

SIMULASI DIAMETER GEL BASAH PADA FABRIKASI KERNEL *YTTRIA-STABILIZED ZIRCONIA* MENGUNAKAN ALAT GEL-CASTING

**Erilia Yusnitha¹, Sarjono¹, Sri Rinanti Susilowati¹,
Winter Dewayatna¹, Wahyudi Budi Sediawan²**

¹Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir – BATAN

Kawasan Puspipstek Serpong Gd.20 Tangerang Selatan, Banten 15314

²Departemen Teknik Kimia, Fakultas Teknik – Universitas Gadjah Mada

Jalan Grafika No.2 Yogyakarta 55281

e-mail: erilia@batan.go.id

(Naskah diterima: 19-11-2018, Naskah direvisi: 05-12-2018, Naskah disetujui: 12-12-2018)

ABSTRAK

SIMULASI DIAMETER GEL BASAH PADA FABRIKASI KERNEL *YTTRIA-STABILIZED ZIRCONIA* MENGGUNAKAN ALAT GEL-CASTING. Pada proses pembuatan kernel *yttria-stabilized zirconia* (YSZ), *broth* diteteskan melalui alat gel-casting untuk membentuk gel basah YSZ. *Broth* adalah umpan alat gel-casting yang berupa larutan terdiri dari zirconium (IV) nitrate, yttrium (III) nitrate hexahydrate, urea, tetrahydrofurfuryl alcohol (THFA), dan poly vinyl alcohol (PVA). Parameter proses alat gel-casting seperti frekuensi vibrasi dan kecepatan aliran *broth* diatur untuk memperoleh bentuk dan ukuran diameter gel basah yang diinginkan. Alat gel-casting yang berada di PTBBN BATAN memiliki satu buah *nozzle* dengan diameter 1 mm. Kegiatan simulasi ini perlu dilakukan untuk mengurangi jumlah eksperimen di laboratorium sehingga mengurangi volume limbah yang diakibatkan *trial and error* dalam eksperimen. Selain itu, simulasi ini bertujuan untuk memprediksi diameter gel basah yang dihasilkan. Oleh karena itu, simulasi diameter gel basah perlu dilakukan dan diverifikasi dengan hasil eksperimen. Berdasarkan hipotesa, simulasi diameter gel basah dapat dilakukan dengan memperhitungkan parameter alat gel-casting seperti kecepatan aliran *broth* dan frekuensi vibrasi. Selain itu karakteristik dari *broth* seperti densitas juga mempengaruhi diameter gel basah. Diameter gel basah yang dihasilkan alat gel-casting diukur menggunakan alat mikroskop digital. Diameter gel basah dari eksperimen didekati menggunakan persamaan yang dimodifikasi dengan memperhitungkan frekuensi vibrasi, kecepatan aliran *broth*, konsentrasi metal dalam *broth* dan densitas *broth*. Hasil simulasi menunjukkan penyimpangan yang lebih kecil dari simulasi menggunakan persamaan sederhana yang hanya memperhitungkan frekuensi vibrasi dan kecepatan aliran *broth*.

Kata kunci: simulasi, diameter, gel basah, *broth*, alat gel-casting

ABSTRACT

SIMULATION OF MICROSPHERE OF GELLED KERNELS DIAMETER IN THE FABRICATION OF YTTRIA-STABILIZED ZIRCONIA WITH GEL-CASTING EQUIPMENT. *In kernel fabrication, microsphere of gelled kernels (yttria-stabilized zirconia) were made by droplet formation of the broth through the gel-casting equipment. Broth is feed of gel-casting equipment that were made of mixed of zirconium (IV) nitrate, yttrium (III) nitrate hexahydrate, urea, tetrahydrofurfuryl alcohol (THFA), and poly vinyl alcohol (PVA). The process parameter of the gel-casting equipment such as vibration frequency and broth flowrate need to be set up to control shape and diameter of the targeted microsphere of gelled kernels. The gel-casting equipment at PTBBN – BATAN is equipped with single nozzle with 1 mm diameter. The simulation work is important to be carried out to reduce the number of experiments in the laboratory hence it reduces the waste from trial and error in the experiment. Moreover, the objective of this simulation work is to predict the diameter of microsphere of gelled kernels. Therefore, the simulation of microsphere of gelled kernel diameter is necessary to be build and verified with the experiment data. According to hypothesis, the simulation of microsphere of gelled kernel diameter can be conducted by considering gel-casting equipment parameter such as the broth flowrate and vibration frequency. In addition, the broth characteristic as broth density affects the diameter of microsphere of gelled kernels diameter. The diameter of microsphere of gelled kernels produced from gel-casting equipment were determined with digital microscope. The result from simulation calculation shows that diameter of microsphere of gelled kernels produced from laboratory experiment can be approached by modified equation involving vibration frequency, broth flowrate, metal concentration in the broth and broth density. It appears that the deviation of simulation calculation is smaller than simple equation, where only vibration frequency and broth flowrate are included in the calculation.*

Keywords: *simulation, diameter, microsphere of gelled kernels, broth, gel-casting equipment.*

PENDAHULUAN

Reaktor Daya Eksperimental (RDE) yang sedang dikembangkan oleh BATAN merupakan reaktor bertipe *High Temperature Gas-Cooled Reactor* (HTGR). Bahan bakar reaktor gas temperatur tinggi dapat diproduksi dalam bentuk prismatic atau *pebble* [1]. Bahan bakar *pebble* telah digunakan untuk reaktor temperature tinggi Pebble bed Module (HTR-PM), 10 MW HTR (HTR-10) di Cina [2] dan PBMR di Afrika Selatan, sedangkan bahan bakar bentuk prismatic digunakan untuk reaktor GT-MHR di Amerika dan HTTR di Jepang [1]. Bahan bakar bentuk prismatic dan *pebble* terdiri dari sejumlah besar partikel terlapisi. Bagian tengah dari partikel terlapisi adalah kernel yang dibuat dari uranium oksida (UO_2) [3, 4], uranium karbida ($UC+UC_2$) [4], uranium oksikarbida (UCO) [4,5] dan uranium nitrida [6]. Kernel ini kemudian dilapisi dengan beberapa lapisan yang terdiri dari lapisan *buffer*, lapisan *pyrolytic carbon* (IPyC and OPyC) and silikon karbida (SiC) [3,7] untuk membentuk *tri-structural isotropic* (TRISO) [7] menggunakan alat *fluidized bed chemical vapor deposition* [8,9].

Dalam produksi partikel terlapisi yang memenuhi persyaratan untuk bahan bakar reaktor gas temperatur tinggi, diperlukan produksi kernel yang memenuhi kendali kualitas dan jaminan mutu dari persyaratan kernel. Salah satu persyaratan kendali kualitas dari kernel adalah memiliki sferisitas yang baik dan penyimpangan diameter kernel yang kecil [10]. Upaya untuk keperluan eksperimen, kernel bahan bakar nuklir dapat digantikan dengan bahan non radioaktif seperti zirkonia [1,11], *yttria-stabilized zirconia* [12] dan cerium dioksida [13]. Teknik *broth-gel* untuk fabrikasi kernel ada 3 jenis yaitu gelas ekstraksi air [4], gelas internal [14] and gelas eksternal [2].

Proses pembuatan kernel yang dilakukan di Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN)-BATAN menggunakan cara

gelasi eksternal. Salah satu persyaratan kendali kualitas untuk kernel adalah kontrol diameter yang akurat. Diameter kernel berhubungan erat dengan diameter gel basah yang dihasilkan dari alat *gel-casting*. Kegiatan simulasi diameter gel basah ini dilakukan untuk mengurangi jumlah eksperimen di laboratorium, sehingga mengurangi volume limbah yang diakibatkan *trial and error* selama proses eksperimen. Hingga saat ini, belum diketahui ada karya tulis ilmiah maupun jurnal yang melakukan simulasi diameter gel basah menggunakan *yttria-stabilized-zirconia* (YSZ) untuk menentukan parameter pengoperasian alat *gel-casting* yang dimiliki PTBBN-BATAN. Perhitungan simulasi yang disediakan dalam makalah ini dapat memberikan pemahaman awal tentang cara memprediksi diameter gel basah YSZ pada berbagai parameter proses alat *gel-casting*, antara lain frekuensi vibrasi dan kecepatan aliran *broth*.

TEORI

Proses pembuatan kernel dimulai dengan preparasi *broth*. *Broth* adalah umpan alat *gel-casting* yang berupa larutan terdiri dari zirconium (IV) nitrate, yttrium (III) nitrate hexahydrate, urea, tetrahydrofurfuryl alcohol (THFA), dan poly vinyl alcohol (PVA). Pembuatan *droplet* dilakukan dengan menggunakan alat *gel-casting*. Cara kerja alat *gel-casting* ini dengan meneteskan *broth* dengan menggunakan vibrasi pada frekuensi tertentu sehingga berbentuk *droplet* ke dalam kolom yang berisi larutan ammonium hidroksida (NH_4OH) pekat untuk membentuk gel basah. *Droplet* terlebih dahulu melewati gas amoniak (NH_3), sebelum mencapai permukaan larutan amonia, dimana terjadi reaksi antara gas NH_3 dengan permukaan *droplet* yang menyebabkan permukaan *droplet* mengalami pengerasan. *Droplet* yang telah mengalami pengerasan permukaan dan setelah didiamkan beberapa saat di dalam

cairan gelas diambil dari kolom gelas pada alat gel-casting ini disebut gel basah.

Baker [4], menyatakan bahwa ukuran *droplet* dikontrol oleh diameter *nozzle*, kecepatan aliran dan frekuensi vibrasi. Wenli [15] juga menyebutkan bahwa diameter kernel UO_2 dapat dikontrol melalui pengaturan frekuensi vibrasi dan kecepatan aliran. Guogao [16], dalam makalahnya menjelaskan bahwa pH *broth*, konsentrasi metal, kecepatan aliran *broth* dan frekuensi vibrasi perlu dioptimisasi untuk mendapatkan diameter kernel yang akurat. IAEA-TECDOC-CD-1674 [17], menggunakan persamaan sederhana untuk memprediksi diameter *droplet* seperti persamaan (1).

$$d = \sqrt[3]{\frac{6 \cdot Q}{\pi \cdot f}} \quad (1)$$

dengan

- d = diameter *droplet*
- Q = kecepatan aliran *broth*
- f = frekuensi vibrasi

Berdasarkan paper yang ditulis Hao [18] terdapat persamaan untuk menghitung diameter produk akhir dari proses *casting* yang menggunakan vibrasi sinusoidal pada frekuensi dan amplitudo tertentu. Persamaan dari Hao dilakukan beberapa modifikasi untuk menghitung diameter *droplet* sehingga diperoleh persamaan (2).

$$d = 2 \cdot \sqrt[3]{\frac{C \cdot Q}{K \cdot \rho \cdot f}} \quad (2)$$

dengan

- d = diameter *droplet*
- C = konsentrasi metal dalam *broth*
- Q = kecepatan aliran *broth*
- K = konstanta karakteristik dari *nozzle* alat gel-casting
- ρ = densitas *broth*
- f = frekuensi vibrasi

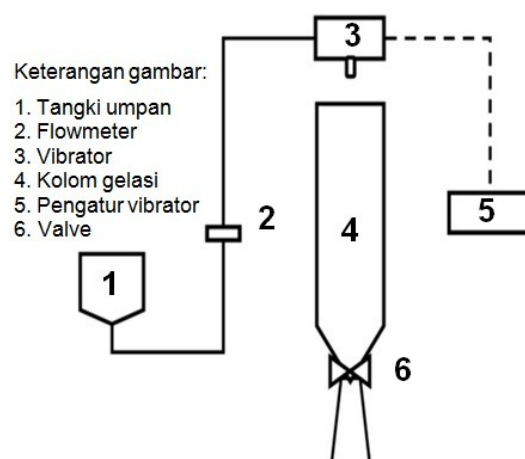
METODOLOGI

Pembuatan *broth* untuk proses *casting*

Bahan untuk pembuatan *broth* terdiri dari zirconium (IV) nitrate, yttrium (III) nitrate hexahydrate, urea, tetrahydrofurfuryl alcohol (THFA), dan poly vinyl alcohol (PVA). Konsentrasi metal dalam *broth* ditentukan dengan menimbang sejumlah bahan zirconium (IV) nitrate dan yttrium (III) nitrate hexahydrate. Densitas *broth* diukur dengan menggunakan alat densitometer.

Proses *casting*

Alat gel-casting yang dimiliki PTBBN–BATAN ditunjukkan seperti pada Gambar 1, *broth* diumpangkan melalui tangki umpan untuk selanjutnya dialirkan ke vibrator. Vibrator ini diatur pada frekuensi 100 Hz. *Broth* ditetaskan melalui satu buah *nozzle* dengan diameter sebesar 1 mm ke dalam kolom *casting* yang dialiri gas amoniak (NH_3) sebelum masuk ke larutan ammonium hidroksida (NH_4OH). Gel basah yang dihasilkan oleh alat gel-casting diukur diameternya dengan menggunakan alat mikroskop digital.



Gambar 1. Diagram alat Gel-Casting

Verifikasi hasil simulasi dengan data eksperimen di laboratorium

Pada kegiatan ini, dua persamaan matematis diambil dari referensi untuk keperluan perhitungan simulasi diameter gel

basah, kemudian hasil eksperimen di laboratorium digunakan sebagai verifikasi hasil perhitungan simulasi. Perhitungan simulasi dilakukan dengan menggunakan program komputer matlab. Pada penelitian ini dilakukan simulasi untuk mendekati nilai diameter gel basah yang dihasilkan dari hasil eksperimen di laboratorium. Ada dua simulasi yang dilakukan untuk mendekati hasil eksperimen di laboratorium yaitu simulasi berdasarkan persamaan sederhana yang terdapat pada *technical document* dari IAEA dan simulasi yang lebih kompleks berdasarkan modifikasi persamaan dari paper yang ditulis oleh Hao dengan memperhitungkan konstanta karakteristik dari *nozzle* alat casting, frekuensi vibrasi, kecepatan aliran *broth*, konsentrasi metal dalam *broth* dan densitas *broth*.

HASIL DAN PEMBAHASAN

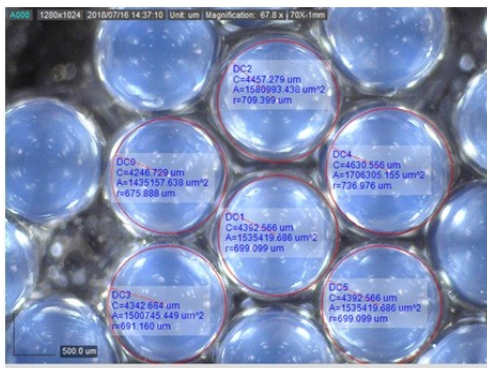
Hasil penelitian ini telah diperoleh tujuh variasi *broth* untuk kernel *yttria-stabilized zirconia* dengan spesifikasi seperti ditampilkan pada Tabel 1. Pada proses gel-casting, frekuensi vibrator yang digunakan adalah 100 Hz. Tabel 1 juga memperlihatkan kecepatan aliran *broth* yang melewati *nozzle* dan diameter rerata gel basah yang diperoleh dari eksperimen untuk setiap sampel, sedangkan mikrograf gel basah sebagai hasil analisis dari mikroskop digital untuk masing-masing sampel ditunjukkan pada Gambar 2 hingga 8.

Pada Gambar 9, ditampilkan hasil simulasi dan data eksperimen dengan variasi

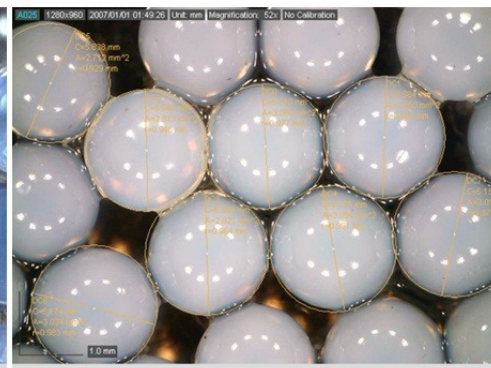
frekuensi vibrasi. Variasi diameter gel basah pada setiap sampel hasil eksperimen di laboratorium dimungkinkan karena adanya *noise* pada alat vibrator sehingga mempengaruhi frekuensi vibrasi, friksi pada pipa alat *casting* sehingga mempengaruhi kecepatan aliran *broth*. Selain itu berkurangnya volume *broth* pada tangki pengumpan alat gel-casting pada saat pembentukan *droplet* sebagai fungsi waktu juga dapat mempengaruhi kecepatan aliran *broth* sehingga menyebabkan variasi diameter gel basah. Hasil simulasi menggunakan persamaan IAEA-TECDOC-CD-1674 menunjukkan bahwa frekuensi vibrasi pada alat gel-casting yang semakin besar memberikan diameter gel basah yang semakin kecil. Hal ini sesuai dengan persamaan (1) bahwa diameter gel basah berbanding terbalik dengan frekuensi vibrasi, sehingga semakin besar frekuensi pada alat vibrasi maka gel basah yang dihasilkan akan semakin kecil. Simulasi untuk sampel no 3, 4, 5 dan 6 berhimpit karena pada kecepatan aliran *broth* yang sama yaitu $5 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Perbandingan diameter gel basah hasil simulasi dengan data eksperimen di laboratorium didapatkan penyimpangan sebesar 0,2239 (sampel 1), 0,0504 (sampel 2), 0,1710 (sampel 3), 0,1314 (sampel 4), 0,2306 (sampel 5), 0,1471 (sampel 6) dan 0,0894 (sampel 7). Dari hasil analisis ini diperoleh rerata penyimpangan antara data eksperimen dengan simulasi sebesar 0,1491.

Tabel 1. Data proses gel-casting *broth* dan diameter gel basah untuk frekuensi vibrator 100Hz.

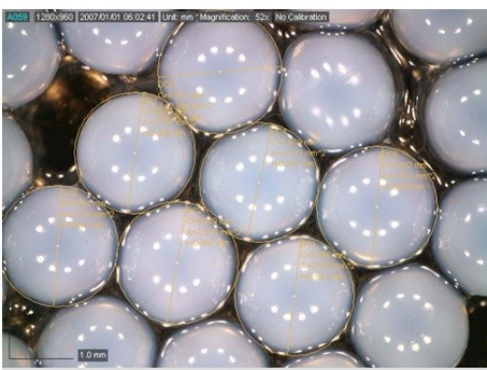
Sampel	Konsentrasi metal dalam <i>broth</i> (kg m^{-3})	Densitas <i>broth</i> (kg m^{-3})	Kecepatan aliran <i>broth</i> ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	Diameter rerata gel basah (m)
Sampel 1	184,4649	1.108,0	$2,667 \times 10^{-7}$	1,4039
Sampel 2	245,2184	1.662,0	$4,200 \times 10^{-7}$	1,9305
Sampel 3	196,9787	1.120,5	$5,000 \times 10^{-7}$	1,8797
Sampel 4	255,6532	1.480,0	$5,000 \times 10^{-7}$	1,9358
Sampel 5	266,3385	1.148,3	$5,000 \times 10^{-7}$	1,7954
Sampel 6	266,3385	1.142,3	$5,000 \times 10^{-7}$	1,9136
Sampel 7	254,1211	1.154,6	$4,500 \times 10^{-7}$	1,9219



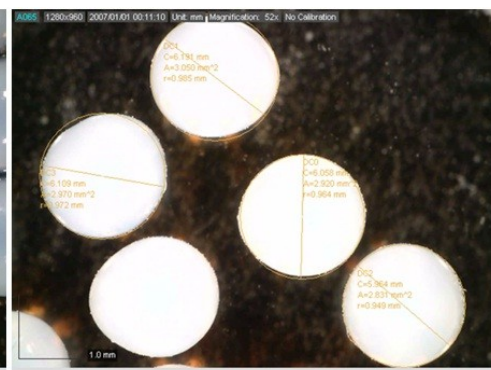
Gambar 2. Gel basah sampel 1



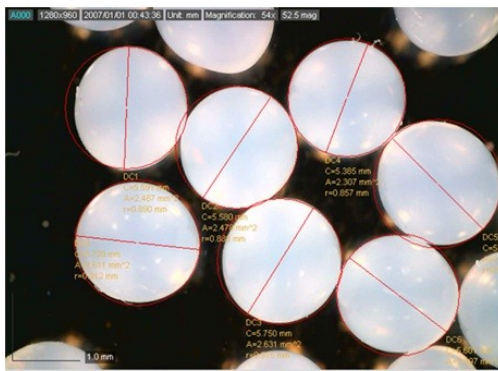
Gambar 3. Gel basah sampel 2



Gambar 4. Gel basah sampel 3



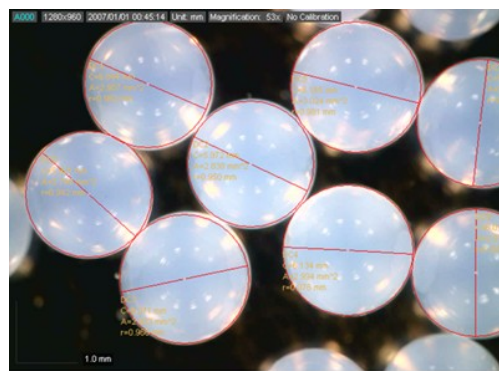
Gambar 5. Gel basah sampel 4



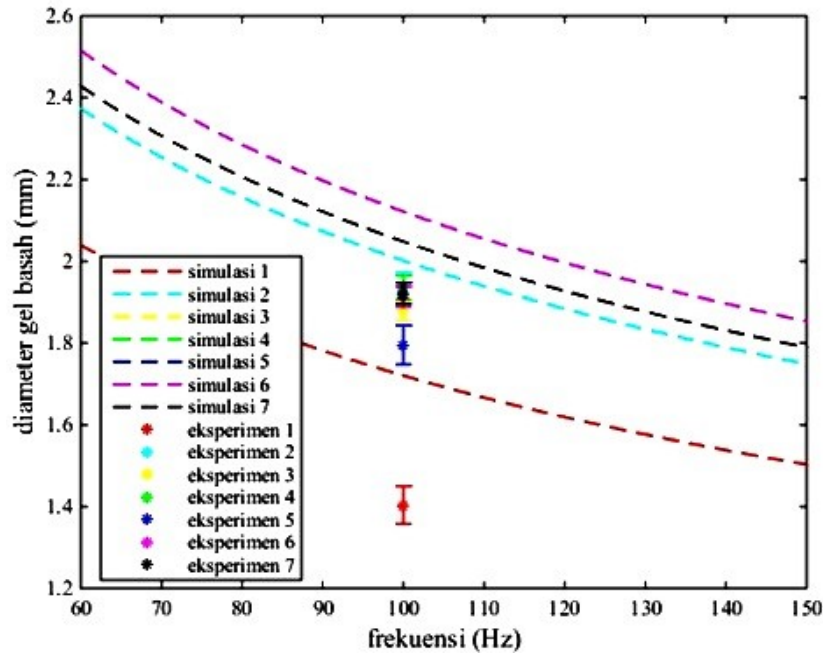
Gambar 6. Gel basah sampel 5



Gambar 7. Gel basah sampel 6



Gambar 8. Gel basah sampel 7

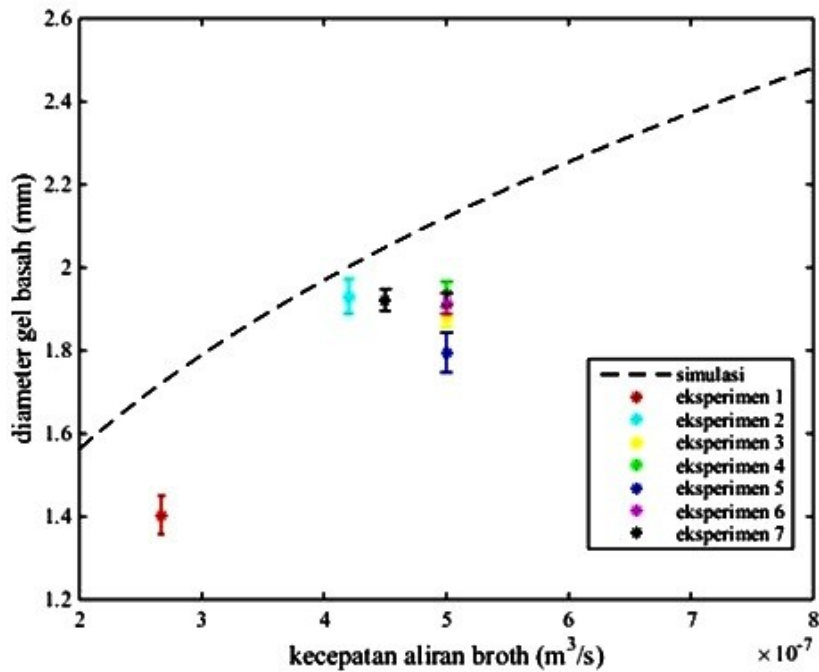


Gambar 9. Hubungan antara diameter gel basah dengan frekuensi vibrasi pada eksperimen dan hasil simulasi menggunakan persamaan dari IAEA-TECDOC-CD-1674 [17]

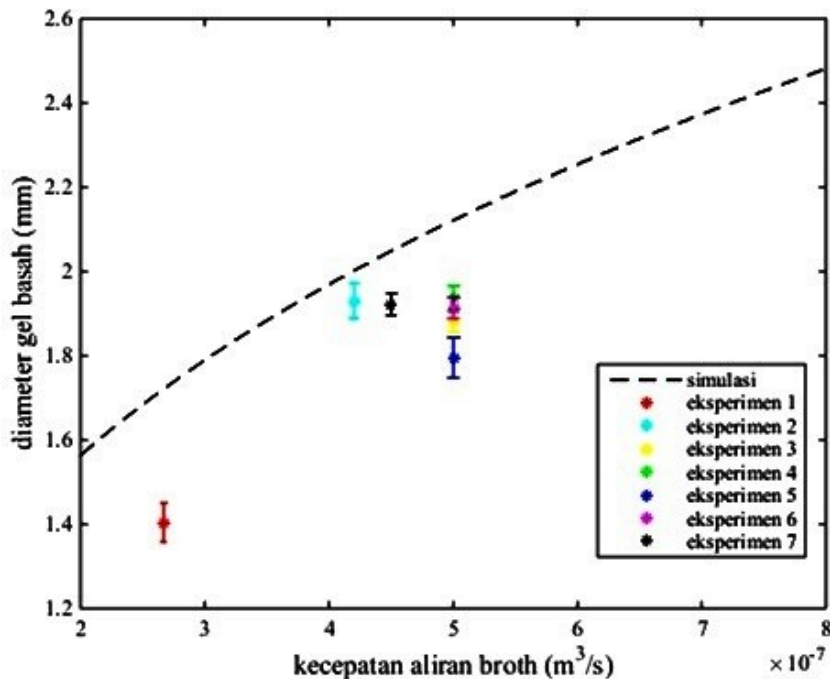
Gambar 10 menunjukkan bahwa setelah dilakukan beberapa eksperimen pada frekuensi vibrasi tetap 100 Hz dengan kecepatan aliran *broth* yang berbeda terlihat bahwa diameter gel basah yang diperoleh dari eksperimen memiliki kecenderungan yang sama dengan hasil simulasi dimana semakin besar kecepatan aliran *broth* maka akan diperoleh gel basah dengan diameter yang semakin besar. Hal ini dibuktikan bahwa pada eksperimen di laboratorium untuk sampel 1 dengan kecepatan aliran *broth* paling kecil maka diperoleh diameter gel basah paling kecil. Meskipun diameter gel basah sampel 1 dari hasil eksperimen di laboratorium diperoleh 1,4039 mm sedangkan dari simulasi sebesar 1,7206 mm sehingga ada penyimpangan sebesar 0,2239. Persamaan dari Hao selanjutnya digunakan yang sudah dimodifikasi untuk mendekati diameter gel basah yang diperoleh dari eksperimen di laboratorium.

Pada Gambar 11 terlihat bahwa hasil perhitungan simulasi untuk sampel 5 dan sampel 6 berhimpitan. Fenomena ini sudah diprediksi karena kecepatan aliran *broth*

untuk kedua sampel tersebut sama besarnya. Selain itu, karakteristik *broth* sampel 5 dan sampel 6 seperti yang sudah dijelaskan pada Tabel 1 yaitu konsentrasi metal dalam *broth* dan densitas *broth* memiliki nilai yang hampir sama besarnya. Sebagai contoh dari perhitungan simulasi diperoleh diameter gel basah untuk sampel 5 sebesar 2,0234 mm dan sampel 6 sebesar 2,0269 mm pada frekuensi vibrasi 100 Hz. Berdasarkan perhitungan diperoleh diameter gel basah hasil simulasi berdasarkan modifikasi persamaan yang tertulis pada makalah Hao dapat mendekati diameter gel basah hasil eksperimen di laboratorium. Hal ini dimungkinkan karena Hao menggunakan nilai K yaitu konstanta karakteristik dari *nozzle* alat gel-casting. Sehingga pada konstanta $K = 1,12$ memberikan rerata penyimpangan terkecil sebesar 0,0843. Untuk penyimpangan tiap-tiap sampel dibandingkan dengan hasil simulasi sebagai berikut: 0,0462 (sampel 1), 0,2041 (sampel 2), 0,0247 (sampel 3), 0,0720 (sampel 4), 0,1612 (sampel 5), 0,0801 (sampel 6) dan 0,0016 (sampel 7).



Gambar 10. Hubungan antara diameter gel basah dengan kecepatan aliran *broth* pada eksperimen dan simulasi menggunakan persamaan dari IAEA-TECDOC-CD-1674 [17]



Gambar 11. Hubungan antara diameter gel basah dengan frekuensi vibrasi, data eksperimen dengan hasil simulasi berdasarkan modifikasi persamaan dari Hao

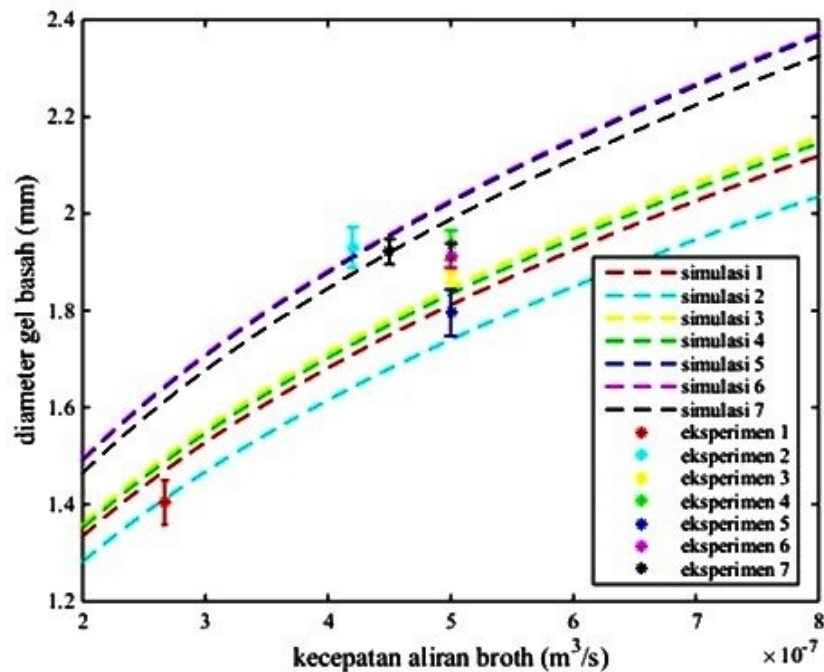
Gambar 12 menunjukkan bahwa pada simulasi sampel 5 dan sampel 6 berhimpit sama seperti Gambar 11. Sebagai contoh dari perhitungan simulasi untuk

kecepatan aliran *broth* $5 \times 10^{-7} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ diperoleh diameter gel basah sampel 5 sebesar 2,0234 mm dan sampel 6 sebesar 2,0269 mm sehingga jika ditampilkan secara

visual terlihat berhimpit. Hasil perhitungan simulasi memiliki kesesuaian dengan data eksperimen di laboratorium yaitu semakin besar kecepatan aliran *broth* maka gel basah yang dihasilkan alat gel-casting juga semakin besar.

Hubungan antara diameter gel basah dengan konsentrasi metal dalam *broth* divisualisasikan pada Gambar 13 dengan menggunakan modifikasi persamaan dari Hao untuk mendekati hasil eksperimen di laboratorium. Pada Gambar 13 terlihat bahwa baik dari perhitungan simulasi maupun dari data eksperimen di laboratorium memiliki

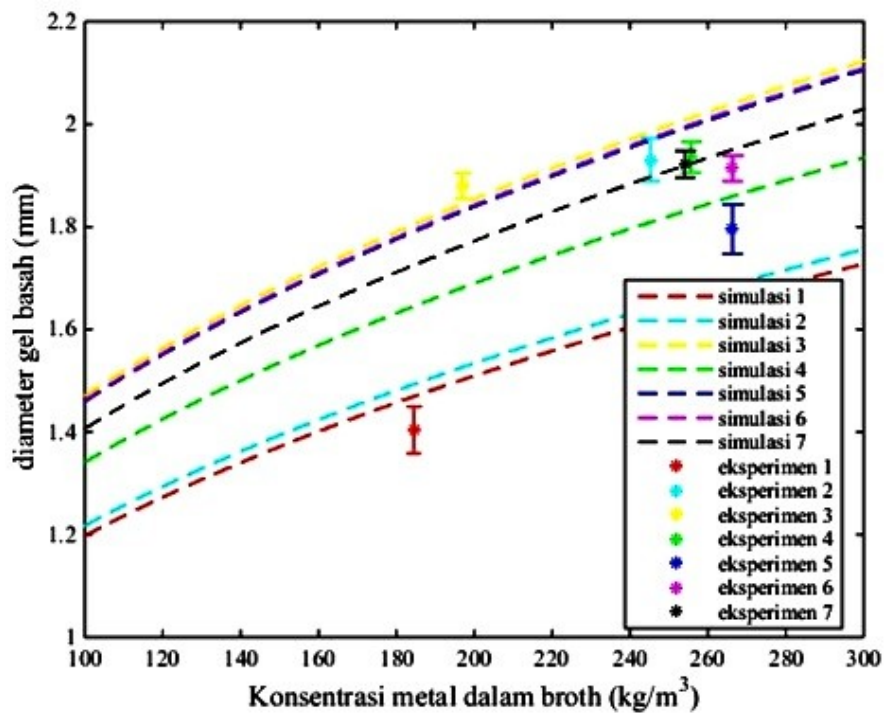
kecenderungan yang sama yaitu semakin besar konsentrasi metal dalam *broth* maka diameter gel basah yang dihasilkan alat casting juga akan semakin besar. Dari hasil perhitungan simulasi untuk konsentrasi metal dalam *broth* 200 kg/m³ diperoleh diameter gel basah untuk sampel 1=1,5094 mm, sampel 2=1,5341 mm, sampel 3=1,8542 mm, sampel 4=1,6899 mm, sampel 5=1,8391 mm, sampel 6=1,8423 mm dan sampel 7=1,7724 mm, sehingga jika divisualisasikan dalam bentuk grafik maka sampel 5 dan sampel 6 akan terlihat berhimpit.



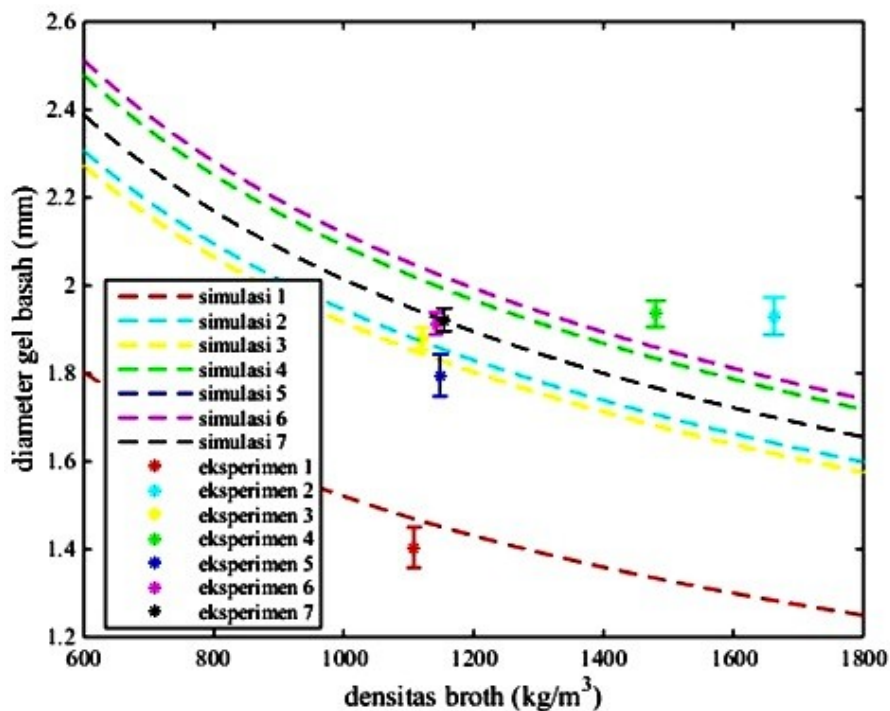
Gambar 12. Hubungan antara diameter gel basah dengan kecepatan aliran *broth*, data eksperimen dengan hasil simulasi berdasarkan modifikasi persamaan dari Hao

Untuk memberikan pengetahuan seberapa besar pengaruh densitas *broth* pada ukuran diameter gel basah yang dihasilkan alat gel-casting, dilakukan simulasi berdasarkan persamaan yang sudah dimodifikasi dari Hao pada Gambar 14. Dari perhitungan simulasi dengan menggunakan densitas *broth* semakin besar maka diameter gel basah yang diperoleh dari alat gel-casting akan semakin kecil. Sebagai contoh jika

menggunakan densitas *broth* sebesar 1200 kg m⁻³ dari hasil perhitungan simulasi diperoleh diameter gel basah untuk sampel 1=1,4307 mm, sampel 2=1,8302 mm, sampel 3=1,8031 mm, sampel 4=1,9668 mm, sampel 5=1,9939 mm, sampel 6=1,9939 mm dan sampel 7=1,8952 mm. Sehingga jika simulasi untuk sampel 5 dan sampel 6 divisualisasikan dalam bentuk grafik maka sampel 5 dan sampel 6 terlihat berhimpit.



Gambar 13. Hubungan antara diameter gel basah dengan konsentrasi metal dalam *broth*, data eksperimen dengan hasil simulasi berdasarkan modifikasi persamaan dari Hao



Gambar 14. Hubungan antara diameter gel basah dengan densitas *broth*, data eksperimen dengan hasil simulasi berdasarkan modifikasi persamaan dari Hao

SIMPULAN

Diameter gel basah hasil eksperimen di laboratorium menggunakan alat gel-casting yang dimiliki PTBBN-BATAN dapat didekati dengan menggunakan modifikasi persamaan yang diberikan oleh Hao dalam penelitiannya dengan menggunakan konstanta karakteristik dari *nozzle* alat gel-casting sebesar 1,12 sehingga memberikan rerata penyimpangan terkecil sebesar 0,0843. Bila hasil eksperimen di laboratorium didekati dengan persamaan yang diberikan di TECDOC-CD-1674 IAEA diperoleh rerata penyimpangan antara data eksperimen dengan simulasi sebesar 0,1491. Dari kedua persamaan yang digunakan dalam perhitungan simulasi dapat disimpulkan bahwa modifikasi persamaan dari Hao lebih mendekati hasil eksperimen di laboratorium dari pada persamaan dari IAEA. Hal ini menunjukkan bahwa diameter gel basah yang dihasilkan alat gel-casting dipengaruhi tidak hanya kecepatan aliran *broth* dan frekuensi vibrasi akan tetapi juga dipengaruhi densitas *broth* dan konsentrasi metal dalam *broth*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terimakasih disampaikan kepada rekan-rekan yang telah membantu melakukan penelitian di laboratorium sehingga dapat menyusun karya tulis ilmiah ini. Penelitian ini didanai oleh Kemenristek Dikti, Flagship Insinas BATAN tahun 2018.

DAFTAR PUSTAKA

- [1]. W. K. Kim, Y. W. Lee, M. S. Cho, "Nondestructive measurement of the weight of kernels in a simulated cylindrical fuel compact for HTGR using X-ray computed tomography," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 241, no.9, pp. 3748-3752, 2011.
- [2]. Z. Xiangwen, *et al.*, "Preparation of ammonium diuranate particles by external gelation process of uranium in INET," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 250 (Supplement C), pp. 192-196, 2012.
- [3]. G. Brähler, *et al.*, Improvements in the fabrication of HTR fuel elements, "*Nuclear Engineering and Design*," vol. 251 (Supplement C), pp. 239-243, 2012
- [4]. M. P. Baker, *et.al*, "Selection and properties of alternative forming fluids for TRISO fuel kernel production," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 432, no. 1, pp. 395-406, 2013.
- [5]. J. A. Phillips, S. G. Nagley, and E. L. Shaber, "Fabrication of uranium oxycarbide kernels and compacts for HTR fuel," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 51(Supplement C), pp. 261-281, 2012.
- [6]. M. Brykala, and M. Rogowski, "Preparation of microspheres of carbon black dispersion in uranyl-ascorbate gels as precursors for uranium carbide," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 89(Supplement C), pp. 132-139, 2016.
- [7]. N. N. Ngoepe, and J. P. R. de Villiers, "The thermal expansion of 3C-SiC in TRISO particles by high temperature X-ray diffraction," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 438, no. 1, pp. 88-93, 2013.
- [8]. T. J. Gerczak, *et al.*, "SiC layer microstructure in AGR-1 and AGR-2 TRISO fuel particles and the influence of its variation on the effective diffusion of key fission products," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 480(Supplement C), pp. 257-270, 2016.
- [9]. E. López-Honorato, P.J. Meadows, and P. Xiao, "Fluidized bed chemical vapor deposition of pyrolytic carbon – I:Effect of deposition conditions on microstructure," *Carbon*, vol. 47, no.2, pp. 396-410, 2009.
- [10]. G. Wenli, *et al.*, "Diameter deviation calculation for UO₂ kernel by sol-gel process. *Nuclear Engineering and Design*, vol. 241, no. 8, pp. 2964-2967, 2011.

-
- [11]. K. Bari, *et al.*, "Characterization of the porosity in TRISO coated fuel particles and its effect on the relative thermal diffusivity," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 265 (Supplement C): pp. 668-674, 2013.
- [12]. M. P. Baker, *et al.*, "Straight-chain halocarbon forming fluids for TRISO fuel kernel production—tests with yttria-stabilized zirconia microspheres," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 458 (Supplement C), pp. 77-86, 2015.
- [13]. R. D. Hunt, *et al.*, "Key process parameters to modify the porosity of cerium dioxide microspheres formed in the internal gelation process," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 495, pp. 33-37, 2017
- [14]. R.D. Hunt, *et al.*, "The addition of silicon carbide to surrogate nuclear fuel kernels made by the internal gelation process," *Journal of Nuclear Materials*, vol. 401, no.1, pp. 55-59, 2010.
- [15]. G. Wenli, *et al.*, "Preparing UO₂ kernels by gel-casting. *Nuclear Science and Techniques*, vol. 20, pp. 124-128, 2009.
- [16]. W. J. Guogao, M. Yong, G. Xingyu, S. Zhao, C. H. Deng, "Precisely Controlling Preparation of Ceria-Stabilized Zirconia Microspheres of ~100 micron by external gelation," *International Journal of Applied Ceramic Technology*, pp. 1-7, 2016.
- [17]. IAEA, IAEA-TECDOC-CD-1674, 2012.
- [18]. S. Hao, *et al.*, "Large-scale production of UO₂ kernels by sol-gel process at INET," *Nuclear Engineering and Design*, vol. 271, pp. 158-161, 2014.