

KARAKTERISASI PERALATAN FABRIKASI PELAPISAN BUFFER KERNEL UO_2 (*BUFFER LAYER*) MENGGUNAKAN MATERIAL SURROGATE KERNEL UO_2

Sugeng Rianto, Sarjono, Dedy Haryadi, Dedy Husnurrofiq, Sukarsono
Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir

ABSTRAK

Peralatan fabrikasi pelapisan buffer kernel UO_2 tersinter digunakan untuk menyiapkan bahan kernel UO_2 terlapis (TRISO) yang selanjutnya digunakan untuk pembuatan bahan bakar reaktor daya eksperimental (RDE) tipe HTGR model bahan bakar *pebble bed*. Bahan *surrogate* kernel UO_2 digunakan dalam proses pelapisan dengan sistem peralatan FB-CVD (*Fluidized Bed-chemical Vapor Deposition*). Proses pokok pada pembuatan pelapisan *surrogate* kernel UO_2 ini adalah dari pembuatan kernel (Zr,Ce) O_2 ini meliputi pembuatan larutan sol, proses gelasi larutan sol menjadi gel zirkonium-cerium, pencucian gel, pengeringan gel, kalsinasi, sintering dan proses pelapisan. Karakterisasi peralatan fabrikasi pelapisan alat FB-CVD meliputi penguasaan sistem pengoperasian alat, modifikasi dan perbaikan peralatan. Pengoperasian alat pelapisan menggunakan sistem peralatan FB-CVD perlu memperhatikan hal hal yang menentukan terhadap pembuatan hasil pelapisan bahan *surrogate* kernel UO_2 yang baik, agar hasil yang diperoleh dapat dilanjutkan dengan proses berikutnya. Pembuatan Gel yang baik dapat diproses menjadi kernel tersinter yang memenuhi syarat untuk dilakukan proses pelapisan menjadi partikel terlapis. Pada karakterisasi operasi peralatan fabrikasi pelapisan buffer kernel UO_2 tersinter beberapa parameter sangat menentukan hasil dari proses pelapisan ini antara lain suhu pada reaktor pelapisan, aliran gas proses, dan waktu pemanasan. Untuk parameter suhu proses lapisan *buffer* digunakan suhu 1100-1400 °C dengan waktu pemanasan adalah 30 menit dan 1 jam terhitung suhu pelapisan tercapai, dengan aliran gas campuran total (Argon dan asetelin) 5 Liter/menit. Kecepatan aliran gas ini diharapkan dapat menyebabkan proses fluidisasi pada reaktor pelapisan alat FB-CVD. Ujicoba peralatan pelapisan alat FB-CVD telah dilakukan dan alat dapat beroperasi dengan baik untuk proses pelapisan tahap awal yaitu pelapisan buffer kernel UO_2 dari tahapan pelapisan keseluruhan pada partikel terlapis (TRISO).

Kata kunci : Pelapisan Buffer, FB-CVD, Partikel Terlapis

PENDAHULUAN

Pelapisan kernel UO_2 merupakan salah satu proses penting dalam pembuatan bahan bakar reaktor suhu tinggi tipe HTGR. Bahan bakar Reaktor Suhu Tinggi ini mempunyai lapisan TRISO (*tristructural isotropic*) yang terdiri dari lima bagian yang berbeda dimana pada pusatnya adalah inti bahan bakar kernel yang bisa berupa oksida, karbida atau oksikarbida dari uranium. Proses pelapisan kernel tersinter digunakan sebagai bahan bakar reaktor suhu tinggi, melalui empat tahap pelapisan. Lapisan pertama adalah lapisan *buffer* yang merupakan lapisan pirokarbon densitas rendah. Proses pelapisan *buffer* dilakukan pada suhu 1100-1400°C menggunakan bahan gas asetilen (C_2H_2) yang diencerkan dengan gas argon. Lapisan kedua adalah pirokarbon bagian dalam (IPyC) yang merupakan pirokarbon densitas tinggi dan pori-porinya relatif kecil. Proses pelapisan IPyC

dilakukan pada suhu 1350-1450°C menggunakan gas propilen (C_3H_6) yang diencerkan dengan gas argon. Lapisan ketiga adalah silika karbida (SiC). Senyawa yang digunakan untuk pelapisan silika karbida adalah metil tri kloro silan (MTs) dicampur dengan hidrogen dan diencerkan dengan argon dengan proses pelapisan pada suhu 1500-1570°C. Lapisan keempat adalah sebagai pelindung silika karbida yang tahan suhu tinggi dilapiskan pirokarbon densitas tinggi bagian luar (OpyC). Lapisan ini dibentuk dari deposisi propilen pada suhu 1350-1450°C.

Ukuran kernel dan ketebalan lapisan sangat tergantung pada disain reaktor yang akan dioperasikan. Salah satu parameter bahan bakar TRISO dari produksi Nukem Jerman mempunyai ukuran sbb⁽¹⁾:

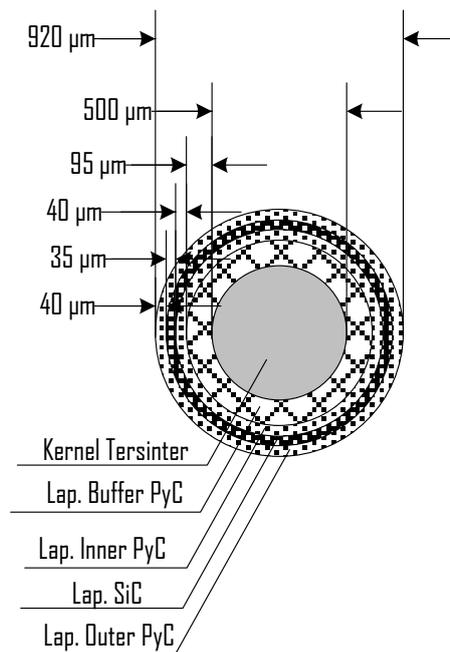
Tabel 1. Parameter Nominal Partikel TRISO Nukem Jerman⁽¹⁾

| Lapisan | Densitas | Ketebalan (μm) | Radius (μm) |
|---------|----------|-----------------------------|--------------------------|
| Kernel | 10,96 | | 250 |
| Bufer | 1,1 | 95 | 345 |
| PyC | 1,9 | 40 | 385 |
| SiC | 3,18 | 35 | 420 |
| PyC | 1,9 | 40 | 460 |

Permasalahan pada fabrikasi pelapisan kernel UO_2 adalah sistem peralatan pelapisan yaitu peralatan FB-CVD mengalami kerusakan pada sistem pemanas induksi reaktor yang disebabkan oleh sistem sirkulasi air pendingin yang rusak. Selain itu juga dilakukan modifikasi untuk sistem distribusi gas, sistem elektrikal dan modifikasi sistem instrumentasi dan kendalinya. Pada kegiatan ini dilakukan penggantian sistem pemanas induksi dengan modifikasi sistem sirkulasi air pendingin, hal ini dilakukan untuk mencegah kerusakan yang berulang dari sistem pemanas induksi yang mutlak harus ada sistem sirkulasi air pendinginnya. Sistem distribusi aliran masuk gas di modifikasi dengan penggantian pipa menggunakan bahan anti korosi (*stainless steel*) dan pengendalian dilakukan bisa dengan manual atau komputer. Untuk sistem elektrikal dilakukan modifikasi dimana pada sistem elektrikal yang lama masih digunakan SSR diganti secara langsung menggunakan relay dengan sistem interlocking yaitu apabila sistem pendingin belum berfungsi, maka sistem keseluruhan belum bisa hidup. Untuk sistem instrumentasi dan kendali modifikasi yang dilakukan adalah kontroller alat diganti langsung dengan modul akuisisi data yang dikendalikan langsung oleh komputer. Komputer selain sebagai pengendali sistem alat, berfungsi juga sebagai data *logging* proses pelapisan. Sehingga

seluruh parameter proses pelapisan datanya dapat langsung tersimpan pada komputer. Ujicoba peralatan pelapisan alat FB-CVD sudah dilakukan dan alat dapat beroperasi dengan baik untuk proses pelapisan tahap awal yaitu pelapisan *buffer* kernel UO₂ dari tahapan pelapisan keseluruhan pada partikel terlapis (TRISO).

Bahan bakar RDE yang dikembangkan untuk reaktor HTGR di Indonesia adalah bahan bakar berbentuk bola (*pebble bed*) seperti yang dikembangkan di Jerman, Cina dan Afrika Selatan. Bentuk bahan bakar tersebut mempunyai inti bahan bakar partikel berlapis, yang mengungkung hasil-hasil fisi sehingga tidak keluar dari elemen bahan bakar. Partikel terlapis TRISO mempunyai 4 lapisan yaitu satu lapisan *buffer* dan 3 lapisan isotropik yaitu lapisan pirokarbon bagian dalam, lapisan silikarbida dan lapisan pirokarbon bagian luar. Partikel terlapis dibuat menjadi elemen bahan bakar bentuk bola dalam bentuk campuran dengan matriks grafit. Elemen bahan bakar bentuk bola terdiri dari partikel terlapis yang jumlahnya mencapai 11.000 butir, dicampur dengan grafit menjadi bentuk bola berdiameter 5 cm dan ditutup dengan lapisan grafit setebal 0,5 cm^[2-9]. Lapisan TRISO dapat dilihat pada gambar 4 dibawah ini.



Gambar 1. Lapisan Pada Partikel Terlapis TRISO

Salah satu langkah proses yang penting dalam rangkaian pembuatan bahan bakar RDE adalah proses pelapisan kernel tersinter menjadi partikel terlapis. Proses pelapisan, memerlukan reaktor *bed* fluidisasi (*fluidized-bed*) sebagai tempat terjadinya reaksi dekomposisi bahan reaktan gas menjadi lapisan pirokarbon atau silikarbida yang terdeposisi pada permukaan partikel tersinter. Fluidisasi terjadi ketika partikel padat kecil

(kernel UO_2), dalam reaktor terangkat dan tertahan pada aliran fluida. Kecepatan fluida cukup untuk menghentikan partikel, tetapi tidak cukup besar untuk membawa partikel keluar dari reaktor. Partikel padat pada waktu terjadi fluidisasi, berperan sebagai bahan terfluidisasi sedang gas pembawa dan gas pereaksi berfungsi sebagai media fluidisasi. Fluidisasi yang terjadi pada reaktor dipengaruhi oleh banyak faktor diantaranya adalah kecepatan gas masuk reaktor fluidisasi, bentuk reaktor fluidisasi, ukuran reaktor fluidisasi, diameter kernel yang difluidisasi, densitas kernel dan gas. Untuk menentukan besaran parameter yang menentukan pada fluidisasi ini, dilakukan melalui pemodelan reaktor pelapisan atau melalui percobaan dalam prototipe skala laboratorium sehingga parameter-parameter diatas dapat ditentukan dan diperoleh lapisan yang sesuai dengan spesifikasi partikel terlapis dalam bahan bakar reaktor RDE. Pemahaman mekanika fluida dan proses fluidisasi menjadi prasyarat mutlak untuk membuat model reaktor fluidisasi ini.

Reaktor fluidisasi yang bekerja pada suhu tinggi, memerlukan bahan yang tahan suhu tinggi dengan sistem pemanasan tertentu. Salah satu sistem pemanasan reaktor fluidisasi adalah pemanasan secara induksi. Bahan untuk reaktor fluidisasi pada pemanasan secara induksi, secara umum yang digunakan material dengan sifat kemagnitan rendah dan konduktor yang tahan suhu panas. Material tersebut diantaranya adalah grafit, argenterum dan molibdenum. Bahan inilah yang menjadi dasar dalam pembuatan model reaktor fluidisasi.

Bahan bakar HTGR yang telah dikembangkan di dunia ada 2 macam, yaitu yang prismatik dan bola (*pebble bed*). Bahan bakar *Pebble bed* yang terpilih untuk dikembangkan di Indonesia. Bahan bentuk bola (*pebble bed*) akan digunakan untuk reaktor daya eksperimental yang dirancang akan dibangun di Indonesia. Bahan bakar bola berisi partikel terlapis yang dikompaksi dengan matrik grafit dengan diameter 5 cm dan kemudian dikompaksi lagi dengan grafit yang menjadi kulit bola dengan ketebalan 5 mm. Partikel terlapis yang menjadi inti bahan bakar bola berisi partikel UO_2 tersinter yang dilapis dengan 1 lapisan penyangga (*buffer*) dan 3 lapisan isotropik sehingga sering disebut lapisan TRISO. Lapisan-lapisan dalam bahan bakar HTGR mempunyai fungsi masing-masing sebagai berikut:

- Lapisan paling dalam adalah lapisan *buffer*/penyangga dengan ketebalan 100 μm merupakan karbon pirolitik/pirokabon dengan densitas rendah yang berfungsi untuk menyerap energi yang memancar dari materi hasil fisi setelah reaksi fisi dan menampung gas hasil fisi pembelahan uranium. Lapisan ini menahan tekanan internal yang besar sehingga tidak mempengaruhi tiga lapisan luar.

- Lapisan kedua adalah lapisan pirokarbon dalam (IPyC), mempunyai densitas tinggi dengan ketebalan~40 µm. Lapisan ini tidak tembus gas untuk melindungi inti bahan bakar selama proses deposisi pada lapisan silikakarbida (*silicon carbide/SiC*). Lapisan ini juga melindungi lapisan *silicon carbide (SiC)* dari serangan reaksi kimia oleh karbon monoksida dan hasil fisi selama iradiasi. Lapisan pirokarbon menjadi penghalang pertama terjadinya difusi hasil fisi yang mempunyai radioaktivitas tinggi.
- Lapisan ketiga adalah lapisan silikakarbida (SiC) yang mempunyai ketebalan~35 µm. Silikakarbida berfungsi sebagai kerangka struktural dan penghalang untuk difusi produk fisi dan mengungkung hasil fisi berupa gas dan padat.
- Lapisan pirokarbon luar adalah lapisan pirokarbon densitas tinggi dengan ketebalan~40 µm. Lapisan ini melindungi silikakarbida dari kerusakan mekanis selama penanganan dan penghalang akhir untuk difusi produk fisi.

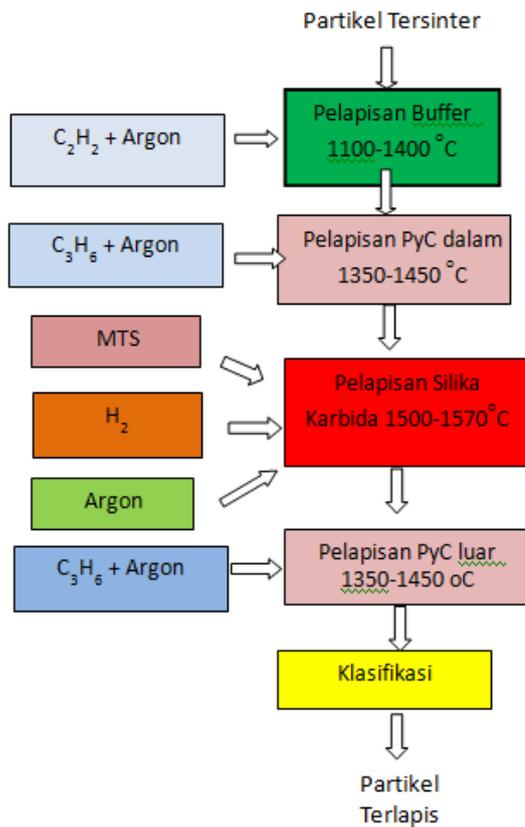
Ukuran bahan bakar dan ketebalan lapisan-lapisan TRISO dalam bahan bakar HTGR tergantung dari perencanaan reaktornya. Sebagai patokan tentang ukuran dan ketebalan masing-masing lapisan dapat dilihat dalam Tabel1, yaitu ukuran bahan bakar HTR-10.

Tabel 2. Spesifikasi Bahan Bakar HTR 10

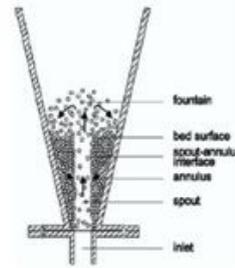
| HTR 10 | | | | |
|----------------------------|----------------------------|--|--------------------------|------------------------------------|
| Kernel UO2 | | | | |
| Diameter (µm) | Densitas g/cm ³ | Sphericity (Dmax.Dmin) | O/U | Thermal conductivity 1000°C W/cm/K |
| 500 | ≥10,4 | <1,2 | ≤2,01 | |
| Coated Particles | | | | |
| Tebal (µm) | Densitas g/cm ³ | Anisotropy Factor | | |
| 95 | ≤1,10 | | | |
| 40 | 1,9 ±0,1 | ≤1,03 (OPTAF) | | |
| 35 | ≥3,18 | | | |
| 40 | 1,9 ±0,1 | | | |
| Matriks Grafit | | | | |
| Densitas g/cm ³ | Anisotropy Factor | Corrosion rate (mg/cm ² /j) | Erosion Rate (mg/ball/j) | |
| >1,76 | ≤1,3 | ≤1,3 | ≤6 | ≥0,25 |

| Bola Bahan Bakar | | | | |
|----------------------------|--------------------|--|--|--|
| Diameter (μm) | U loading (g/bola) | | | |
| 59,6-60,2 | 5 \pm 0,25 | | | |

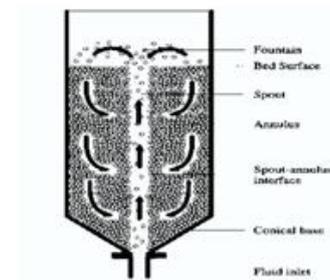
Pelapisan kernel tersinter dalam pembuatan bahan bakar RST, melalui empat tahap pelapisan yang dilakukan secara bergantian pada alat pelapisan yang sama. Proses pelapisan pertama, dilanjutkan dengan pelapisan kedua dan seterusnya sampai lapisan keempat dengan perubahan suhu reaktor pelapisan dan penggantian gas-gas pereaksi yang masuk dalam reaktor. Perlu diperhatikan selama pergantian gas, kecepatan aliran gas campuran masuk ke reaktor pelapisan diusahakan tetap supaya tidak mempengaruhi partikel yang berfluisasi. Lapisan pertama adalah lapisan *buffer* yang merupakan lapisan pirokarbon densitas rendah dihasilkan dari dekomposisi gas pereaksi C_2H_2 diencerkan dengan argon pada suhu 1100-1400°C. Lapisan kedua adalah pirokarbon bagian dalam yang merupakan pirokarbon dengan densitas tinggi yang dihasilkan dari deposisi gas propilen diencerkan dengan argon yang dilakukan pada suhu 1350-1450°C. Lapisan ketiga adalah silikakarbida merupakan deposisi dari gas metiltriklorosilan diencerkan dengan argon dan gas H_2 . Pelapisan silikakarbida dilakukan pada suhu 1500-1570°C. Lapisan pirokarbon bagian luar dihasilkan dari deposisi hasil pirolisa gas propilen pada suhu pelapisan suhu 1350-1450°C. Suhu dan Gas saat pelapisan dapat dilihat dalam Gambar 2.



Gambar 2. Diagram Proses Pelapisan partikel terlapis TRISO



a. Reaktor Konis Bed Sembur (conical spouted bed (CBS) reactor)



b. reaktor konvensional

Gambar 3. Reaktor fluidisasi

Proses pelapisan dilaksanakan pada alat pelapisan dengan sistem *fluidized bed chemical vapour deposition* (FB-CVD). Proses pelapisan kernel UO_2 dilakukan dalam reaktor fluidisasi (*fluidized bed reactor*) menggunakan metode *Chemical Vapor Deposition* (CVD). Reaktor fluidisasi mempunyai bagian bagian yaitu distributor gas di bagian bawah reaktor, tempat pengeluaran hasil kernel terlapis di bagian bawah reaktor, reaktor fluidisasi tempat dekomposisi dan deposisi gas pereaksi kepermukaan kernel terlapis, sistem pemasukan kernel tersinter, sistem pengeluaran gas di bagian atas dan sistem pemanas reaktor yang bisa mencapai suhu $1650^{\circ}C$

Sistem kontak antara gas fluidisasi dan partikel padat yang difluidisasi bisa bermacam-macam. Salah satu bentuk kontak tersebut berbentuk kerucut atau konis. Kalau reaksi fluidisasi hanya terjadi pada bagia kerucutnya disebut reaktor bed sembur konis (*conical spouted bed/CSB*) reactors. Kalau bahan padatnya tinggi sampai di atas bagian konis disebut reaktor fluidisasi konvensional. Reaktor fluidisasi tersebut dapat dilihat dalam Gambar 3.

Mekanisme terjadinya pelapisan

Mekanisme terjadinya pelapisan untuk bahan hidrokarbon seperti asetilen atau propilen dapat dijelaskan sbb: Hidrokarbon terdekomposisi menjadi banyak senyawa lain. Senyawa yang terjadi, sebagian akan teradsorpsi pada partikel dan kemudian terdeposisi pada permukaan partikel. Terjadi transfer massa dari fluida ke permukaan padatan bentuk bola karena kadar solute di fluida lebih besar dari kadar jenuhnya. Reaktor fluidisasi berfungsi untuk tempat terjadinya reaksi deposisi hasil pirolisa gas. Gampuran gas inert dan gas hidrokarbon atau silan masuk kedalam reaktor melalui saluran masuk pipa di bagian bawah reaktor membentuk kerucut atau lengkung, melalui satu atau beberapa *nozzle* tergantung dari disain reaktor pelapisan. Kemudian gas melalui kerucut sampai pada bagian reaktor fluidisasi. Pada bagian atas reaktor diameter membesar, agar kecepatan gas lebih kecil dari kecepatan minimum terjadinya fluidisasi dan kernel tidak terbawa gas.

Pada proses pelapisan dengan metode fluidisasi, aliran campuran gas hidrokarbon (propana, asetilen, metana, propilena) dan gas inert (He, Ar, N₂) setelah melalui *flowmeter* dan pendingin air, dimasukkan reaktor melalui *nozzle* berbentuk kerucut (konis).

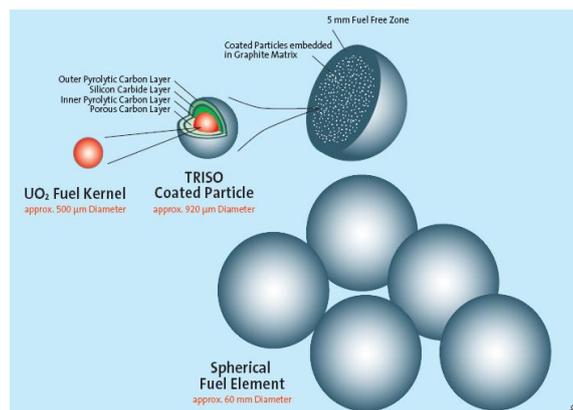
Lapisan pirokarbon dapat terjadi karena adanya deposisi karbon dari hasil pirolisa hidrokarbon. Hidrokarbon fase gas yang berada dalam kesetimbangan pada suhu dan tekanan tertentu, akan timbul jelaga atau *carbon black* dan sedikit pengendapan pirokarbon. Pirokarbon ini akan mengendap dengan cepat pada suhu tinggi. Proses ini sering disebut *chemical vapour deposition* (CVD). Karena pirokarbon merupakan bahan yang tidak berkrystal (*paracrystalline*), maka pembentukan deposit pirokarbon sangat dipengaruhi oleh suhu, tekanan, komposisi gas. Kecepatan deposisi dan membentuk lapisan pada permukaan, diprediksi secara termokimia dengan menghitung energi bebas Gibbs. Kernel dalam reaktor fluidisasi bersirkulasi sehingga suhu dalam reaktor sama. Parameter proses selama fluidisasi menentukan jenis lapisan yang akan terjadi. Sebagai contoh dalam pelapisan silika karbida akan terbentuk α SiC atau β SiC, tergantung pada suhu, tekanan dan komposisi selama proses pelapisan.

Karena fungsi lapisan yang sangat penting untuk mengungkung produk fisi, keretakan lapisan TRISO harus dicegah agar tidak terjadi kontaminasi produk fisi pada permukaan bahan bakar dan pendingin. Salah satu penentu dihasilkan hasil pelapisan yang baik adalah dari proses pelapisan, yaitu ditentukan dari disain peralatan, dan kondisi operasi proses. Disain peralatan menentukan karakteristik dinamik proses yang akan

menentukan kualitas lapisan yang terjadi. Demikian juga dengan kondisi proses, juga menentukan kualitas lapisan yang terbentuk.

METODOLOGI

Proses pelapisan partikel UO_2 tersinter menjadi partikel terlapis TRISO merupakan tahap yang penting dalam seluruh proses pembuatan bahan bakar reaktor daya eksperimental yang bertipe reaktor suhu tinggi HTGR menggunakan peralatan pelapisan FB-CVD menghasilkan partikel terlapis (TRISO) dari kernel UO_2 tersinter berdiameter 0,5 cm. Hasil partikel terlapis kemudian akan dicampur dengan bahan matrik grafit dan dikompaksi awal bentuk bola dengan diameter 5 cm dan kemudian dikompaksi akhir dengan grafit membentuk kulit dari grafit menjadi diameter 6 cm. Hasil inilah yang merupakan elemen bahan bakar bentuk bola yang akan digunakan sebagai bahan bakar reaktor daya eksperimental.



Gambar 4. Bahan bakar reaktor suhu tinggi

Pengembangan sistem peralatan fabrikasi pelapisan FB-CVD untuk lapisan *buffer* kernel UO_2 menggunakan bahan *surrogate* dilakukan mengingat sistem peralatan mengalami kerusakan, dan dilakukan perbaikan secara bertahap. Tahapan perbaikan peralatan pelapisan FB-CVD adalah sebagai berikut :

a. Instalasi Generator RF pada Alat Pelapisan.

Instalasi dan uji fungsi generator RF telah dilaksanakan dengan baik dan hasilnya generator dapat berfungsi dengan baik. Generator RF selanjutnya akan digunakan untuk mengalirkan arus ke coil yang dipasang pada bagian luar reaktor fluidisasi. Pengoperasian generator RF ini harus dengan pendingin air demineralisasi. Arus dalam coil akan membentuk medan magnet disekitar coil dan akan menimbulkan arus Eddy pada grafit yang merupakan dinding reaktor fluidisasi. Arus Eddy tersebut meningkatkan suhu grafit bisa

mencapai suhu 1500°C dan memanaskan reaktor. Dengan memfluidisasi kernel tersinter pada reaktor dengan gas argon dan gas pereaksi, gas pereaksi akan terdekomposisi dan hasil dekomposisi terdeposisi pada permukaan kernel tersinter. Lapisan yang sesuai dengan gas pereaksi akan terbentuk pada permukaan kernel. Tahapan instalasi generator RF adalah sebagai berikut :

- Uji fungsi generator RF
- Instalasi sistem pendingin
- Instalasi pemipaan pendingin
- Instalasi sistem pompa pendingin
- Pembersihan penampung air demin

Uji fungsi sistem generator RF di tunjukkan pada gambar 5 dibawah.



Gambar 5. Uji fungsi generator RF

Hasil uji fungsi sistem generator RF, menunjukkan generator RF berfungsi dengan indikator arus keluaran 2 A pada tegangan 150 Volt dan frekuensi 2 Khz, dan timbul panas pada sampel yang ditempatkan pada tengah-tengah kumparan. Selanjutnya adalah dilakukan perbaikan sistem pendingin untuk generator RF dengan persyaratan laju alir air 6 liter/menit, perbaikan instalasi pendingin dan pemipaan ditunjukkan gambar 6 dan 7 di bawah ini.



Sebelum

Sesudah

Gambar 6. Instalasi sistem pendingin



Sebelum

Sesudah

Gambar 7. Instalasi pemipaan pendingin



Gambar 8. Instalasi sistem pompa pendingin

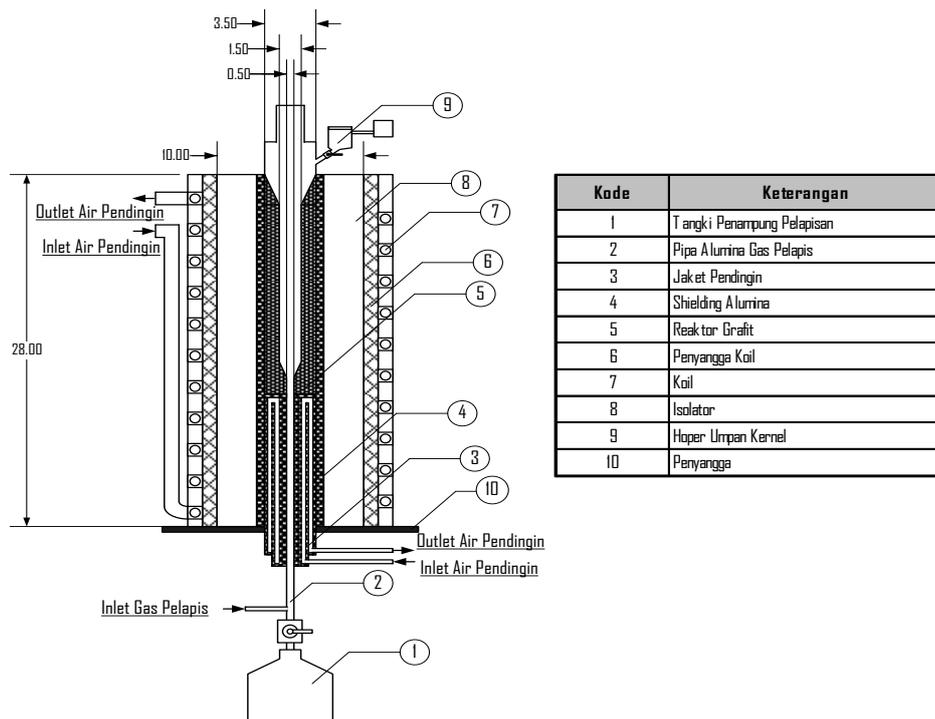
b. Investigasi kerusakan sistem peralatan FB-CVD

Investigasi kerusakan sistem peralatan FB-CVD yang perlu diperbaiki diperlukan untuk menghidupkan peralatan pelapisan dan perbaikan sebagian dari kerusakan tersebut. Hasil investigasi sebagai berikut

Tabel3. Investigasi kerusakan sistem peralatan FB-CVD

| No. | Nama Komponen | Keterangan | Upayatindaklanjut |
|-----|--|--|--------------------------------|
| 1. | Program kendali furnace induksi | Tidak ada | Sudah diinstall dalam komputer |
| 2. | Komputer untuk kendali furnace induksi | perlu perbaikan atau upgrade spesifikasi | Sudah normal |
| 3. | Reaktor induksi dengan sistem pendingin pada inlet gas pelapis | Belum ada | Belum diganti |
| 4. | Komponen box panel kelistrikan, instrumentasi dan kendali | Perlu perbaikan dan <i>upgrade</i> | Sedang dilakukan |
| 5. | Tangki pemanas MTS | Belum ada | Sedang dibuat |
| 6. | Pemipaan inlet gas pelapis | Perlu perbaikan dan modifikasi | Sedang dibuat |
| 7. | Proses pemasukan kernel ke dalam reaktor induksi | Belum ada | Sedang dibuat |
| 8. | Sistem pengolahan gas sisa pelapisan | Perlu dimodifikasi | |

Untuk pembuatan reaktor fluidisasi dengan sistem pendingin pada inlet gas pelapis yang akan dibuat dengan desain ditunjukkan gambar 9 di bawah ini.



Gambar 9. Detail Reaktor FB-CVD untuk pelapisan kernel tersinter menjadi TRISO

c. Instalasi sistem pemanas induksi peralatan pelapisan FB-CVD

Instalasi sistem pemanas induksi peralatan pelapisan FB-CVD dilakukan untuk mengganti sistem pemanas induksi lama yang mengalami kerusakan. Instalasi dilakukan yang utama

adalah mengganti coil pemanas yang lama dengan yang baru. Kegiatan instalasi ini di tunjukkan gambar di bawah ini.



Gambar 10. Pelepasan *hoper*



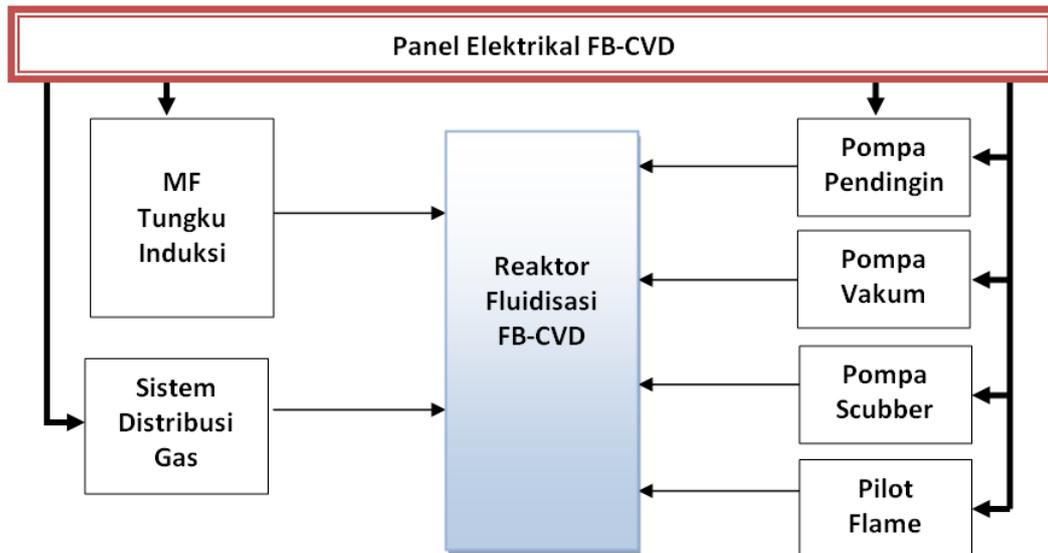
Sebelum

Sesudah

Gambar 11. Penggantian coil pemanas induksi

d. Instalasi sistem elektrik peralatan pelapisan FB-CVD

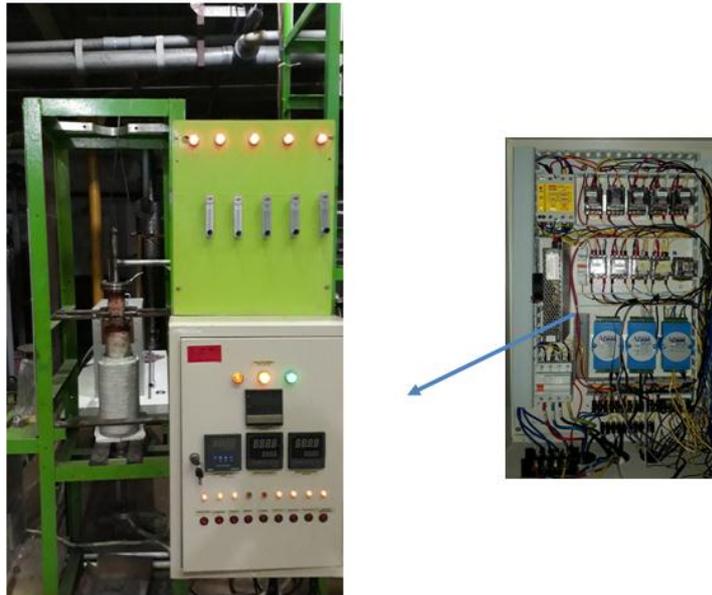
Blok diagram sistem elektrikal peralatan FB-CVD ditunjukkan pada gambar 12 di bawah ini:



Gambar 12. Sistem elektrikal FB-CVD

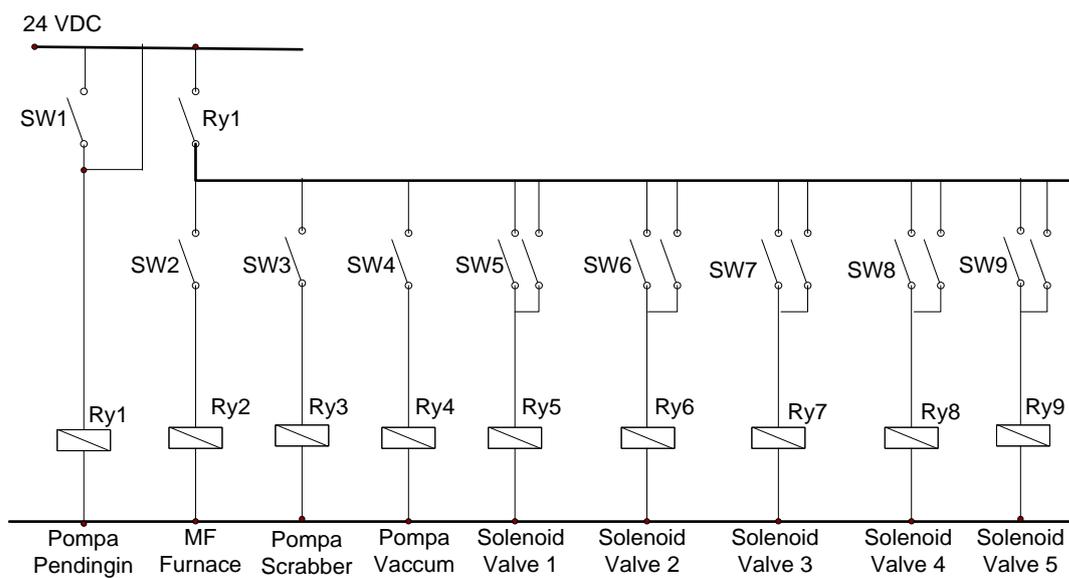
Sistem panel elektrikal FB-CVD merupakan sistem elektrikal 3 fasa daya 20 KW pada tegangan 380 Vac/50 Hz. Sistem Panel Elektrik ini mengambil daya dari panel utama dengan arus maksimal 63 A. Distribusi sistem elektrikal ini terbagi menjadi beberapa komponen antara lain : MF (*Medium Fekuensi*) Tungku Induksi daya maksimal 15 KW 3 fasa, Sistem Distribusi gas untuk kendali sistem *solenoid valve*, Sistem Sirkulasi Pompa pendingin air, Sistem Pompa Vakum, Sistem Pompa Scrubber dan Sistem pembakaran gas buang (*Pilot Flame*). Sistem inteloking diterapkan pada panel elektrikal FB-CVD, dimana untuk sistem sirkulai air pendingin harus dihidupkan terlebih dahulu sebelum dilakukan keseluruhan operasi pelapisan pada reaktor fluidisasi FB-CVD. Pengendalian komponen sistem elektrik diatas dilakukan secara manual pada *switch* panel langsung dan melalui komputer pada ruang panel kendali operasi pelapisan.

Gambar 13, dibawah ini menunjukkan panel elektrikal FB-CVD. Dari gambar dapat ditunjukkan menggunakan relay dengan arus maksimum 10 A dan tegangan coil relay 24VDC secara efektif dapat difungsikan untuk pengendalian komponen elektrik peralatan FB-CVD.

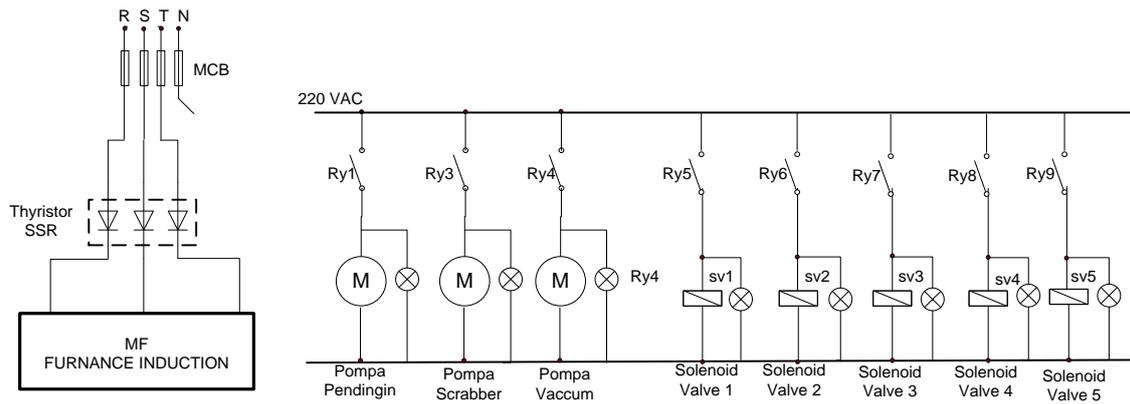


Gambar 13. Panel SistemElektrikal FB-CVD

Sistem *wiring* kendali elektrikal ditunjukkan gambar14 dan gambar 15 di bawah ini.



Gambar 14. wiring elektrikal FB-CVD

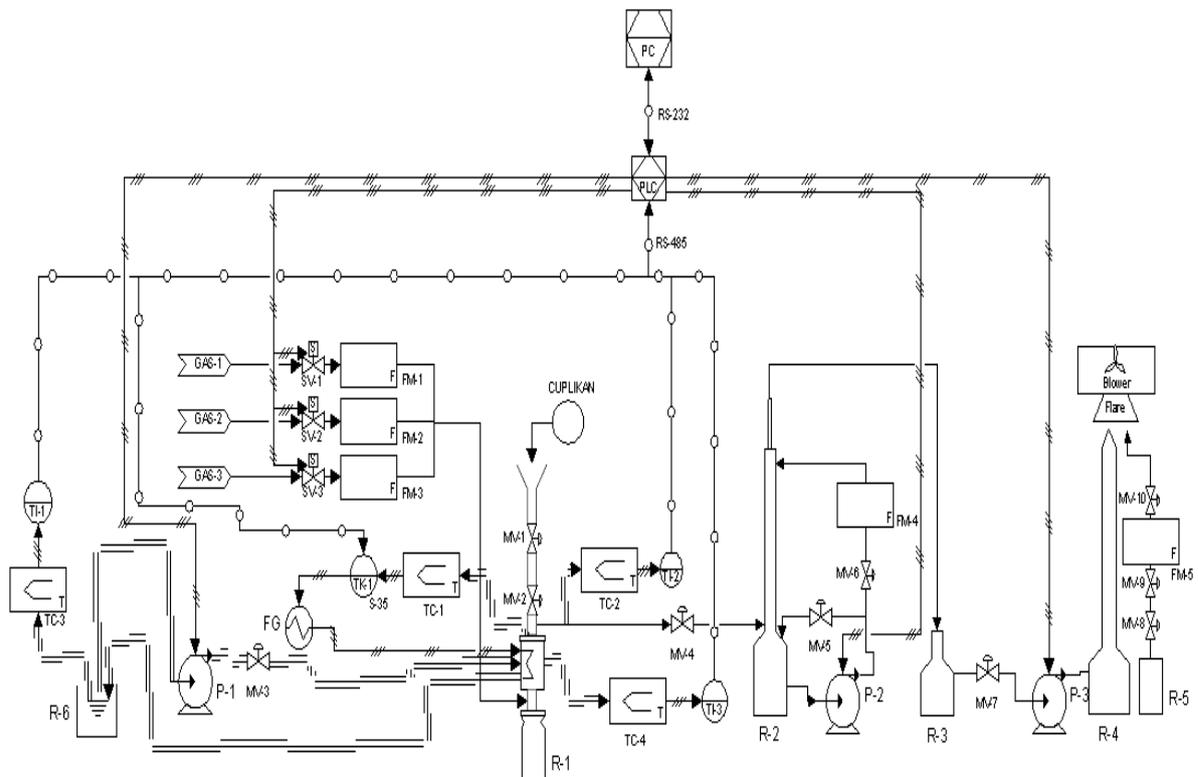


Gambar 15. Wiring power elektrikl FB-CVD

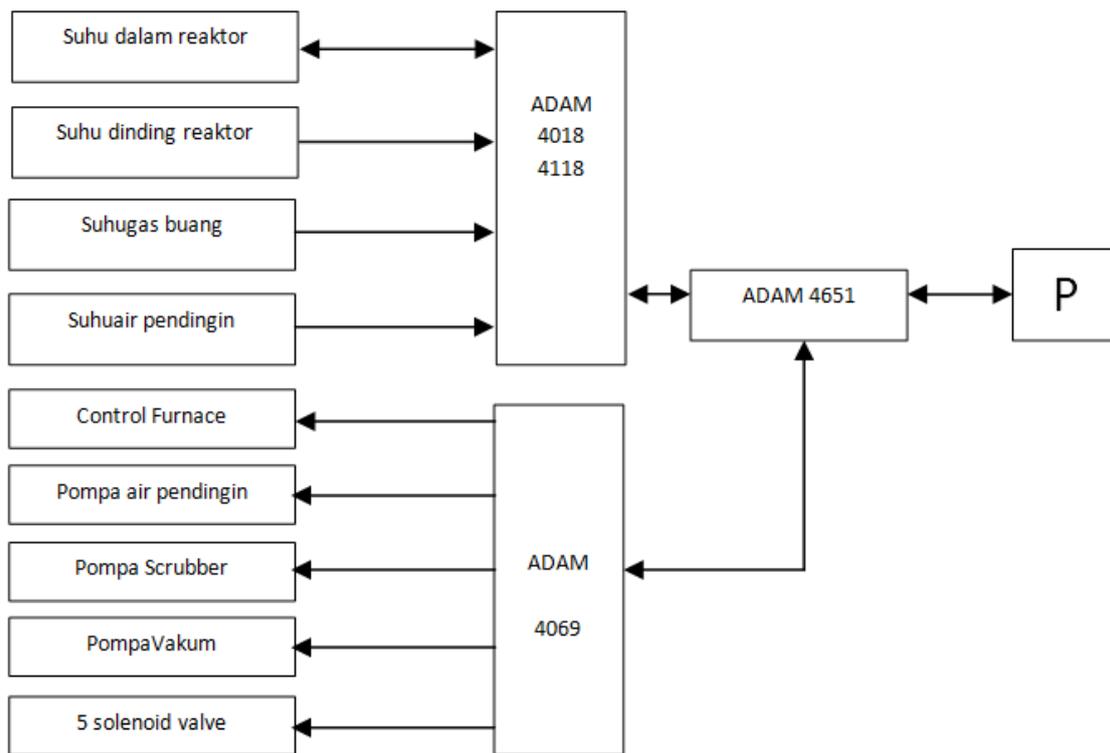
Pengujian sistem elektrikl ini sudah dilakukan dimana sistem menginterlocking harus pompa pendingin yang hidup terlebih dahulu baru sistem lain bisa bekerja. Sistem berfungsi dengan pengendalian dilakukan dari panel langsung dan melalui remote sistem menggunakan komputer.

e. Sistem Instrumentasi dan Kendali FB-CVD

Blok diagram sistem Piping dan Instrumentasi diagram (PI&D) sistem FB-CVD ditunjukkan pada gambar di bawahini:

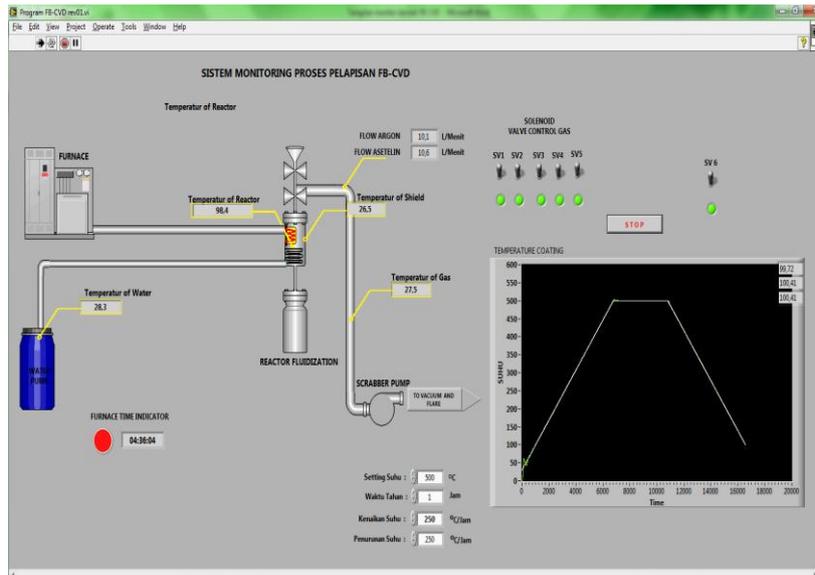


Gambar 16. Piping dan Instrumentasi diagram (PI&D) sistem FB-CVD



Gambar 17. Blok Diagram Sistem Instrumentasi FB-CVD

Sistem *Piping and Instrument Diagram* (P&ID) seperti tampak pada Gambar 5, merupakan sistem SCADA yang dirancang dengan menggunakan HMI pada PC sebagai *master*, dan modul *Advantech ADAM 40xx* dan *plant* sebagai *slave* [26]. Media komunikasi yang digunakan dalam sistem SCADA ini adalah komunikasi RS-485 menggunakan protokol *modbus* dan komunikasi USB PC dengan Modul *Advantech ADAM 4561*, dengan semua komunikasi tersebut menggunakan media berupa kabel. Pengendalian suhu proses pelapisan dilakukan secara langsung pada PC sebagai *remote terminal unit* (RTU). Modul *Advantech* sebagai *slave* dari sistem SCADA berfungsi juga sebagai data *logging* dengan data proses disimpan pada PC dengan sampling setiap 0,5 detik dan menampilkannya dalam bentuk tabel dan grafik serta menyimpan data-data. Gambar 18 menunjukkan tampilan proses SCADA dari proses pelapisan FB-CVD.

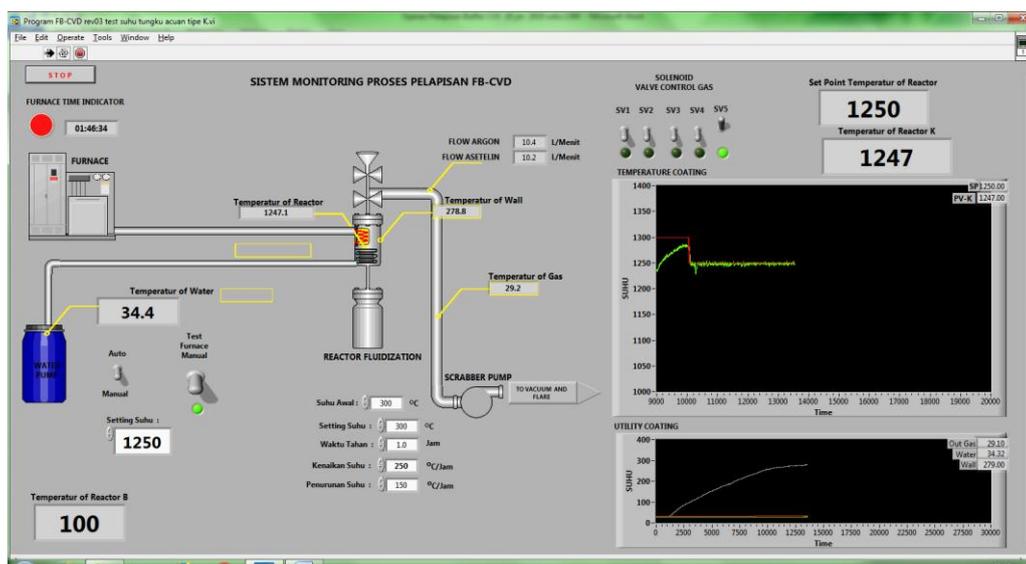


Gambar 18. Tampilan proses SCADA dari proses pelapisan FB-CVD

Dari hasil pengujian terhadap reaktor pelapisan FB-CVD pada pengujian suhu 500 °C, sistem pengendalian reaktor berfungsi linier dengan kelajuan pemanasan 250 °C/jam. Suhu ditahan selama 1 jam, dan dilakukan penurunan suhu dengan kelajuan sama 250 °C/jam. Pada grafik tampak pengendalian suhu linier tanpa adanya gangguan dan noise yang sangat kecil.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Uji coba lapisan *buffer* alat FB CVD dilakukan pada suhu 1250°C, waktu 30 menit dengan Sampel ZrO_2 1,46 gram dan 1,5169 gram. Laju alir gas $Ar=1,5$ l/m dan $C_2H_2=3$ l/m Tampilan proses pelapisan ditunjukkan gambar 19 di bawah ini.



Gambar 19 tampilan proses pelapisan *buffer*

Dari proses pelapisan buffer diatas, dapat diketahui secara keceluruhan alat FB-CVD dapat berfungsi untuk pelapisan tahap awal yaitu lapisan buffer, pada suhu 1250 °C. Pengembangan selanjutnya adalah dilakukan pelapisan dengan reaktor pelapisan yang baru yang dilengkapi sistem pendingin gas, dengan harapan proses pelapisan akan lebih optimal.

KESIMPULAN DAN SARAN

Peralatan Fabrikasi Pelapisan FB-CVD telah berhasil diperbaiki dan dimodifikasi untuk dapat melakukan proses pelapisan Kernel UO_2 menggunakan Material *Surrogate* Kernel UO_2 . Bagian sistem peralatan FB-CVD yang telah diperbaiki adalah sistem pemansa induksi dengan sirkulasi air pendingin, sistem distribusi gas, sistem elektrikal, dan sistem instrumentasi dan kendali. Uji fungsi proses pelapisan telah dilakukan untuk pembuatan lapisan buffer dengan suhu proses 1250 °C pada komposisi campuran gas asetilen dan argon. Hasil proses sistem peralatan menunjukkan sistem alat sudah bisa berfungsi, dan dapat ditingkatkan lagi untuk proses pelapisan berikutnya.

DAFTAR PUSTAKA

1. POWER, J.J. and WIRTH, B.D., *A Review of Triso Fuel Performance Models*, Department of Nuclear Engineering, University of California, Berkeley, *Jornal of Nuclear Materials*, 405, 2010.
2. PETTY, D., BELL, G., AND AGR TEAM, *The DOE Advanced Gas Reaktor (AGR) Fuel Development and Qualification Program, International Congress On Advanced In Nuclear Power Plant*, INEEL/CON 04-02418, USA, 2005.
3. FELTUS, M., *Advanced Gas Reaktor Fuel Development and Qualification Program, Overview and Planning FY04, FY05, Advanced Gas Reaktor-VHTR Fuel Development, US-DOE*, 2003
4. VERFONDERN, K., NABIELEK, H., KENDALL, J.M., *Coated Particle Fuel For High, Temperature Gas Cooled Reaktors*, Research Center Julich (FZJ), Julich, 2007.
5. DELHAES, P., *Chemical Vapor Deposition and Infiltration Processes of Carbon Material, Centre de Recherche Paul Pascal, University of Bordeaux, Pessax Cedex, Carbon 40*, 2002.
6. Dong, D.L., Huttinger, K.J., *Consideration of Reaction Mechanisms Leading to Pyrolytic Carbon of Different Textures*, Institute fur Chemische Technik, Universitat Karlsruhe, Karlsruhe, *Carbon Vol 40* , 2002.
7. Batan, *Dokumen Input Desain RDE, Basic Engineering Design of RDE*, 2017

8. PETTI. D.A., BONGIORNO. J., MAKI. J.T., MILLER, G.K., *Key Differences In The Fabrication German TRISO-Coated Particle Fuel, and Their Implication on Fuel Performance Engineering and Environmental Laboratory*, USA, 2002.
9. CHAROLAIS. F., FONQUERNIE. S., PERRAIS. C., PEREZ. M., CELLIER. F., HARBONNIER. G, *CEA and AREVA R & d on HTR Fuel Fabrication & Presentation of The GAIA Experiment Manufacturing Line, 2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology*, Beijing, 2004.
10. METHANI, M., *Status of High Temperature Gas-Cooled Reactor Technology*, International Atomic Energy Agency, Vienna, 2004.
11. M. A. Fütterer *et al.*, "Status of the very high temperature reactor system," *Prog. Nucl. Energy*, vol. 77, pp. 266–281, 2014.
12. H. Shaochang, M. Jingtao, Z. Xingyu, W. Yang, and Z. Xiangwen, "Large-scale production of UO₂ kernels by sol – gel process at INET," *Nucl. Eng. Des.*, vol. 271, pp. 158–161, 2014.
13. M. Karol, T. John, and J. Zhao, "Small and Medium sized Reactors (SMR): A review of technology," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 44, pp. 643–656, 2015.
14. C. Tang, Y. Tang, J. Zhu, Y. Zou, and J. Li, "Design and manufacture of the fuel element for the 10 MW high temperature gas-cooled reactor," vol. 218, pp. 91–102, 2002.
15. Ge, Y., Gordon, M.S., *Teoritical Study of the Pyrolysis of Methyltrichlorosilane in the Gas Phase. 1. Thermodynamic*, *Jurnal Phys. Chem.*, A 2007, 111, Iowa, 2007
16. HELARY, D., BOURRAT, X., DUGNE, O., MAVEYRAUD, G., PEREZ, M. AND GUILLERMIER, P., *Microstructure of Silicon Carbide and Pyrocarbon Coating, 2nd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology*, Beijing, China, 2004.
17. Rongzheng Liu, Malin Liu*, Youlin Shao, Xiaotong Chen, Jingtao Ma, Bing Liu, *A novel coated-particle design and fluidized-bed chemical vapor deposition preparation method for fuel-element identification in a nuclear reactor*, *Particuology* 31 (2017) 35–41.
18. Rongzheng Liu, MalinLiu, Jiaxing Chang, Youlin Shao, Bing Liu, *An improved design of TRISO particle with porous SiC inner layer by fluidized bed-chemical vapor deposition*, *Journal of Nuclear Materials* 467 (2015) 917-926
19. RUDNEV. V., LOVELESS.D., COOK, R., and BLACK, M., *Handbook of Induction Heating*, *Inductoheat*, Inc, Michigan, 2003
20. Sukarsono, "Modeling Pelapisan Buffer Pada Partikel terlapis: Perbandingan Dengan Hasil Laboratoris Pelapisan Buffer," *J. Teknol. Bahan Nukl.*, vol. 11, no. 2, 2015.
21. R Sukarsono, Ariyani Kusuma Dewi, Damunir, Kristanti N., Triyono, "Hubungan Waktu

- Dengan Tebal Lapisan Bufer Pembuatan Partikel Terlapis Bahan Bakar RST Sukarsono,” *Pros. Semin. Nas. Teknol. Energi Nukl. 2014 Pontianak, 19 Juni 2014*, 2014.
22. J. B. Gegenheimer, *Development of Laboratory Scale Conical Spouted Bed Reactors*. Louisiana State University, 2017.
 23. Sukarsono, Afif Anshori, “SIMULASI DINAMIKA FLUIDA DALAM REAKTOR FLUIDISASI PADA PELAPISAN KERNEL RST MENGGUNAKAN CFD: PENGARUH DIAMETER INLET DAN SUHU PEMANASAN,” in *Prosiding Seminar Nasional XXII “Kimia dalam Industri dan Lingkungan” Hotel Phoenix Yogyakarta, 21 November 2013 ISSN:0854-4778 SIMULASI*, 2013.
 24. TANG, C., and GUAN, j., *Study of Reaction : Coating SiC Coating on HTGR Fuel Element*, Institute of Nuclear Energy Technology, Tsinghua Universty, Beijing, China, 2001.
 25. VERFONDERN, K., NABIELEK, H., And KENDALL, J., *Coated Particle Fuel For High Temperature Gas Cooled Reactor*, Research Centre Julich, Julich 2007.
 26. HITTNER, D., BOGUSCH, E., BESSON, D., BUCKTAHUNORPE, D., CHAUVET, C. V., FÜTTERER, A., HEEK, A., LENZA , PHÉLIP , PIRSON, J., TRACTEBEL S., SCHEUERMANN, W., VERRIER, D., *A European Project For The Development of HTR/VHTR Technology for Industrial Process Heat Supply and Cogeneration. Proceedings HTR 2006: 3rd International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology* October 1-4, 2006, Johannesburg, South Africa
 27. Robert H. Bishop, *Modern Control Systems with LabVIEW*, National Technology and Science Press, 2012