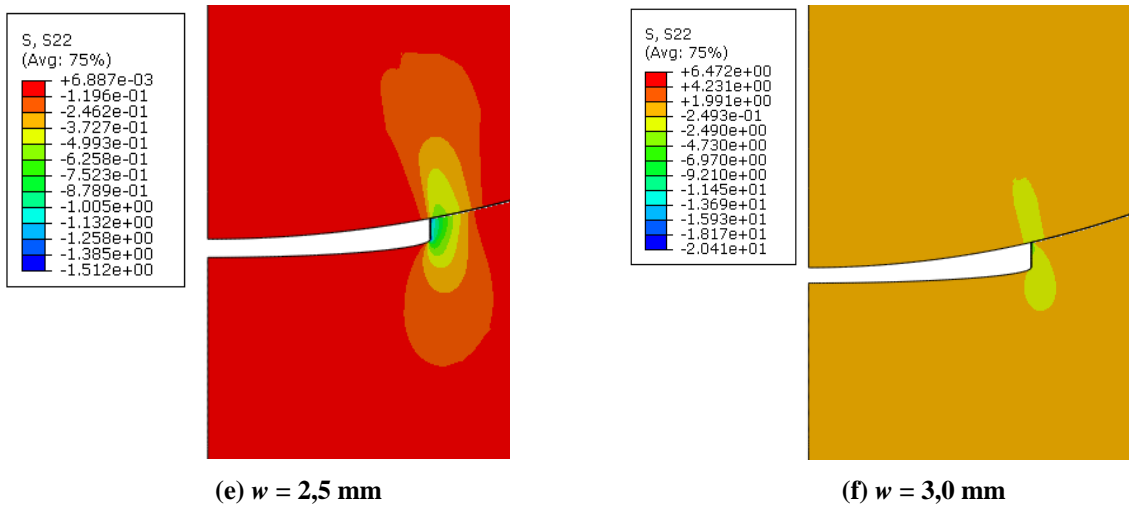
Jika diperhatikan pada daerah munculnya konsentrasi tegangan contact pressure maksimum berlokasi di permukaan. Hal ini berbeda dengan kondisi tanpa celah dimana kontak pressure maksimum untuk kondisi elastis, muncul di daerah sub surface yang berjalan beberapa milimeter dari permukaan daerah kontak. Distribusi contact pressure memberikan fenomena yang berbeda mulai dari $w = 0,2$ mm. Tekanan kontak terlihat naik secara dramatis mulai dari lebar celah sebesar 0,2 mm sebagai akibat dari berdekatnya jari-jari kontak normal dengan ujung dari celah yang terdapat pada liner.

Untuk memberikan ilustrasi contact pressure yang terjadi pada permukaan celah maka dilakukan pengambilan data nilai contact pressure pada area permukaan sebagai fungsi jari-jari kontak (x) sebagaimana diperlihatkan pada Gambar 4. Nilai dari contact pressure naik drastis pada jari-jari celah sebesar 2,0 mm yang nilai puncaknya mencapai 2 MPa. Hal ini diperkirakan karena pada jari-jari ini, posisi ujung celah berdekatan dengan akhir jari-jari kontak.

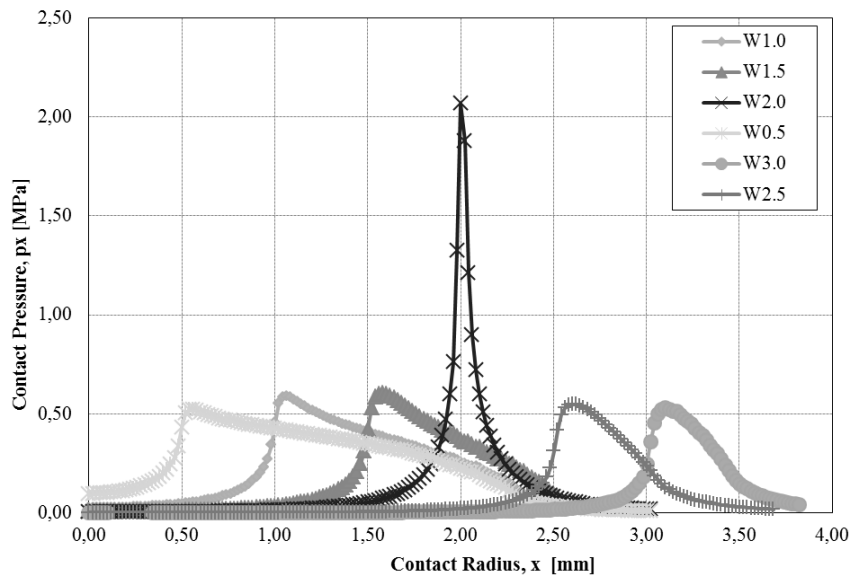


Gambar 4. Contact pressure dengan variasi jari-jari celah pada acetabular liner dengan material UHMWPE. Variasi jari-jari celah yang disimulasikan antara 0,5 mm – 3 mm (Berlanjut...).

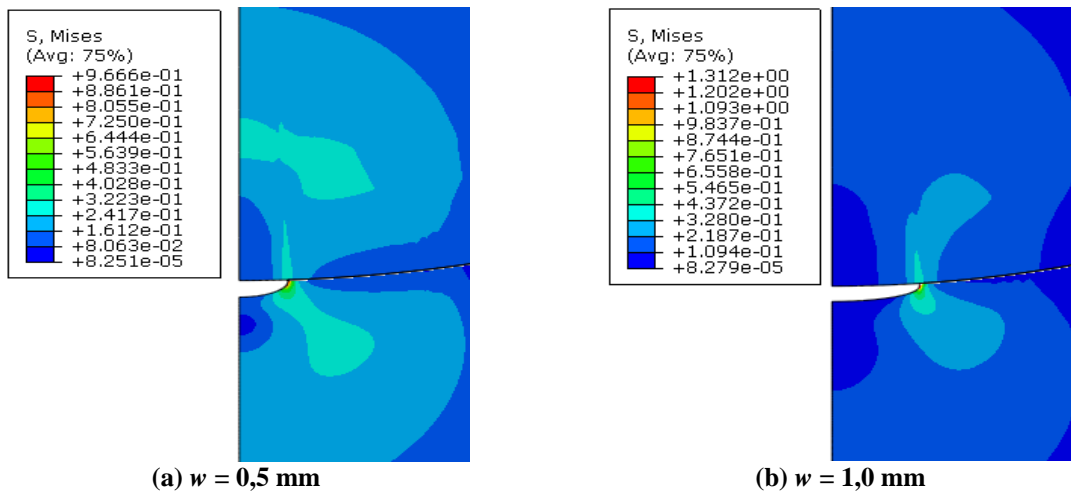


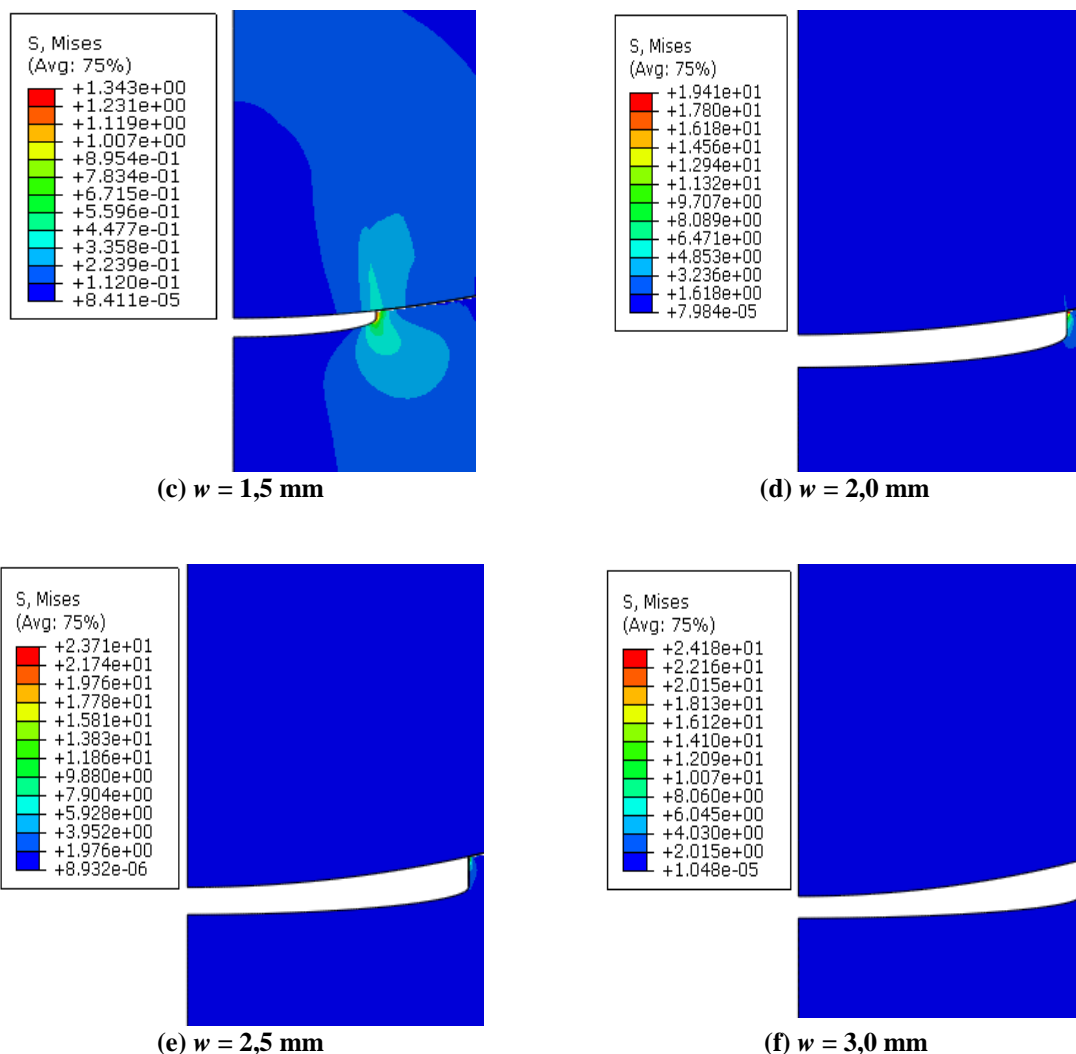


Gambar 4. Contact pressure dengan variasi jari-jari celah pada acetabular liner dengan material UHMWPE. Variasi jari-jari celah yang disimulasikan antara 0,5 mm – 3 mm (Lanjutan).

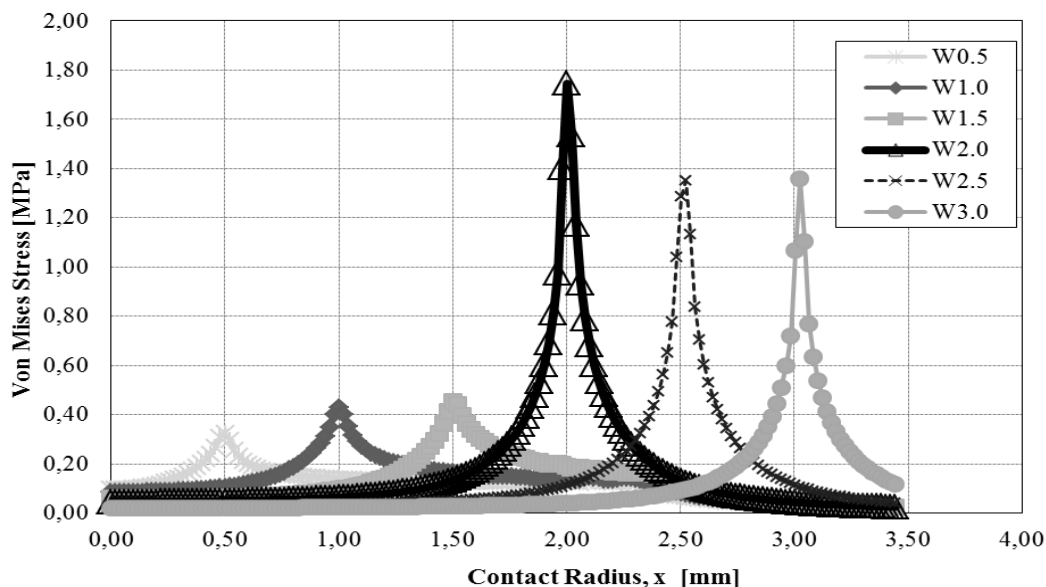


Gambar 5. Distribusi contact pressure sebagai fungsi dari jari-jari kontak





Gambar 6. Tegangan von Mises dengan variasi jari-jari celah pada acetabular liner dengan material UHMWPE



Gambar 7. Distribusi tegangan von Mises sebagai fungsi dari jari-jari kontak dengan variasi jari-jari celah yang diberikan pada material UHMWPE sebagai acetabular liner.

3.2. Tegangan von Mises

Tegangan von Mises merupakan resultan tegangan pada 3 arah: x, y dan z yang terjadi pada sistem kontak *acetabular liner* dengan *femoral head*. Tegangan ini dianggap penting karena sering digunakan untuk melakukan proses perhitungan faktor keamanan dari suatu sistem. Dalam teori distros energi, tegangan von Mises dibandingkan dengan tegangan luluh material untuk mengetahui apakah suatu sistem kontak mengalami deformasi elastis, elastis plastis dan *fully* plastis. Gambar 5 menunjukkan distribusi tegangan von Mises sebagai fungsi dari jari-jari celah, mulai dari $w = 0,5 \text{ mm} - 3 \text{ mm}$.

Grafik pada Gambar 6 menunjukkan karakteristik tegangan von Mises yang terjadi pada kontak antara *femoral head* dan *acetabular liner* yang memiliki berbagai macam ukuran radius celah. Dari gambar ini dapat disimpulkan bahwa ketika radius celah memiliki lebar lebih atau sama dengan 2 mm, terjadi konsentrasi tegangan yang tinggi. Secara umum, *trendline* tegangan von Mises mengalami kenaikan seiring bertambahnya lebar radius, tetapi mengalami penurunan setelah melewati radius 2 mm.

Konsentrasi tekanan kontak pada Gambar 4 dan konsentrasi tegangan pada Gambar 6 yang muncul akibat pengaruh dari adanya celah pada *acetabular liner* dianggap fenomena negatif karena dapat menjadi penyebab adanya deformasi plastis dan *wear* yang berlebihan. Dengan dimensi celah yang kurang dari 2 mm, nilai tegangan tertinggi berkisar antara 0,3 – 0,5 MPa. Jika dilihat dari nilai tegangan von Mises yang muncul berkisar 4 kali dari beban tertinggi pada kondisi jari-jari celah di bawah 2 mm, mencapai 1,8 MPa pada diameter celah 2 mm, kemudian berangsur menurun hingga mendekati 1,4 MPa pada diameter celah 3 mm.

Fenomena ini diperkirakan disebabkan karena tepi dari celah berimpit dengan tepi dari jari-jari kontak yang terbentuk pada sistem kontak mekanik *femoral head* dan *acetabular liner*. Adanya kenaikan yang dramatis ini dapat mengakibatkan naiknya keausan (*wear*) dan munculnya kemungkinan terjadinya deformasi plastis yang lebih besar pada *liner*. Jika dihitung bahwa diameter femoral head yang digunakan pada simulasi ini adalah 28 mm dan jari-jari celah yang menghasilkan kenaikan dramatis adalah $w = 2 \text{ mm}$, atau radius $2w = 4 \text{ mm}$ maka prosentase radius kritis adalah $4 \text{ mm} / 28 \text{ mm}$, yaitu sebesar 14,3%. Rekomendasi yang diberikan pada pemberian celah ini adalah sebaiknya dihindari untuk mengurangi terjadinya *wear* dan deformasi plastis yang terlalu besar. Dalam kondisi celah tidak dapat dihindari maka diameter celah kurang dari 14 % dari diameter *femoral head*.

4. Kesimpulan

Penelitian ini yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh dari variasi diameter celah yang terdapat pada *acetabular liner* sendi panggul buatan produk UNDIP terhadap tekanan kontak dan tegangan von Mises telah berhasil dilaksanakan. Penelitian menggunakan software ABAQUS ini memodelkan *femoral head* sebagai material *stainless steel* AISI 316L dan *acetabular liner* dimodelkan menggunakan material UHMWPE. Beban yang diberikan pada kontak *femoral head* dan *acetabular liner* ini dimodelkan sebesar 5 N menuju titik pusat *acetabular liner* dengan variasi diameter celah: 0,5 mm, 1 mm, 1,5 mm, 2 mm, 2,5 mm dan 3 mm. Hasil simulasi dilaporkan bahwa terdapat konsentrasi tegangan pada tepi celah yang ditandai dengan tingginya *contact pressure* dan tegangan von Mises pada diameter celah sebesar 2 mm yang nilai maksimumnya mencapai 4 kali dari besar *contact pressure* dan tegangan von Mises pada diameter celah di bawah 2 mm. Fenomena ini diperkirakan disebabkan karena tepi dari celah berimpit dengan tepi dari jari-jari kontak yang terbentuk pada sistem kontak mekanik femoral head dan *acetabular liner*. Adanya kenaikan yang dramatis ini dapat mengakibatkan naiknya keausan (*wear*) dan munculnya kemungkinan terjadinya deformasi plastis yang lebih besar pada *liner*. Rekomendasi yang diberikan pada pemberian celah ini adalah sebaiknya dihindari untuk mengurangi terjadinya *wear* dan deformasi plastis yang terlalu besar. Dalam kondisi celah tidak dapat dihindari maka diameter celah tidak lebih dari 14% dari diameter *femoral head*.

Referensi

- [1] Alvarado, J., 2003, *Biomechanics of Hip and Knee Prostheses*, University of Puerto Rico Mayaguez: Puerto Rico.
- [2] Dorrwachter, J.N.P., 2014, *Good as New A Patient Guide to Total Hip Replacement*, Havard, Massachusetts.
- [3] Martin, G. Dan Porth, C.M., 2009, *Pathophysiology Concepts of Altered Health States*, 8th Ed, Lippincott Williams and Wilkins : Philadelphia.
- [3] Anwar, I.B, Saputra E, Ismail R, Jamari J, dan van der Heide E, 2016, "Fixation Strength Analysis of Cup to Bone Material Using Finite Element Simulation," *AIP Conference Proceedings* Vol. 1725, pp.6-11.
- [4] Jamari, J., Ismail, R., Anwar, I.B., Saputra, E., Tauviqirrahman, M. dan van der Heide, E., 2016, "Study the Effect of Surface Texturing on the Stress Distribution of UHMWPE as a Bearing Material During Rolling Motion," *AIP Conference Proceedings* Vol. 1725 pp. 30-35.
- [5] Saputra, E., Anwar, I.B., Ismail, R., Jamari, J. dan van der Heide, E., 2016, "Finite Element Study of Contact Pressure Distribution on Inner and Outer Liner in the Bipolar Hip Prosthesis," *AIP Conference Proceedings*, Vol. 1725 p. 020075-80.
- [6] Ismail, R., Saputra, E., Tauviqirrahman, M., Legowo, A.B., Anwar, I.B. dan Jamari, J., 2014, "Numerical Study of Salat Movements for Total Hip Replacement Patient," *Applied Mechanics and Materials* Vol. 493, pp. 426-431.
- [7] Ismail, R., 2013, *Running-in of Rolling-sliding Contacts*, PhD Thesis, University of Twente, The Netherlands.

Ucapan terima kasih

Penulis menyampaikan terima kasih atas pembiayaan penelitian Pengembangan Teknologi Manufaktur Artificial Hip Joint Produk Indonesia dengan Inovasi Desain untuk Ibadah Salat dan Kemudahan Pemasangan bagi Dokter Ortopedi yang didanai oleh Kementerian Riset dan Pendidikan Tinggi, Republik Indonesia melalui skema pendanaan PUSNAS tahun 2016.