

ANALISIS RANCANGAN DAN PEMBUATAN REAKTOR SINTER KERNEL UO₂

Moch Setyadji, Setyo Atmojo, Triyono

Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan BATAN
Jl. Babarsari Kotak Pos 6101 ykbb, Yogyakarta 55281

Diterima 6 Januari 2010, diterima dalam bentuk perbaikan 18 Januari 2010, disetujui 19 Januari 2010

ABSTRAK

ANALISIS RANCANGAN DAN PEMBUATAN REAKTOR SINTER KERNEL UO₂. Telah dilakukan analisis rancangan, perhitungan dan pembuatan reaktor sinter kernel UO₂ yang diawali modeling operasi reaktor sinter untuk mendapatkan distribusi suhu dan tegangan (stress) pada reaktor tabung sehingga reaktor aman apabila dioperasikan pada suhu sekitar 1500°C sampai dengan 1600°C. Sintering kernel UO₂ dilakukan dalam reaktor sinter pada suhu sekitar 1500°C (0,6-0,7 kali titik leleh kernel UO₂), oleh karena itu reaktor sinter yang tersedia harus dapat beroperasi sekitar 1600°C. Untuk bisa menghasilkan suhu 1600°C diperlukan 8 elemen pemanas dengan spesifikasi Moly-D, Le: 170, D: 33, A: 25, I square R, 716-542-5511. Geometri reaktor sinter berbentuk tabung (pipa) diameter dalam, $d_i = 8,0$ cm dan diameter luar, $d_o = 9$ cm, volume reaktor sinter $\phi \cdot d_i \cdot L$ ($L =$ panjang reaktor tabung). Model matematika untuk menghitung distribusi suhu dan stress pada reaktor sinter berbentuk tabung berupa persamaan diferensial $d^2T/dx^2 = h \cdot p / k \cdot A \cdot (T - T_s)$. Dimana $T =$ suhu tabung, $T_s =$ suhu lingkungan, $h =$ koefisien perpindahan panas konveksi alam, $p =$ perimeter tabung dan $k =$ konduktivitas bahan alumina. Reaktor sinter kernel UO₂ dilengkapi dengan gambar teknik komponen reaktor sinter, gambar sistem kelistrikan dan panel kontrol listrik untuk mengontrol suhu dan tekanan operasi reaktor.

Kata kunci : Rancang bangun, reaktor sinter, kernel UO₂

ABSTRACT

DESIGN AND CONSTRUCTION OF UO₂ KERNELS SINTER REACTOR. Design analysis, computation and manufacture of UO₂ kernels sinter reactor has been done that was begun by modeling of operating sinter reactor to get the temperature and stress distribution of sintering on the reactor tube so that the reactor is safe when operated at a temperature of about 1500°C to 1600°C. Sintering of UO₂ kernels is performed in the sinter reactor at temperatures around 1500°C (0,6-0,7 times the melting point of UO₂ kernels), therefore the available sinter reactor should be able to operate approximately 1600°C. To generate 1600°C of temperature, 8 heating elements are required with Moly-D specification, Le: 170, D: 33, A: 25, I square R, 716-542-5511. Sinter reactor geometry is tubular (pipe) with inside diameter, $d_i = 8.0$ cm and outer diameter, $d_o = 9$ cm, sinter reactor volume is $\phi \cdot d_i \cdot L$ ($L =$ length of reactor tube). Mathematical model to calculate temperature and stress distribution in the sintered tubular reactor in the form of differential equation is $d^2T/dx^2 = h \cdot p / k \cdot A \cdot (T - T_s)$. Where $T =$ temperature of the tube, $T_s =$ ambient temperature, $h =$ heat transfer coefficient of natural convection, $p =$ tube perimeter and $k =$ conductivity of the alumina material. UO₂ kernels sinter reactor equipped with technical drawing of sinter reactor components, electrical systems drawing and electrical control panels to control temperature and pressure of the reactor operation.

Keywords : Design, construction, sinter reactor, UO₂ kernel

PENDAHULUAN

Pemanfaatan nuklir di bidang energi menjadi penting setelah dikeluarkannya Perpres 5/2006 tanggal 25 Januari 2006 tentang Sasaran Kebijakan Energi Nasional diantaranya terwujudnya energi (primer) mix yang optimal pada 2025 dengan peran EBT: Bahan bakar nabati (*biofuel*) menjadi > 5%, panas bumi >5%, energi baru dan terbarukan lainnya, khususnya biomassa, nuklir, energi air, energi surya, dan energi angin menjadi >5%, dan batubara yang dicairkan >2%. Pembangunan PLTN akan menjadi lokomotif penarik kegiatan nuklir lainnya di Indonesia, seperti penambangan bahan nuklir, pembuatan bahan bakar nuklir, pembuatan bahan dukung reaktor, pengelolaan limbah dan kegiatan daur bahan bakar nuklir yang lain, serta mendorong tumbuhnya industri-industri padat energi, seperti industri metalurgi, pengolahan petrokimia dan pengolahan sumber daya alam lainnya seperti batubara muda, produksi hidrogen sebagai alternatif bahan bakar dsb.

Dibanding dengan reaktor nuklir jenis lainnya, reaktor suhu tinggi (RST) mempunyai kelebihan teknis lebih unggul^(2,3,4). Dari segi keselamatan menganut azas *passive safety* dan reaktivitas negatif, maksudnya daya dan suhu teras reaktor turun jika terjadi kegagalan pendinginan teras. Pengisian bahan bakar RST dapat dilakukan secara kontinyu, sehingga reaktor tidak perlu *shut down* (berhenti). Disamping itu reaktor RST menghasilkan daya dalam bentuk listrik, gas panas/uap panas sehingga dapat digunakan untuk proses industri, seperti : "thermo cracking" (proses pemecahan hidrokarbon tinggi menjadi hidrokarbon rendah), gasifikasi batubara, distilasi, peleburan dan proses industri kimia lain, produksi bahan bakar alternatif hidrogen. Modul reaktor ini dapat didirikan di kawasan industri, untuk penyediaan energinya. Salah satu bahan bakar yang digunakan dalam RST adalah elemen bakar berbentuk bola yang berisi kernel UO_2 yang telah dilapisi PyC dan SiC dalam matriks grafit. Agar program tersebut dapat berhasil dengan baik maka diperlukan penguasaan pengetahuan mengenai pembuatan elemen bakar berbentuk bola, mulai dari pembuatan kernel UO_2 hingga fabrikasi elemen bakar bentuk bola. Pembuatan kernel UO_2 dalam kegiatan ini dilakukan dengan metode gelas internal maupun eksternal. Beberapa penelitian telah dikerjakan mulai dari pelarutan, pembuatan larutan umpan sol, proses gelas, aging, pengeringan dan kalsinasi hingga diperoleh butiran U_3O_8 maupun kernel UO_2 ^(6,6,7). Penelitian sebelumnya telah dilakukan optimasi berbagai variabel proses dan operasi untuk memperoleh hasil kernel yang baik serta memenuhi spesifikasi sebagai elemen bakar RST. Variabel yang belum diteliti antara lain pada proses sintering, pelapisan PyC dan SiC serta proses pembuatan elemen bakar bentuk bola dalam matrik grafit. Penelitian sintering kernel UO_2 belum dilakukan karena belum tersedia reaktor sinter. Untuk itu akan dilakukan pembuatan reaktor sinter kernel UO_2 yang diawali dengan melakukan analisis rancangan sistem pemanas tungku untuk sintering kernel UO_2 yang mampu beroperasi pada suhu 1500-1600 °C^(8,9,10).

METODOLOGI

1. Pemahaman proses pembuatan bahan bakar Reaktor Suhu Tinggi (RST)

Coated particle untuk bahan bakar reaktor suhu tinggi dibuat melalui proses sol-gel dilanjutkan dengan aging, pengeringan, kalsinasi, reduksi dan sintering untuk mendapatkan kernel UO_2 tersinter yang memenuhi persyaratan *performance specification*. Kernel tersinter yang sudah memenuhi spesifikasi sebagai kernel tersinter dikenakan proses pelapisan pirokarbon dan silika karbida. Pada partikel terlapisi bahan bakar RST, mempunyai beberapa lapisan yaitu pirokarbon densitas rendah sebagai *buffer*, pirokarbon densitas tinggi bagian dalam (*inner pyrocarbon*), silika karbida dan pirokarbon densitas tinggi bagian luar (*outer pyrocarbon*).

2. Pemahaman mekanisme proses sintering kernel UO_2

Sintering kernel UO_2 dilakukan dalam reaktor sinter pada suhu sekitar 1500°C (0,6-0,7 kali titik leleh kernel UO_2), oleh karena itu reaktor sinter yang tersedia harus dapat beroperasi sekitar 1600°C.

3. Penyusunan persamaan diferensial perpindahan panas pada tabung alumina (untuk mengetahui distribusi suhu pada reaktor tabung alumina)

Model matematika untuk menghitung distribusi suhu (perpindahan panas) pada reaktor sinter berbentuk tabung berupa persamaan diferensial :

$$d^2T/dx^2 = h.p/k.A.(T-T_s). \quad (1)$$

dimana T : suhu tabung, T_s : suhu lingkungan, h : koefisien perpindahan panas konveksi alam, p : perimeter tube, A : luas permukaan perpindahan panas konduksi dan k : konduktivitas bahan alumina.

4. Penyelesaian persamaan diferensial dengan analitik/numerik :

$$\frac{T - T_u}{T_o - T_u} = \frac{\cosh m(L - X) + \frac{h}{mk} \sinh m(L - X)}{\cosh mL + \frac{h}{mk} \sinh mL} \quad (2)$$

$$\text{dengan } m^2 = h.p/k.A \quad (3)$$

5. Penentuan geometri, kapasitas dan dimensi reaktor sinter

Dengan pertimbangan optimasi luasan ruang pemanas yang terdiri dari 8 elemen pemanas (gambar 1 dan gambar 2), maka dipilih geometri reaktor sinter berbentuk tabung (pipa) terbuat dari alumina, (diameter

- dalam, $d_i = 8,0$ cm dan diameter luar, $d_o = 9$ cm) yang berfungsi sebagai reaktor sinter dengan kapasitas $2.\phi.r_i.L$ (r_i = jari-jari dalam tabung & L = panjang reaktor tabung).
- Dengan pertimbangan penurunan suhu, ketahanan *seal* karet dan estetika, maka panjang tabung alumina dari ruang pemanas (chamber) diperkirakan antara 50-100 cm. Agar tidak terjadi kebocoran pada reaktor maka pembuatan tutup reaktor tabung dilengkapi dengan *seal* karet tahan suhu tinggi dan pendingin air (gambar 3 dan gambar 4).
 - Perhitungan koefisien perpindahan panas konveksi
Koefisien perpindahan panas konveksi dapat dihitung menggunakan pendekatan persamaan empiris

$$h = Nu \cdot k / d_o \tag{4}$$
 Dengan, $Nu = c.(Gr.Pr)^n$. (5)
 Gr : angka Grashof, Pr : angka Prandtl, c & n : konstanta,

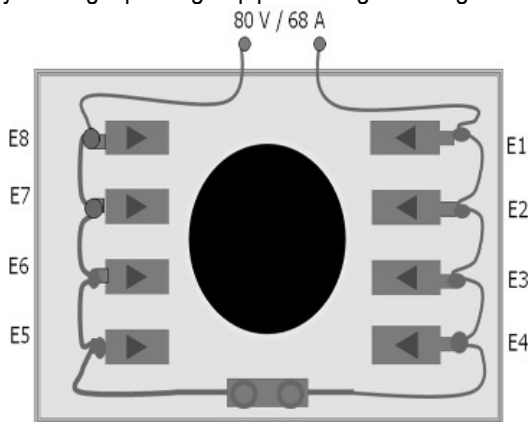
$$Gr = \beta \cdot g \cdot \Delta T \cdot d^3 / \nu^2 \tag{6}$$

$$\nu = \mu / \rho \tag{7}$$
 - Perhitungan distribusi suhu pada tabung pemanas pada berbagai variasi panjang tabung.
Model matematik distribusi suhu axisy metrik dua dimensi sebagai berikut :

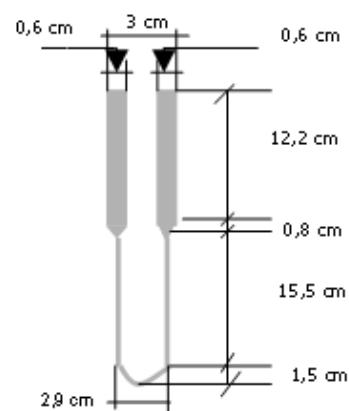
$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rk \frac{\partial T}{\partial r}) + \frac{\partial}{\partial z} (k \frac{\partial T}{\partial z}) - h(T - T_f) + Q'''t = 0 \tag{8}$$
 dengan k : konduktivitas termal, r : jari – jari tabung, t : tebal tabung, h : koefisien perpindahan panas konveksi, Q''' : sumber panas di dalam benda dan T_f : suhu fluida
 - Perhitungan *thermal* & *stress* pada reaktor sinter
 - Pembuatan panel kontrol (gambar 7 dan gambar 8) dan konstruksi reaktor sinter (gambar 10).
 - Evaluasi dan pembuatan laporan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

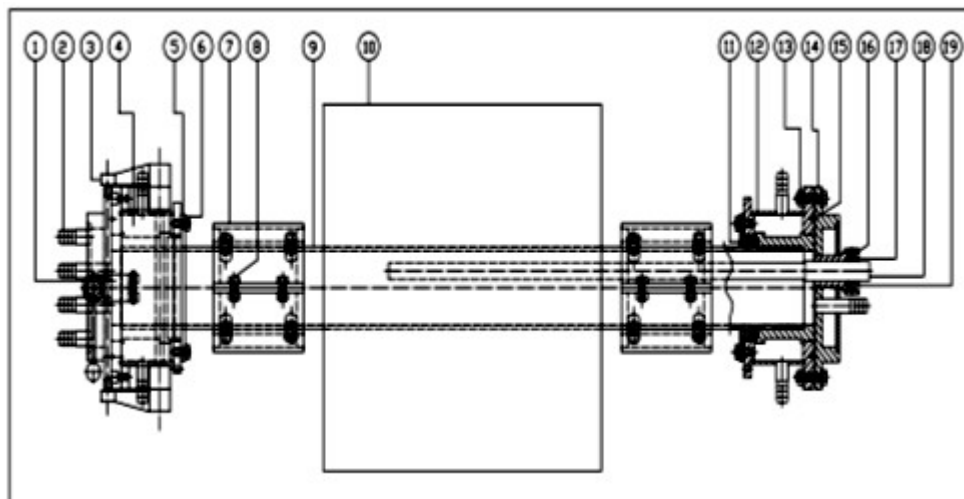
Dalam rancangan pembuatan reaktor kernel UO_2 ini sebagai sumber pembangkitan panas digunakan elemen pemanas. Elemen pemanas sebanyak 8 buah (dengan spesifikasi material: Moly-D, Le: 170, D: 33, A: 25, I square R, 716-542-5511, Heraeus) membangkitkan panas dengan suhu $1600^\circ C$. Panas ini digunakan untuk memanaskan tabung alumina (diameter dalam, $d_i = 8,0$ cm dan diameter luar, $d_o = 9$ cm) yang berfungsi sebagai reaktor sinter. Geometri reaktor sinter berbentuk tabung (pipa) kapasitas $2.\phi.r_i.L$ (r_i = jari-jari dalam tabung). Panjang tabung alumina disesuaikan dengan hasil perhitungan distribusi suhu sepanjang tabung dan penggunaan pendingin (air) pada ujung tabung. Distribusi suhu pada tabung alumina diketahui berdasarkan penyusunan persamaan matematis yang dapat mendiskripsikan secara kuantitatif perpindahan panas dari sumber panas ke sekeliling. Reaktor sinter yang mempunyai karakteristik suhu sebagaimana tersebut di atas di dalamnya dilengkapi dengan pipa aliran gas hidrogen atau argon.



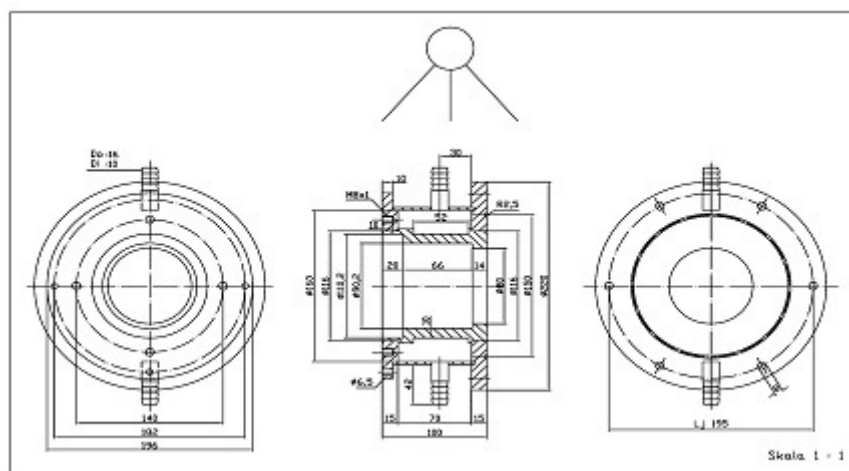
Gambar 1. Susunan elemen pemanas



Gambar 2. Bentuk fisik elemen pemanas



Gambar 3. Reaktor sinter kernel UO_2



Gambar 4. Tutup tabung alumina reaktor sinter kernel UO_2

Data spesifikasi material alumina (Al_2O_3) disajikan pada tabel 1.

Tabel 1: Data spesifikasi tabung alumina

No.	Spesifikasi material alumina	Kuantitas (dimensi)
1	Diameter tabung luar	0.09 m
2	Diameter tabung dalam	0.080 m
3	Kecepatan aliran pendingin	0.12 m/det
4	Konduktivitas panas	15.5 Kkal/m det °C
5	Modulus Young	3E10 Kg / m ²
6	Ekspansi panas	8.1E-6 / ° C
7	Poisson ratio	0.21

Penentuan panjang tabung dari ruang pemanas dilakukan dengan menghitung distribusi suhu pada tabung alumina menggunakan persamaan 1, 2 dan 3. Hasil perhitungan disajikan pada tabel 2.

Tabel 2: Data perhitungan hubungan panjang tabung dari sumber panas dengan suhu, pada ujung tabung tanpa air pendingin

No.	Panjang tabung (cm)	Suhu pada ujung tabung ($^{\circ}C$)
1	0	1600
2	50	487
3	75	213
4	100	102
5	125	58
6	150	41

Dari data pada tabel 2 di atas terlihat bahwa pada panjang tabung 100 cm, maka suhu pada ujung tabung sudah relatif rendah (sekitar $100^{\circ}C$), sehingga masih cukup aman untuk *seal* karet walaupun tanpa pendinginan pada ujung tabung. Namun demikian dari segi pemakaian (operasional) tidak menguntungkan (menambah kesulitan), disamping itu dari segi estetika kurang baik. Oleh karena itu perlu dilakukan pendinginan pada ujung tabung agar diperoleh reaktor tabung yang lebih pendek dan aman (suhu pada ujung tabung sekitar suhu kamar). Perhitungan distribusi suhu dan tegangan maksimal pada reaktor tabung yang dilengkapi pendingin air pada ujung tabung menggunakan persamaan 1, 4, 5, 6, 7 dan 8 dengan program aplikasi berbasis metoda elemen hingga (MEH) dan ANSYS.

Hasil analisis dan perhitungan berupa nilai distribusi suhu dan tegangan tanpa isolasi pada reaktor sinter bentuk tabung diameter dalam 8 cm (bahan dari alumina) untuk berbagai variasi ukuran panjang tabung dan pendingin. Kondisi tabung alumina dengan spesifikasi elastisitas sebesar $3 \times 10^{10} \text{ Kg/m}^2$ dan konduktivitas panas (K) = $15.5 \text{ Kkal/m det } ^{\circ}C$ diperoleh harga masing-masing seperti tertera pada tabel 2 di bawah. Sebagai referensi digunakan harga tegangan tungku reduksi sebesar $\sim 0.3E8 \text{ Kg/m}^2$ dan hasil simulasi distribusi tegangan tertinggi untuk berbagai variasi pendinginan disajikan pada gambar 9, table 3 dan table 4.

Tabel 3. Suhu ujung tabung pada berbagai kondisi tabung alumina tanpa isolasi

No.	Panjang tabung	Suhu ujung tabung ($^{\circ}C$)
1.	$L_{\text{tube}} = 0.5 \text{ m}, L_{\text{cool}} = 0.1 \text{ m}$	30
2.	$L_{\text{tube}} = 0.5 \text{ m}, L_{\text{cool}} = 0.15\text{m}$	29
3.	$L_{\text{tube}} = 0.6 \text{ m}, L_{\text{cool}} = 0.10\text{m}$	30
4.	$L_{\text{tube}} = 0.6 \text{ m}, L_{\text{cool}} = 0.15\text{m}$	30

Tabel 4. Harga tegangan pada berbagai kondisi tabung alumina tanpa isolasi

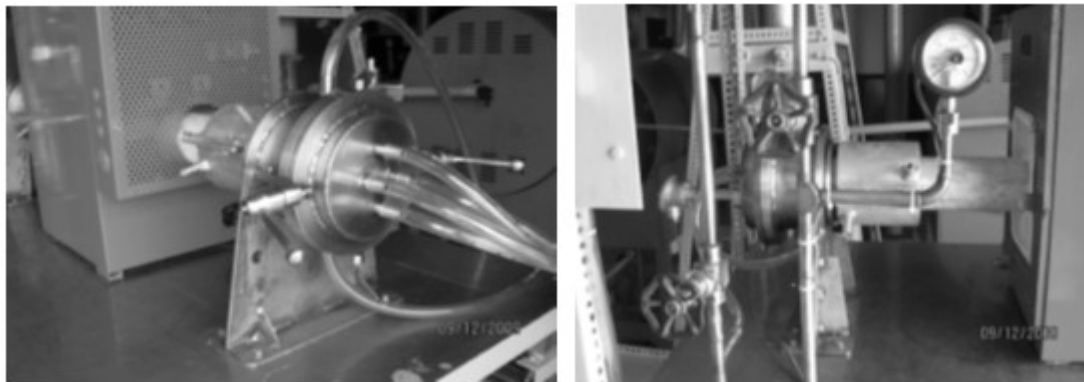
No.	Panjang tabung	Tegangan (Kg/m^2)
1.	$L_{\text{tube}} = 0.5 \text{ m}, L_{\text{cool}} = 0.1 \text{ m}$	$0.324 \cdot 10^{-8}$
2.	$L_{\text{tube}} = 0.5 \text{ m}, L_{\text{cool}} = 0.15\text{m}$	$0.341 \cdot 10^{-8}$
3.	$L_{\text{tube}} = 0.6 \text{ m}, L_{\text{cool}} = 0.10\text{m}$	$0.695 \cdot 10^{-8}$
4.	$L_{\text{tube}} = 0.6 \text{ m}, L_{\text{cool}} = 0.15\text{m}$	$0.697 \cdot 10^{-8}$

Tabel 5. Harga tegangan pada berbagai kondisi tabung alumina dengan memberi isolasi 20 cm pada pangkal tabung

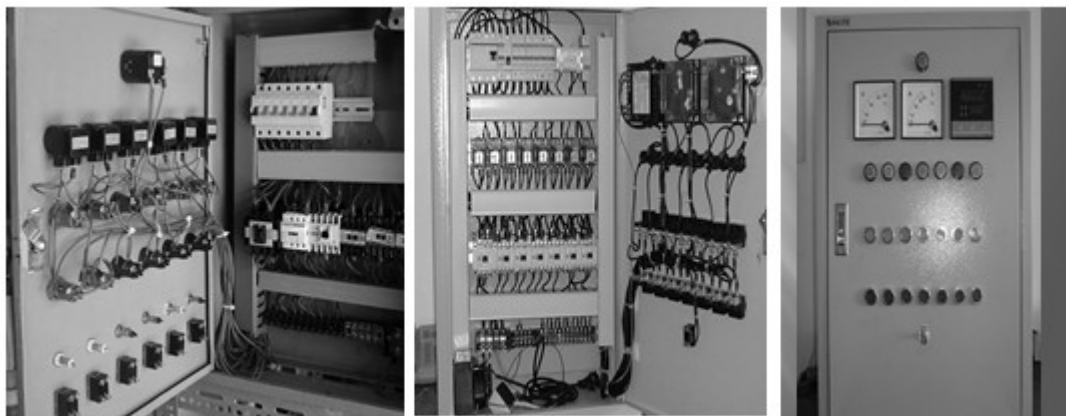
No.	Panjang tabung	Tegangan (Kg/m^2)
1.	$L_{\text{tube}} = 0.5 \text{ m}, L_{\text{cool}} = 0.1 \text{ m}, L_{\text{isolasi}} = 20 \text{ cm}$	$0,112 \cdot 10^{-8}$
2.	$L_{\text{tube}} = 0.5 \text{ m}, L_{\text{cool}} = 0.15\text{m}, L_{\text{isolasi}} = 17,5 \text{ cm}$	$0.129 \cdot 10^{-8}$
3.	$L_{\text{tube}} = 0.6 \text{ m}, L_{\text{cool}} = 0.10\text{m}, L_{\text{isolasi}} = 25 \text{ cm}$	$0.224 \cdot 10^{-8}$



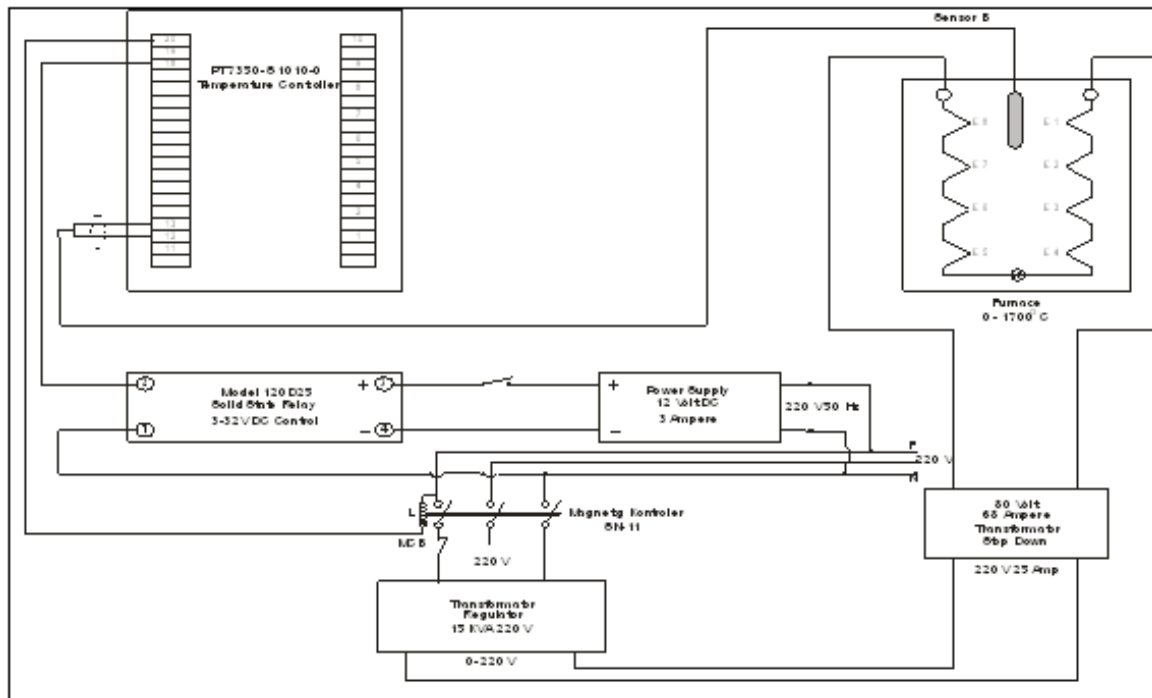
Gambar 5. Hasil pembuatan komponen reaktor sinter



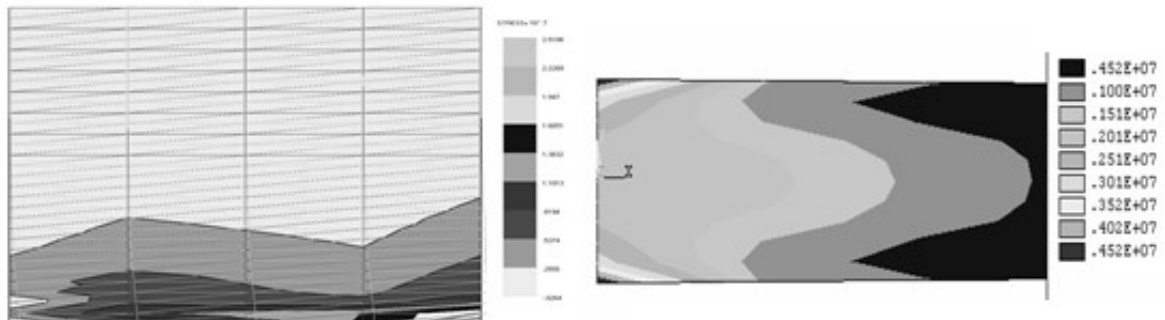
Gambar 6. Pintu pemasukan dan pengeluaran sampel reaktor sinter kernel UO_2



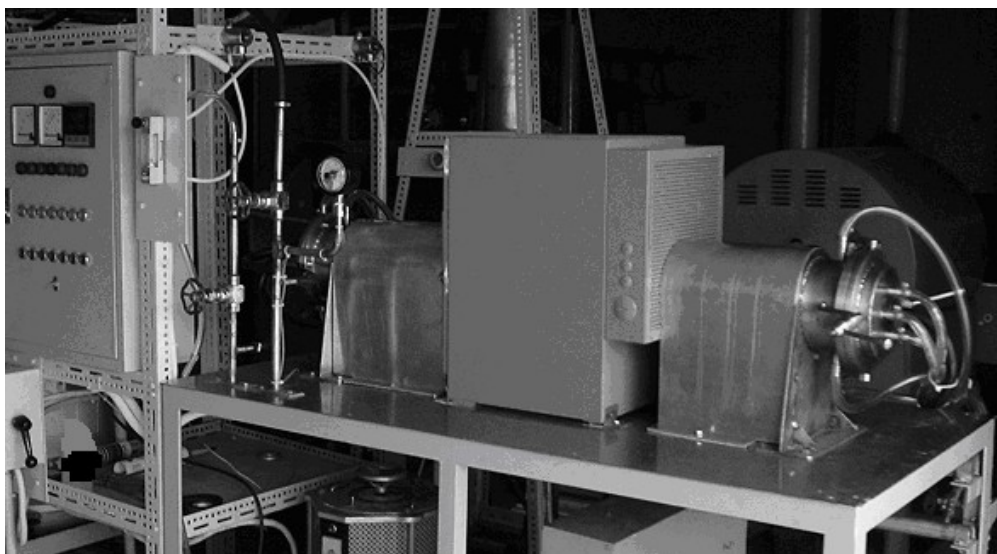
Gambar 7. Panel kontrol reaktor sinter kernel UO_2



Gambar 8. Skema wiring reaktor sinter kernel UO_2



Gambar 9. Distribusi suhu dan tegangan (stress) salah satu kondisi reaktor tabung



Gambar 10. Reaktor sinter kernel UO_2 yang dilengkapi dengan panel kontrol

KESIMPULAN

1. Reaktor sinter yang beroperasi sekitar suhu 1500°C s/d. 1600°C telah selesai dirancang dan dibuat menggunakan panas resistan (menggunakan 8 elemen pemanas listrik dengan spesifikasi material: Moly-D, Le: 170, D: 33, A: 25, I square R, 716-542-5511, Heraeus).
2. Persamaan perpindahan panas pada dinding reaktor tabung $d^2T/dx^2 - h.p/(k.A).(T-T_s) = 0$ sedangkan persamaan diferensial (model matematik) distribusi suhu axisy metrik dua dimensi adalah :

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) - h(T - T_f) + Q'''t = 0$$
3. Dengan panjang tabung 100 cm maka suhu pada ujung tabung masih sekitar 100°C sehingga masih aman walaupun tanpa pendinginan pada ujung tabung.
4. Hasil simulasi distribusi tegangan untuk berbagai variasi pendinginan dengan menggunakan perangkat lunak aplikasi berbasis metoda elemen hingga (MEH) dan ANSYS, diperoleh harga distribusi tegangan lebih besar dari harga tegangan referensi (tungku reduksi).
5. Agar tegangan pada tabung alumina berkurang, maka perlu penambahan bahan isolator pada daerah yang paling panas (pada pangkal tabung). Untuk kondisi ini diperoleh hasil simulasi lebih kecil dari harga tegangan referensi (tungku reduksi).

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Ir. Utaja dari PRPN BATAN dan Ibu Dra. Elfrida Saragi dari PPIN BATAN yang telah banyak membantu penulis dalam penyusunan pengembangan program untuk perhitungan koefisien konveksi dan penyelesaian analisis suhu dan tegangan (stress) pada reaktor tabung menggunakan metoda elemen hingga (MEH) dan Ansys. Ucapan terima kasih juga penulis sampaikan kepada rekan-rekan BKTPB dan BEM yang telah banyak membantu melakukan kegiatan ini hingga terkonstruksinya reaktor sinter kernel UO₂ dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

1. YOUNG-WOO LEE, "Development of HTGR coated particle Fuel Technology in Korea".
2. J. Y. PARK, J. K. KIM, K. C., JEONG, B. G. KIM, "HTGR Fuel Design and Fabrication", Korea Atomic Energy research Institute.
3. BEATTY.R.L., et all., *Gel-Sphere-Pac Fuel for Thermal Reactors*, ORNL-TM-5469, 1979.
4. GANGULY, P.V, et all., *Preparation, characterisation and out-of-pile property evaluation of (U, Pu)N fuel pellets*, Radio metalurgy Devison, BARC, Bombay India, Journal of Nuclear Materials 178, page 234-241, Elsevier Science Publishers., North-Holland, 1991.
5. HAAS, B. A., et al, Consolidated Fuel Recycle Program-Re-fabrication, "Chemical Flow-sheet Conditions for Preparing Urania", ORNL-TM-6850, 1979.
6. GANGULY, P.V, et all., *Preparation, characterisation and out-of-pile property evaluation of (U, Pu)N fuel pellets*, Radio metalurgy Devison, BARC, Bombay India, Journal of Nuclear Materials 178, page 234-241, Elsevier Science Publishers., North-Holland, 1991.
7. KNIGHT, K.S. AND BATES, S.C., "High Temperature Transparent Furnace Development", Thoughtventions Unlimited LLC, Glastonbury, CT 06033.
8. ANONIM, "Materials Research Furnaces, Inc., <http://www.mrf-furnaces.com/sinter.htm>.
9. BALA, K.C." Design Analysis of an Electric Induction Furnace for Melting Aluminum Scrap", FUTM, Niger State, Nigeria, 2005.
10. HENNING, B., SHAPIRO, M., and Le Grange, L.A., "DC Furnace Containment Vessel Design Using Computational Fluid Dynamics", Proceedings Tenth International Ferroalloys Congress, South Africa (2004).
11. FRANK L STASA, "Applied Finite Element Analysis For Engineers", Florida Institute of Technology (1985)

12. SAEED MOAVENI, "Finite Element Analysis, Theory and Application with ANSYS", Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey 07458 (1983).
13. WILLIAM WEAVER JR, PAUL R. JOHNSTON, "Structural dynamics by Finite Elements", Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632.
14. KREITH, F., "Principles of Heat Transfer", 3rd ed, Horper & Row Publisher, New York, 1973.