

---

# PREDIKSI SIFAT MATERIAL *PRESSURE TRANSMITTING MEDIUM* PADA *QUASI-ISOSTATIC PRESSING* MENGGUNAKAN *FINITE ELEMENT ANALYSIS*

Dede Sutarya<sup>1</sup>, Iqbal Ramadhian Pamungkas<sup>2</sup>, Hendri Sukma<sup>2</sup>,  
Agus Sartono Dwi Santosa<sup>1</sup>, Dedi Haryadi<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN

Kawasan Puspiptek Serpong Gd.20 Tangerang Selatan, Banten 15314

<sup>2</sup>Teknik Mesin Universitas – Pancasila

Jalan Srengseng Sawah, Jagakarsa, Jakarta Selatan 12640

e-mail: dedes@batan.go.id

(Naskah diterima: 26-11-2018, Naskah direvisi: 02-12-2018, Naskah disetujui: 12-12-2018)

## ABSTRAK

**PREDIKSI SIFAT MATERIAL *PRESSURE TRANSMITTING MEDIUM* PADA *QUASI-ISOSTATIC PRESSING* MENGGUNAKAN *FINITE ELEMENT ANALYSIS*.** Teknik *quasi-isostatic pressing* merupakan pengembangan dari *isostatic pressing* yang dibuat lebih sederhana dan efisien. *Quasi-isostatic pressing* mampu memberikan efek penekanan triaxial volumetrik sehingga dapat menghasilkan produk dengan densitas yang seragam. Dengan keunggulan tersebut, maka teknik *quasi-isostatic pressing* digunakan dalam proses fabrikasi bahan bakar bola (*pebble fuel*) untuk *high temperature gas cooled reactor* (HTGR). Masalah utama penggunaan teknik *quasi-isostatic pressing* terletak pada material hiper-elastis sebagai *pressure transmitting medium* (PTM) untuk mentranser tekanan statis yang seragam ke segala arah pada proses kompaksi. Oleh karena itu, sifat dan karakteristik material PTM yang dibutuhkan untuk *quasi-isostatic pressing* dengan kondisi batasan proses yang diinginkan harus ditentukan. Pada penelitian ini digunakan *Finite Element Analysis* (FEA) untuk memprediksi sifat dan karakteristik (konstanta) material PTM untuk proses *quasi-isostatic pressing* dengan menggunakan model Mooney-Rivlin 2 dan 3 parameter dan metode *single-acting press*. Hasil pengukuran FEA diperoleh nilai  $C_{10}$  sebesar 120 MPa,  $C_{01}$  sebesar 49 MPa dan  $C_{11}$  sebesar 10 Mpa, namun demikian, proses *quasi-isostatic pressing* pada kompaksi serbuk grafit masih belum terjadi secara sempurna. Penelitian lebih lanjut akan dilakukan dengan perbaikan secara numerik dan penggunaan model *Mooney-Rivlin* 5 hingga 9 parameter menggunakan metode *double-acting press*.

**Kata kunci:** *Quasi-isostatic pressing, pebble fuel, Mooney-Rivlin, pressure transmitting medium, finite element analysis*

## **ABSTRACT**

**MATERIAL PROPERTIES PREDICTION OF PRESSURE TRANSMITTING MEDIUM ON QUASI-ISOSTATIC PRESSING USING FINITE ELEMENT ANALYSIS.** *Quasi-isostatic pressing technique is developed from isostatic pressing, which is made more simple and efficient. Quasi-isostatic pressing can provide the effect of volumetric triaxial compaction, so that it can produce compaction with uniform density. With these advantages, the quasi-isostatic pressing technique is used in pebble fuel fabrication process for high-temperature gas-cooled reactors (HTGR). The main problem in the quasi-isostatic pressing technique lies in need of hyperelastic material as a pressure transmitting medium (PTM) to transmit uniform static pressure in all directions in the compacting process. Therefore, the properties and characteristics of the PTM material needed for quasi-isostatic pressing with the boundary conditions of process must be determined. In this paper Finite Element Analysis (FEA) was used to predict the properties and characteristics (constants) of PTM materials for the quasi-isostatic pressing process using Mooney-Rivlin 2 and 3 parameters and single-acting press methods. From the results of FEA experiments,  $C_{10}$  values of 120 MPa,  $C_{01}$  of 49 MPa and  $C_{11}$  of 10 MPa were obtained. However, the quasi-isostatic pressing process for graphite powder compacting has not completed perfectly, so further research will be carried out with numerical improvement and the use of the Mooney-Rivlin 5 to 9 parameter model using double-acting press method.*

**Keywords:** *Quasi-isostatic pressing, Pebble fuel, Mooney-Rivlin, Pressure transmitting medium, Finite element analysis.*

## PENDAHULUAN

*Quasi-Isostatic pressing* (QIP) adalah suatu metode yang telah dikembangkan dari teknik *hydrostatic pressing* yang hanya mampu memberikan efek penekanan biaksial. Sementara itu, QIP mampu memberikan efek penekanan triaxial volumetrik pada material yang ditekan (serbuk) sehingga mampu menghasilkan produk dengan densitas yang seragam dengan sifat fisik dan mekanik yang baik[1]. Metode QIP tersebut selain menyediakan kompresi volumetrik (triaksial) dari bahan yang ditekan juga menggabungkan keuntungan dari penekanan hidrostatis biaksial dan uniaksial statis[2, 3].

Medium yang memancarkan tekanan (*Pressure Transmitting Medium*–PTM) isostatik seragam adalah bahan elastomer keras (*synthetic rubber*), yang secara bersamaan merupakan bagian dari cetakan (*mold*) yang membentuk hasil kompakan, menyediakan tekanan internal dan eksternal terhadap material yang ditekan[4].

Saat ini, teknik QIP pada bahan serbuk telah mendapatkan penerimaan luas dalam produksi komponen keramik, grafit, logam dan bahan abrasif[5] serta proses fabrikasi bahan bakar nuklir berbentuk bola (*pebble fuel*) untuk reaktor HTGR. Proses fabrikasi tersebut terdiri dari dua tahap yaitu kompaksi awal (*pre-molding*) dan kompaksi akhir (*final molding*) dan kedua tahapan menggunakan teknik QIP untuk mengurangi sifat anisotropi[6,7].

*Pressure transmitting medium* (PTM) merupakan bagian terpenting dalam proses kompaksi dengan teknik QIP untuk memastikan tekanan isostatis terjadi pada serbuk yang dikompaksi. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada penentuan sifat material dari PTM dengan menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA) dan model Mooney- Rivlin. Hasil yang diperoleh akan menjadi acuan dalam menentukan sifat material cetakan *silicone*

*rubber* yang akan dibuat. Selain itu, informasi deformasi dan stress dari hasil FEA dapat menjadi salah satu informasi acuan untuk memprediksi cacat dan kegagalan yang akan muncul pada produk hasil kompakan.

### a. Model material *hyperelastic*

Upaya untuk mempelajari bahan dengan perilaku elastik non-linear, yang mengalami strain besar dengan tekanan kecil yang diberikan digunakan versi non-linear dari teori elastisitas klasik yang dikembangkan oleh Ogden [8]. Teori elastisitas non-linear, yang merupakan dasar teoritis untuk studi bahan-bahan hiper-elastis, seperti karet silikon menggunakan fungsi energi regangan ( $W$ ) untuk menggambarkan dalam bentuk energi dari perilaku mekanik bahan tersebut.

Untuk menangkap sifat mekanis non-linear dari bahan karet silikon dalam penelitian ini, akan digunakan model Mooney-Rivlin dengan dua parameter dan tiga parameter dari bahan tersebut. Diasumsikan bahwa karet silikon berperilaku seperti bahan isotropik, hiper-elastis dan non-linear [9]. Fungsi energi regangan ( $W$ ) kemudian dapat digambarkan sebagai fungsi dari strain invarian seperti yang ditunjukkan pada persamaan (1) dan (2).

$$W = W(I_1, I_2, I_3) \quad (1)$$

dengan,

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \\ I_3 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned} \quad (2)$$

disini  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  dan  $\lambda_3$  adalah prinsip peregangan. Dengan asumsi bahwa material juga *incompressible* ( $I_3 = 1$ ), maka Persamaan 1 menjadi (3).

$$W = W(I_1, I_2) \quad (3)$$

Prinsip stres *Cauchy* dapat dinyatakan sebagai fungsi peregangan seperti persamaan (4).

$$\sigma_i = \lambda_i \frac{\delta W}{\delta \lambda_i} + p \quad i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

dimana  $p$  adalah tekanan hidrostatik yang dapat ditentukan dari kondisi batas[9]. Martins dkk melakukan studi perbandingan beberapa model material untuk prediksi sifat hiper-elastis, dengan aplikasi untuk karet silikon dan jaringan lunak, menggunakan data yang diperoleh dari uji tarik uniaksial[9].

Mooney-Rivlin adalah salah satu model hiper-elastis yang pertama dikembangkan pada tahun 1940. Saat ini masih banyak digunakan, karena memiliki akurasi yang tinggi ketika memprediksi perilaku non-linear dari isotropik, bahan yang menyerupai karet[10].

Dua parameter model material Mooney-Rivlin dalam bentuk persamaan energi regangan dapat dilihat pada persamaan (5).

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (5)$$

dimana  $C_{10}$  dan  $C_{01}$  adalah konstanta material yang ditentukan secara empiris melalui observasi dan analisa terhadap hasil eksperimen pemodelan, dan  $I_1$  dan  $I_2$  adalah invarian pertama dan kedua komponen unimodular dari tensor deformasi Cauchy-Green, secara berurutan.

Sementara itu, untuk tiga parameter model material Mooney-Rivlin dalam hal energi regangan dapat digambarkan seperti pada persamaan (6).

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{20}(I_1 - 3)^2 \quad (6)$$

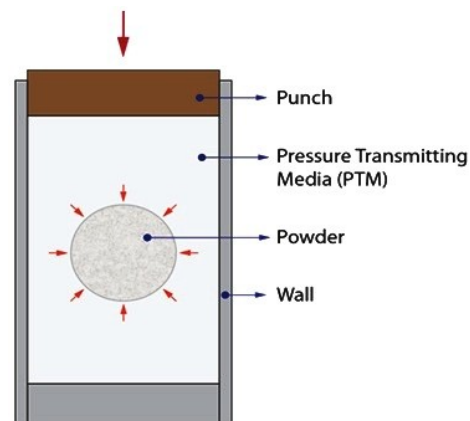
di mana  $C_{10}$ ,  $C_{01}$  dan  $C_{20}$  adalah konstanta material yang ditentukan secara empiris melalui observasi dan analisa terhadap hasil eksperimen pemodelan.

### b. *Quasi-isotatic pressing*

*Quasi-isostatic pressing* adalah pengembangan dari metode *isostatic-*

*pressing* sehingga menjadi lebih sederhana dan ekonomis, dimana volume sistem berubah pada tingkatan yang cukup lambat sehingga memungkinkan tekanan tetap seragam dan konstan di seluruh sistem.

*Quasi-isostatic pressing* merupakan teknologi pencetakan untuk bahan dasar berupa serbuk yang memungkinkan densitas merata pada semua bagian[11]. Proses dilakukan dengan menggunakan peralatan hidrolik atau mekanisme kompresi standar. Dalam hal desain peralatan, instalasi dan kondisi operasionalnya tidak jauh berbeda dengan teknik kompresi konvensional. Prinsip dari *quasi-isostatic pressing* didasarkan kepada penggunaan bahan elastis sebagai media (*pressure transmitting media*) untuk mentransfer tekanan *static* yang seragam ke segala arah. Proses *quasi-isostatic pressing* diperlihatkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Ilustrasi proses *quasi-isostatic pressing*.

Gambar 1 menunjukkan bahwa bagian *punch* akan bergerak ke bawah menekan *Pressure Transmitting Medium* (PTM). Bila PTM memiliki sifat mampu mentransfer tekanan statik yang seragam dengan baik, maka rongga pada PTM sesuai dengan bentuk akhir dari hasil cetakan yang diinginkan.

### c. *Finite Element Analysis (FEA)*

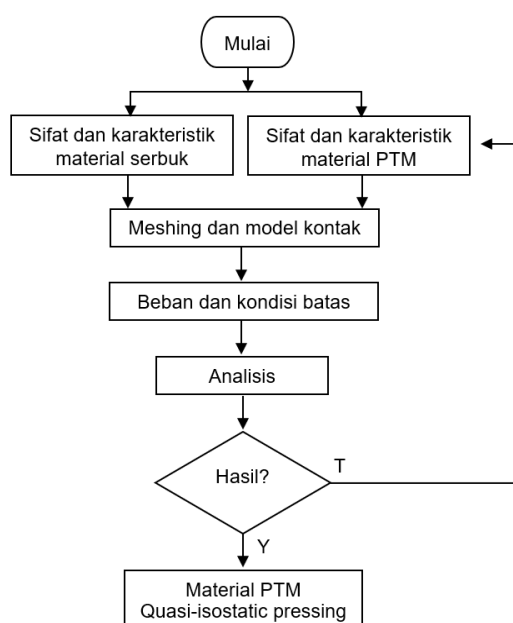
*Finite Element Analysis* (FEA) atau analisis elemen hingga adalah representasi matematis dari sistem fisik yang terdiri dari

bagian sistem, sifat material dan kondisi batas. Simulasi numerik dengan metode *finite element* (FEM) saat ini umum dilakukan dalam operasi manufaktur di industri, *cold isostatic pressing* sebagian besar didasarkan pada pengalaman dan metodologi *trial and error*. Saat ini, FEA telah diimplementasikan untuk simulasi proses *cold isostatic pressing* [12,13]. Kesulitan utama dalam menggunakan FEM untuk simulasi *isostatic pressing* bergantung pada model konstitutif *strain finite* kompleks dan perlakuan numeriknya serta parameter spesifik material yang harus ditentukan melalui eksperimen [14].

FEA digunakan untuk mengurangi jumlah komponen prototipe fisik dan eksperimen serta mengoptimalkan fase desain dalam mengembangkan produk yang lebih baik dan cepat.

## METODOLOGI

Penelitian ini berfokus pada menentukan sifat material dari *Pressure Transmitting Media* (PTM) dengan menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA). Diagram alir FEA eksperimen yang dilakukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Diagram alir eksperimen FEA.

Proses diawali dengan menentukan sifat material dari *silicone rubber* yang ada dan material nonlinear yang tersedia sebagai sifat dasar *powder*. Proses pemodelan dilakukan, kemudian dianalisis hingga menghasilkan nilai deformasi dan *stress* dari *silicone rubber* dan *powder* yang diinginkan. Hasil yang diperoleh akan menjadi arah dari sifat material cetakan *silicone rubber* yang akan dibuat. Hasil tersebut diharapkan adalah deformasi dan *stress* yang seragam pada setiap bagian PTM sehingga tekanan isostatik yang ditransfer merata ke segala arah, demikian juga untuk *powder* sehingga produk hasil kompakan memiliki densitas yang seragam pada setiap bagian. Bila hasil tidak sesuai dengan apa yang diharapkan, maka proses akan diulang dengan mengubah sifat material dari ke dua bahan tersebut.

### a. Sifat dan karakteristik material

Pada penelitian ini ada 3 (tiga) komponen yang sifat materialnya menjadi perhatian, yaitu *upper PTM*, *powder* dan *lower PTM*. *Upper punch* dianggap rigid atau memiliki kekuatan material yang jauh lebih besar dibandingkan PTM dan *powder*. Tekanan silinder hidrolik yang bekerja pada *upper punch* dianggap tidak berpengaruh.

*Upper PTM* dan *lower PTM* merupakan material yang sama, yaitu *silicone rubber*. Material karet silikon tergolong dalam elastomer atau termasuk dalam material hiper-elastis. Pendekatan dengan model Mooney-Rivlin sangat populer untuk memodelkan perilaku nonlinear dengan strain yang besar pada bahan *incompressible*.

Dikarenakan lebih fokus pada perilaku hyperelatic dari PTM (*silicone rubber*), maka pendekatan yang dilakukan pada material *powder* menggunakan nonlinear *general model*.

### b. Meshing dan model kontak

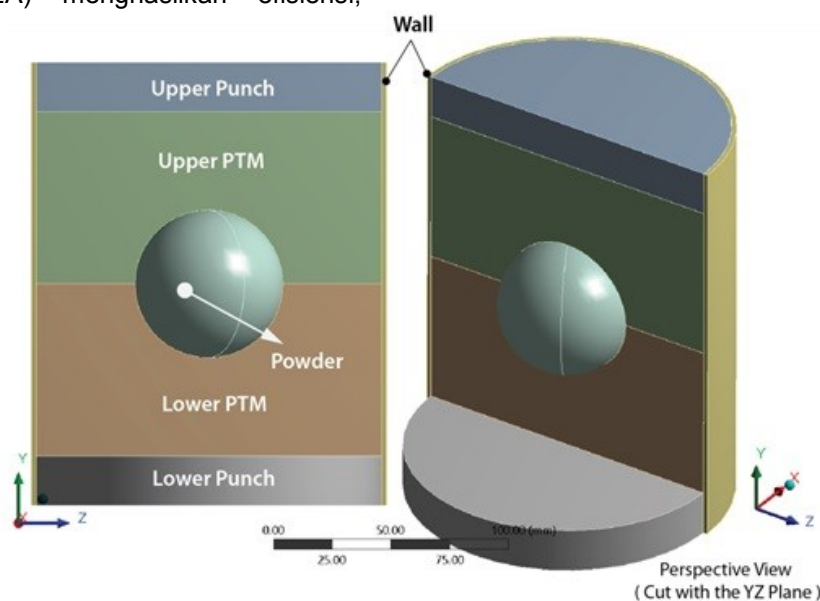
Model 3D (tiga dimensi) dari proses *quasi-isostatic pressing* yang akan dilakukan

diperlihatkan pada Gambar 3. Terdapat enam buah komponen, yaitu *upper punch*, *upper PTM*, *lower PTM*, *powder*, *lower punch* dan *wall*.

*Quasi-Isostatic Pressing* yang akan didesain menggunakan silinder hidrolis *single-acting*, sehingga komponen *lower punch* tidak bergerak. Komponen *lower punch* dan *wall* tidak dimodelkan dalam analisis ini, tetapi dirubah menjadi kondisi batas dengan sifat perilaku yang sama.

Kemajuan dalam *Finite Element Analysis* (FEA) menghasilkan efisiensi,

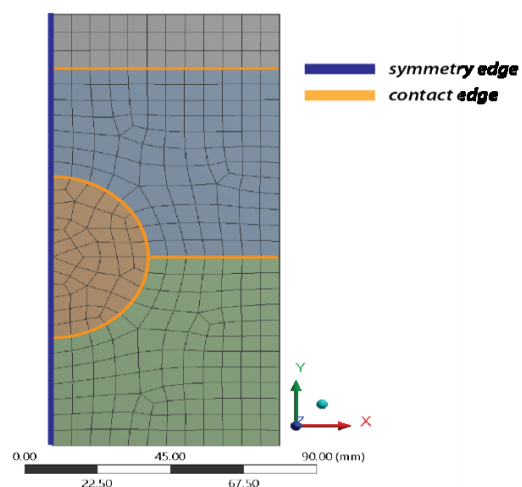
peningkatan kekuatan perangkat keras komputasi dan penyimpanan yang tersedia mengarah pada peningkatan dramatis dalam ukuran dan ruang lingkup model FEA yang dapat dijalankan. Ukurannya tercermin dalam jumlah elemen atau kepadatan *mesh* yang bisa digunakan dalam pemodelan. Ruang lingkungnya terlihat dalam jenis analisis yang dijalankan dengan adanya kecenderungan untuk menjalankan analisis yang lebih maju yang mencakup realisme yang lebih besar dan kompleks.



Gambar 3. Model potongan 3D proses kompaksi *quasi-isostatic*

Analisis maju, seperti *non-linear*, *fracture mechanics* dan lainnya, lebih menuntut sumber daya komputasi tinggi yang memungkinkan ada saat di mana komponen yang sepenuhnya dimodelkan membutuhkan waktu analisis yang sangat lama. Pada saat itu, dapat dilakukan beberapa teknik penyederhanaan model untuk mengurangi jumlah elemen, dan memungkinkan untuk menjalankan analisis kompleks dengan sumber daya yang tersedia atau waktu yang lebih cepat.

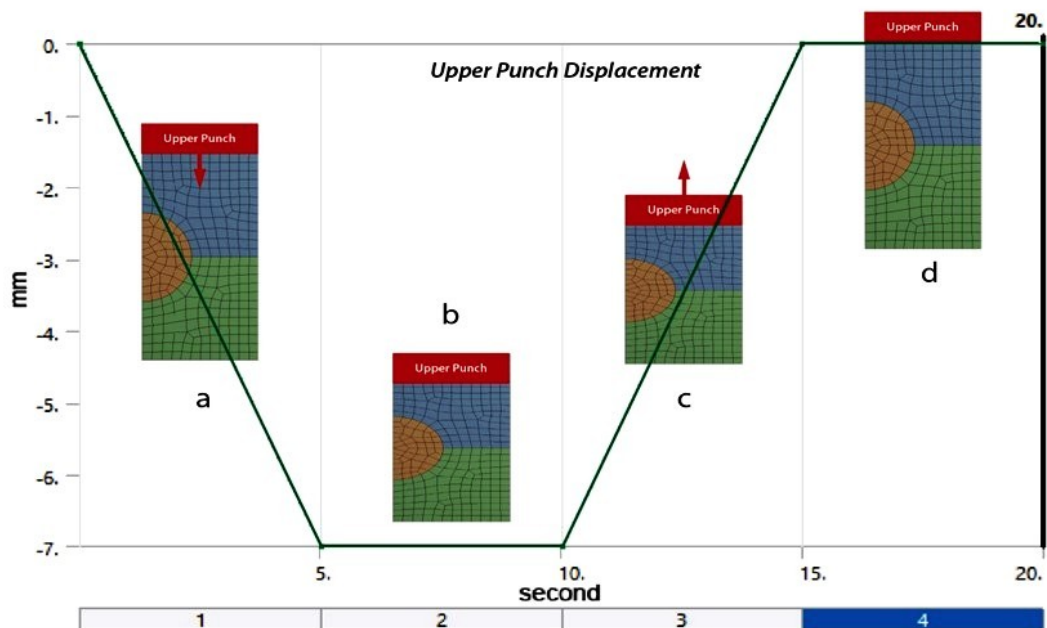
Pendekatan yang dilakukan pada penelitian ini menggunakan *symmetry 2D Plane Strain Analysis* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. 2D mesh simetri dan sudut kontak.

Gambar 5 menunjukkan pergerakan *upper punch* menekan karet silikon (PTM) dan kembali ke posisi semula. Dalam waktu 0 sampai dengan 5 detik, *upper punch* bergerak menekan karet silikon sejauh 7 mm dengan kecepatan 1,4 mm/s,

kemudian selama 5 detik *upper punch* tidak bergerak dari posisi terakhirnya. Pada detik ke 10, *upper punch* mulai bergerak kembali ke titik awalnya dengan kecepatan yang sama. Pada detik ke 15 hingga 20, *upper punch* tidak bergerak dari posisi terakhirnya.



Gambar 5. Diagram pergerakan *upper punch* terhadap waktu.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Data hasil yang ingin diperoleh dari *Finite Element Analysis* adalah total deformasi dan tegangan *equivalent stress* dari material PTM dan serbuk, namun pada penelitian ini fokus utamanya adalah material PTM yang sesuai sehingga kondisi proses *quasi-isostatic pressing* dapat diperoleh dalam proses kompaksi.

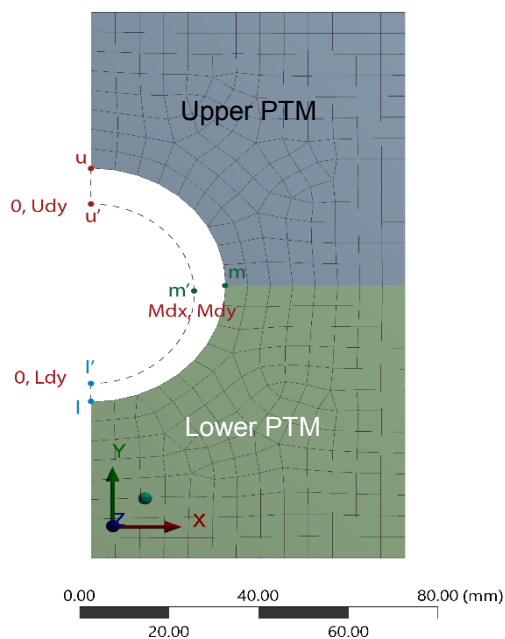
Data hasil eksperimen dengan model Mooney-Rivlin dua parameter dan tiga parameter masing-masing 9 (sembilan) kali pengulangan menggunakan perangkat lunak ANSYSdiperlihatkan pada Tabel 1. Tabel 1, menunjukkan bahwa deformasi PTM arah sumbu  $y$  pada posisi *upper punch* terbawah (menekan penuh) bagian atas  $U_{dy}$  dan bagian bawah PTM  $L_{dy}$ , sedangkan deformasi arah sumbu  $x$ ,  $M_{dy}$  dan  $M_{dx}$

nilainya sama seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6.

Hasil eksperimen *trial and error* yang diperlihatkan pada Tabel 1, dimana pada setiap eksperimen dengan variasi  $C_{10}$ ,  $C_{01}$  dan  $C_{11}$  deformasi, *stress* dan bentuk (bulat) hasil kompakan dianalisa. Dari analisa terhadap hasil eksperimen dengan kriteria distribus deformasi dan stress yang seragam diperoleh pada setiap bagian PTM serta *powder*. Distribusi deformasi dan stress yang seragam pada PTM menunjukkan bahwa tekanan isostatik merata pada setiap bagian sehingga *quasi-isotatic pressing* terjadi, untuk *powder* deformasi dan stress yang seragam menghasilkan densitas kompakan yang merata. Berdasarkan kriteria tersebut, diperoleh bahwa eksperimen ke-16 merupakan hasil terbaik yang dilakukan fitting plot dengan model Mooney-Rivlin.

Tabel 1. Data eksperimen model Mooney-Rivlin dua dan tiga parameter.

Pressure Transmitting Medium (PTM)								
Mooney Rivlin	No	Konstan				Deformasi maksimal (mm)		
		$C_{10}$ (MPa)	$C_{01}$ (MPa)	$C_{11}$ (MPa)	$D$ (1/MPa)	$U_{dy}$	$L_{dy}$	$M_{dx}, M_{dy}$
Parameter 2	1	30.03	0.114	-	1.00E-06	-6.7729	-0.24233	1.6409
	2	30	10	-	1.00E-06	-6.864	-0.14787	1.6864
	3	30	15	-	1.00E-06	-6.8966	-0.11502	1.7028
	4	30	30	-	1.00E-06	-9.9813	2.9415	-4.5334
	5	120	40	-	1.00E-06	-9.9861	2.9457	-4.5235
	6	120	60	-	1.00E-06	-9.9862	2.9459	-4.5226
	7	120	50	-	1.00E-06	-9.9862	2.9458	-4.5231
	8	120	120	-	1.00E-06	-9.9866	2.9462	-4.5208
	9	120	180	-	1.00E-06	-9.9868	2.9464	-4.5197
	10	60	30	20	1.00E-06	-10.008	2.9666	-4.4851
	11	60	30	20	1	-7.0016	-1.00E-02	1.7064
	12	60	20	20	0	-10.01	2.9689	-4.4817
Parameter 3	13	60	25	10	0	-9.9967	2.956	-4.5054
	14	60	25	1	0	-9.985	2.9449	-4.5266
	15	120	50	10	0	-9.9927	2.9521	-4.511
	16	<b>120</b>	<b>49</b>	<b>10</b>	<b>0</b>	<b>-9.9928</b>	<b>2.9521</b>	<b>-4.511</b>
	17	120	120	10	0	-9.9913	2.9507	-4.5122
	18	120	120	120	0	-10.037	2.9943	-4.4305

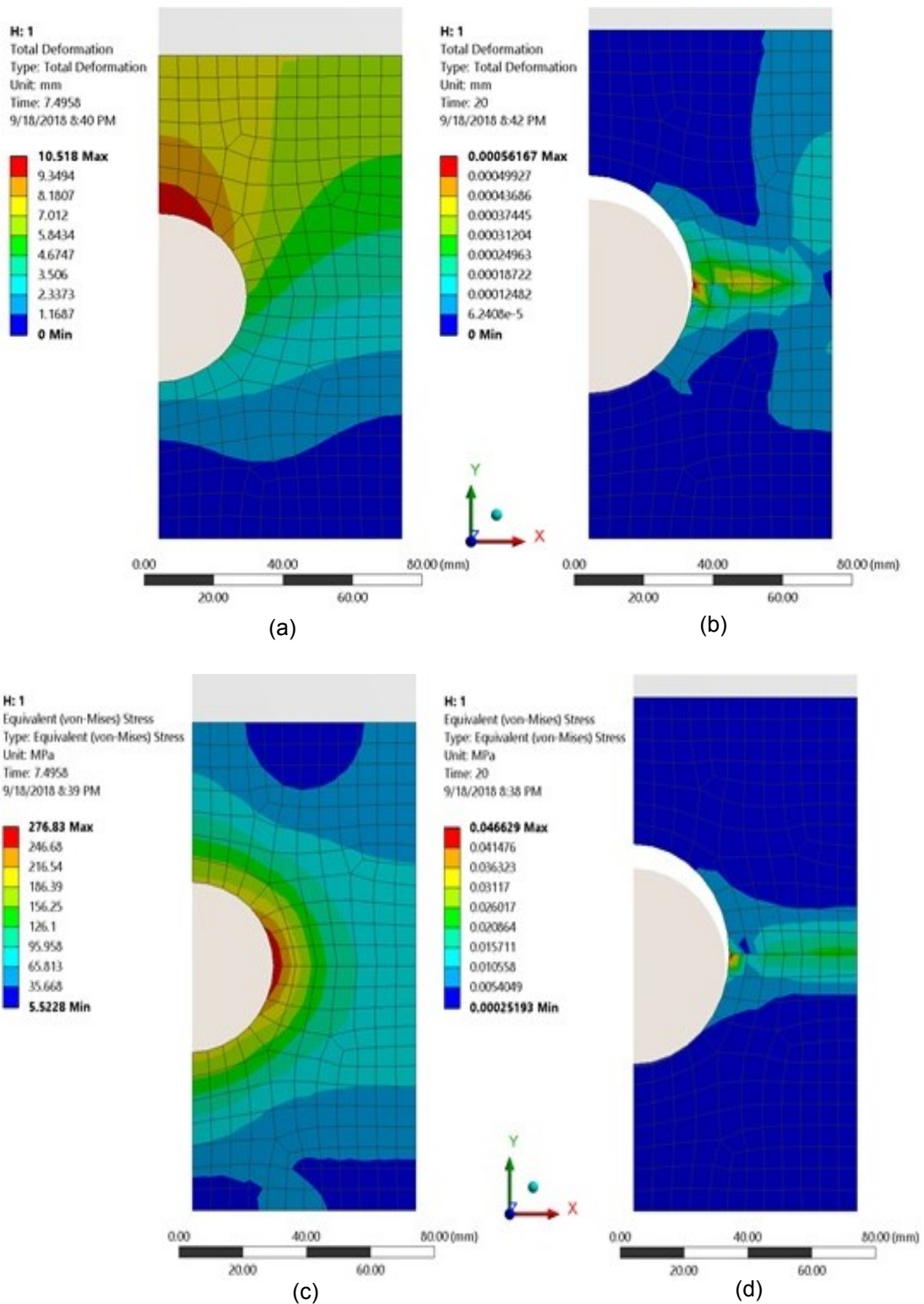


Gambar 6. Deformasi PTM arah sumbu  $y$  bagian atas dan bawah serta  $x$

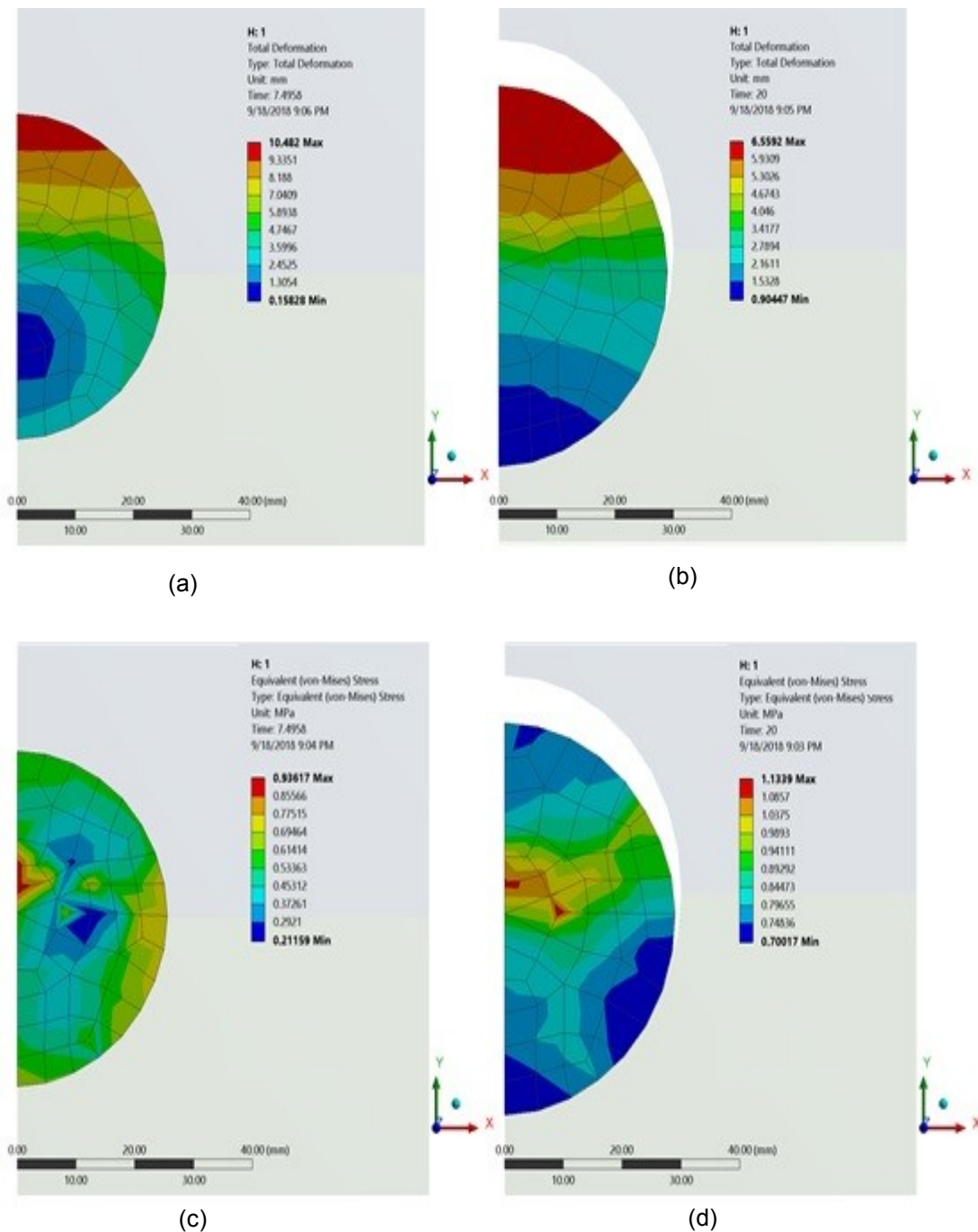
Deformasi dan stress karet silikon (PTM) ketika *upper punch* pada posisi terendah (*upper punch* menekan penuh PTM) diperlihatkan pada Gambar 7(a) dan 7(c), dimana pada saat itu terjadi deformasi dan stress dari karet silikon yang tertinggi. Pada simulasi posisi ini diambil pada waktu detik ke-7.5. Kemudian pada posisi relaksasi ketika *upper punch* pada posisi tertinggi (*upper punch* tidak menekan PTM) diperlihatkan pada Gambar 7(b) dan 7(d), dimana pada saat itu terjadi deformasi dan stress terendah dari karet silikon, posisi ini terjadi pada detik ke 20.

Pada Gambar 7, terlihat deformasi dan stress pada PTM baik pada kondisi penekanan penuh ataupun pada saat relaksasi tidak merata, hal ini menunjukkan *isostatic pressing* belum terjadi sempurna.





Gambar 7. (a) Deformasi karet silikon pada posisi *upper punch* terendah. (b) Deformasi karet silikon pada posisi *upper punch* tertinggi (relaksasi). (c) Stress karet silikon pada posisi *upper punch* terendah. (d) Stress karet silikon pada posisi *upper punch* tertinggi (relaksasi).



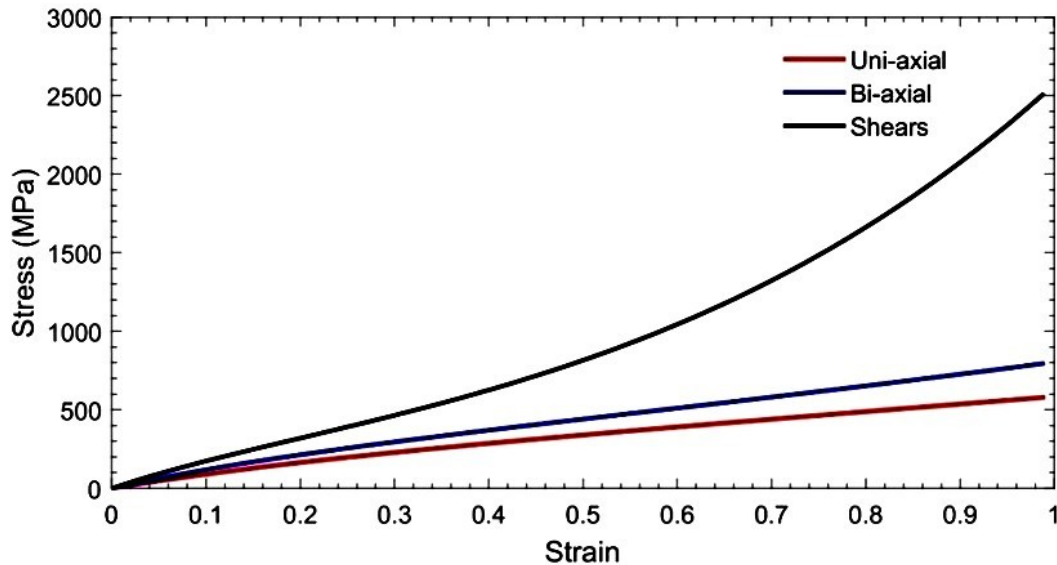
Gambar 8. (a) Deformasi serbuk grafit pada posisi *upper punch* terendah.  
(b) Deformasi serbuk grafit pada posisi *upper punch* tertinggi (relaksasi).  
(c) Stress serbuk grafit pada posisi *upper punch* terendah.  
(d) Stress serbuk grafit pada posisi *upper punch* tertinggi (relaksasi).

Sementara itu, untuk serbuk grafit, deformasi dan stress diperlihatkan pada Gambar 8. Deformasi dan stress serbuk grafit diperlihatkan pada Gambar 8(a) dan 8(c), kondisi tersebut terjadi ketika *upper*

*punch* pada posisi terendah (*upper punch* menekan penuh PTM). Pada simulasi posisi ini diambil pada waktu proses kompaksi detik ke-7.5. Kemudian pada posisi relaksasi ketika *upper punch* pada posisi tertinggi

(*upper punch* tidak menekan PTM) deformasi dan stress serbuk grafit diperlihatkan pada Gambar 8(b) dan 8(d), dimana pada saat itu terjadi deformasi dan stress terendah, kondisi ini terjadi pada detik ke 20 pada simulasi proses kompaksi. Dari Gambar 8, terlihat deformasi dan stress

serbuk grafit baik pada kondisi penekanan penuh ataupun pada saat relaksasi tidak merata, hal ini menunjukkan bahwa densitas hasil kompakan belum seragam dengan kata lain bahwa proses *quasi-isostatic pressing* belum terjadi sempurna.



Gambar 9. Stress–Strain Mooney-Rivlin 3 parameter

Hasil eksperimen *Finite Element Analysis* (FEA), diperoleh model Mooney-Rivlin tiga parameter dari material karet silikon dengan nilai  $C_{10}$  sebesar 120 MPa,  $C_{01}$  sebesar 49 MPa dan  $C_{11}$  sebesar 10 MPa. Kurva penyesuaian (*curve fitting*) untuk model Mooney-Rivlin tersebut kemudian diplotkan dan hasilnya ditunjukkan pada Gambar 9. Dengan menggunakan parameter material  $C_{10}$ ,  $C_{01}$ , dan  $C_{11}$  material PTM yang tepat akan dicari dengan plot *stress-strain* yang sesuai dengan yang diperlihatkan Gambar 9 dan divalidasi dengan eksperimen terhadap material yang dipilih. Dari hasil analisis terhadap deformasi dan stress yang terjadi selama proses kompaksi, dapat disimpulkan bahwa *quasi-isostatic pressing* belum terjadi sempurna. Walaupun demikian *curve fitting* model Mooney-Rivlin masih harus di validasi dengan data eksperimen.

## SIMPULAN

Dari hasil FEA diperoleh bahwa proses *quasi-isostatic pressing* pada kompaksi serbuk grafit masih belum terjadi secara sempurna, dimana karet silikon sebagai *Pressure Transmitting Medium* (PTM) belum mentransfer tekanan *static* secara seragam.

Masih perlu dilakukan penelitian ke depan, karena proses *quasi-isostatic* belum terjadi secara sempurna, sehingga perlu dilakukan penyempurnaan atau review terhadap parameter sifat material yang digunakan, perbaikan secara numeric dengan melakukan iterasi kembali menggunakan model *Mooney-Rivlin* 5 hingga 9 parameter atau menggunakan metode *double-acting press*.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada staf Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir–BATAN, staf Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Pancasila atas bantuan mereka selama menjalankan penelitian dan diskusi yang sangat berarti untuk kelancaran penelitian ini. Penelitian ini dibiayai oleh program Insentif Riset Nasional Flagship (Insinas Flagship, BATAN - RISTEKDIKTI) tahun 2018.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. I. Timokhova, "Design specifics of quasi-isostatic molds," *Refractories and Industrial Ceramics*, vol.47 no.6, pp.344–347, 2006.
- [2] M.I. Timokhova, "Quasi-isostatic pressing of ceramic products," *VNIIESM Series 5 Keramicheskaya Promyshlennost*, Moscow, 1990, No.1, pp.1–68,.
- [3] M.I. Timokhova, "Physical foundations of the quasi-isostatic pressing of powdered materials," *Novye Ogneupory*, No. 12, pp.12–17, 2009.
- [4] M.I. Timokhova, "Advantages of quasi-isostatic pressing for powder materials," *Refractories and Industrial Ceramics*, vol. 53, no.3, pp.147–150, 2012.
- [5] M.I. Timokhova, "Quasi-isostatic technique for powder materials," *Novye Ogneupory*, no. 11, pp. 31–34, 2003.
- [6] C. Tang et al., "Design and manufacture of the fuel element for the 10 MW high temperature gas-cooled reactor," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 218 , pp. 91–102, 2002.
- [7] H. Zhao et al., "Manufacture and characteristics of spherical fuel elements for the HTR-10," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 236, pp. 643–647, 2006.
- [8] R.W. Ogden, "Non-linear elastic deformations," Dover Publications Inc., Mineola, NY, USA, 1984.
- [9] Martins, et al., "A Comparative study of several material models for prediction of hyperelastic properties: Application to silicone-rubber and soft tissues," *Strain*, vol. 42, no. 3, pp. 135–147, 2006.
- [10] M. Mooney, "A theory of large elastic deformation," *Journal of Applied Physics*, vol. 11, 1940.
- [11] M.I. Timokhova, "Industrial technology for the automated production of grinding balls by quasi-isostatic pressing," *Refractories and Industrial Ceramics*, No. 12, pp. 7–10, 2012.
- [12] A. Khoei, R.W. Lewis "Adaptive finite element remeshing in a large deformation analysis of metal powder," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 45, no. 7, pp. 801–820, 1999.
- [13] O. Coube, H. Riedel, "Numerical simulation of metal powder diecompaction with special consideration of cracking," *Powder Metallurgy*, vol. 43, pp.123–131, 2000.
- [14] M. Szanto, et al., "Experimental based finite element simulation of cold isostatic pressing of metal powders," *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 50, pp. 405–421, 2008.