



Terakreditasi: SK No.: 60/E/KPT/2016

Website : <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/reaktor/>

Reaktor, Vol. 16 No. 4, Desember Tahun 2016, Hal. 172-182

## Fabrikasi Kernel TRISO-UN dan Karakternya, Sebuah Kajian

Hadi Suwarno<sup>\*)</sup> dan Meniek Rachmawati

Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional  
Gedung 20, Kawasan Puspiptek-Serpong, Tangerang Selatan 15314, Indonesia  
Telp. 021-7560915, Fax. 021-7560909

<sup>\*)</sup>Penulis korespondensi: [hadis@batan.go.id](mailto:hadis@batan.go.id)

### Abstract

**TRISO-UN KERNEL FABRICATION AND ITS CHARACTERS, A REVIEW.** *High temperature nuclear reactors (HTRs) become the future nuclear power reactor due to its ability for electricity generation, hydrogen production and sea water desalination. Uranium nitride (UN) coated with tristructural isotropic (TRISO) coating materials has attracted the researchers because of its similar characteristics to UO<sub>2</sub> but has a higher density. There are beneficial in using UN as fuel due to the longer usage and efficient in refueling. The fabrication of UN kernel, coating of TRISO-UN, and characteristics of UN have been reviewed. Among the technology provided for producing UN kernel, atomizing is selected due to its simply and less waste produced. Coating technology used follows the current technology for TRISO-UO<sub>2</sub> that is fluidized bed chemical vapor deposition type. Since there are two types HTR fuel, block and ball types, fabrication technique of TRISO-UN fuel depends on the HTR type selected.*

**Keywords:** *fabrication; coating; UN compound; TRISO-UN*

### Abstrak

*Reaktor nuklir suhu tinggi (high temperature reactors, HTR) merupakan reaktor daya masa depan karena dapat digunakan sebagai pembangkit daya listrik, penghasil gas hidrogen dan desalinsi air laut. Bahan bakar nuklir berupa senyawa uranium nitrida (UN) yang dilapisi dengan lapisan tristructural isotropic (TRISO) menjadi topik bahasan akhir-akhir ini. Pengembangan bahan bakar nuklir bentuk kernel UN untuk reaktor HTR dipromosikan karena memiliki karakter yang mirip dengan kernel UO<sub>2</sub> namun memiliki densitas uranium lebih tinggi. UN memiliki keuntungan karena waktu pakai di reaktor lebih panjang dan penggantian bahan bakarnya lebih efisien. teknologi pembuatan kernel dan teknologi atomizing menjadi pilihan untuk pembuatan kernel UN karena proses lebih sederhana, waktu lebih cepat dan sedikit menghasilkan limbah. Teknologi pelapisan dan spesifikasi TRISO-UN yang akan dibuat mengikuti teknologi yang sudah terbukti, yaitu fluidized bed chemical vapor deposition type. Bahan bakar reaktor HTR yang ada di dunia ada dua tipe, yaitu tipe blok dan tipe bola, fabrikasi bahan bakar TRISO-UN disesuaikan dengan jenis reaktor yang akan dibangun.*

**Kata kunci:** *fabrikasi; pelapisan; senyawa UN; TRISO-UN*

**How to Cite This Article:** Suwarno, H. dan Rachmawati, M., (2016), Fabrikasi Kernel TRISO-UN dan Karakternya, Sebuah Kajian, Reaktor, 16(4), 172-182, <http://dx.doi.org/10.14710/reaktor.16.4.172-182>

## PENDAHULUAN

Kecelakaan Fukushima 11 Maret 2011 merupakan pelajaran bagi pembangkit listrik bersumber dari tenaga nuklir. Kecelakaan terjadi karena adanya interaksi kelongsong bahan bakar dengan oksigen yang mengakibatkan terbentuknya hidrogen dalam jumlah besar, sementara di dalam gedung juga tersedia oksigen sehingga terjadi ledakan hebat. Belajar dari kejadian tersebut dan juga kejadian besar sebelumnya (*Three Miles Island* 28 Maret 1979 dan Chernobyl 26 April 1986) penelitian kelongsong dan bahan bakar yang mampu menahan suhu tinggi serta mampu menahan keluarnya produk fisi perlu diketahui.

Salah satu problem dalam pengembangan bahan bakar reaktor nuklir adalah ketahanan bahan bakar pada suhu tinggi, utamanya jenis reaktor suhu di atas 700°C atau tipe reaktor pembiak cepat (*fast breeder reactors*). Untuk mendapatkan bahan bakar yang mampu beroperasi pada suhu tinggi dengan cara konvensional, secara kimia melalui proses pengendapan, tidak bisa diperoleh karena kestabilan dimensinya sangat rendah. Bahan bakar  $UO_2$  ketika digunakan di reaktor akan mengalami pertumbuhan volume sebesar 0,5% untuk setiap  $1 \times 10^{20}$  pembelahan/cm<sup>3</sup>. Pertumbuhan ini ditandai dengan munculnya produk-produk hasil fisi, terutama bentuk gas. Apabila suhu naik hingga 1100°C bahan bakar akan mengalami pengelembungan lebih besar lagi disebabkan oleh gas produk fisi yang membentuk gelembung di dalam bahan bakar. Gelembung ini akan membesar seiring dengan naiknya suhu serta menurunnya kekuatan bahan bakar itu sendiri. Pada suhu tinggi mobilitas gas bertambah tinggi sebanding dengan jumlah gas yang terbentuk (Krappe dan Pomorski, 2012).

Dalam pengembangan bahan bakar reaktor tipe HTR (*High Temperature Reactors*) kualifikasi yang harus dipenuhi diantaranya (a) mampu menahan produk hasil fisi secara optimal apabila terjadi kecelakaan (mampu menampung fraksi nuklida sebesar  $1 \times 10^{-4}$ , khususnya material radiologi), (b) memiliki kekuatan material tinggi, (c) memiliki ketahanan korosi tinggi terhadap oksidator di kolam pendingin primer, (d) memiliki kestabilan dimensi tinggi (perubahan diameter kernel  $\geq 2\%$  akibat *handling*), (e) memiliki karakteristik perpindahan panas yang efektif (dibandingkan dengan grafit). Untuk melengkapi kualifikasi bahan bakar tipe HTR yang tidak bisa dipenuhi dengan jenis  $UO_2$  konvensional, maka  $UO_2$  perlu dikenai proses tambahan yaitu  $UO_2$  diubah dari bentuk serbuk menjadi kernel. Kernel kemudian dilapisi dengan bahan pelapis yang mampu mengungkung kernel  $UO_2$  tetap stabil pada suhu tinggi dan sekaligus mampu mengungkung produk fisi yang dihasilkan selama kernel dioperasikan di reaktor. Lapisan pengungkung yang sudah digunakan secara komersial adalah pirokarbon, suatu bahan grafit yang telah mengalami pemanasan 1400 °C dan injeksi gas dalam suasana vakum tinggi. Dengan

cara ini karbon yang dihasilkan akan bebas dari segala gas dan aerosol yang terkandung di dalamnya, sementara atom-atom karbon akan bergabung sehingga kerapatannya meningkat (van Rooyen dkk., 2014).

*High temperature gas cooled reactor* (HTGR) merupakan reaktor nuklir pembangkit tenaga yang pernah dioperasikan dengan sukses di Jerman pada tahun 1980 dan sangat menjanjikan ditinjau dari sisi keselamatan karena adanya karakter *inherent safety* yang meliputi: memiliki tingkat keamanan dan efisiensi termal yang tinggi, *superior proliferation resistance attributes*, *efficient fuel resource utilization*, dan daya saing ekonomi tinggi, sehingga HTGR memiliki potensi yang besar untuk pembangkit listrik tenaga nuklir masa depan. Salah satu kekuatan pendorong filosofi HTGR adalah pemanfaatannya dalam produksi panas. Dalam beberapa desain HTGRs, efisiensi termal bersih lebih besar dan bisa mencapai lebih dari 45%. Suhu gas keluar yang tinggi juga dapat dimanfaatkan sebagai sumber panas termal dalam proses kimia endotermik seperti untuk pencairan batubara dan peningkatan produksi hidrokarbon pada sumur minyak yang sudah tua, desalinasi air laut, dan produksi hidrogen. Masa konstruksi pendek, modularitas dan biaya modal yang rendah juga karakteristik menarik dari HTGRs memotivasi para ahli nuklir untuk fokus pada pengembangan HTGR (IAEA, 2010).

Untuk mengakomodasi suhu dan tekanan gas internal yang tinggi serta mampu mengungkung produk fisi bahan bakar  $UO_2$  digunakan bahan pelapis terbuat dari bahan grafit dan SiC yang dikenal dengan *tristructural isotropic* (TRISO).

Bahan bakar tipe TRISO- $UO_2$  telah digunakan di reaktor berdaya 330 MW(e) *Fort Saint Vrain*, Colorado, USA 1979-1989; reaktor berdaya 15 MW(e) AVR (*Arbeitsgemeinschaft Versuchs Reactor*) 1967-1988, Julich; reaktor berdaya 300 MW(e) THTR (*Thorium High Temperature Reactor*), April 1985-November 1985, North Rhine, Jerman; reaktor berdaya 10 MW(t) HTR-10, Tsinghua University, China. Untuk HTR-10, konstruksi dimulai tahun 1995, kriticalitas dicapai pada Desember 2000, dan beroperasi penuh pada January 2003. Ada lagi, reaktor riset berdaya 30 MW(t) HTTR (*High Temperature Testing Reactor*), Oarai, Jepang. Kebetulan Penulis pernah melakukan penelitian di HTTR tahun 1999. Semua reaktor tersebut di atas menggunakan  $UO_2$  kernel sebagai bahan bakarnya. Hingga saat ini hanya HTR-10 China dan HTTR Jepang yang masih beroperasi (IAEA, 2015).

Bahan bakar uranium nitride (UN) dipromosikan bisa digunakan sebagai pengganti  $UO_2$  karena memiliki kemiripan karakter (IAEA, 2010; Rupak dkk., 2012). Tabel 1 menampilkan spesifikasi beberapa senyawa uranium.

Dari Tabel 1 tampak bahwa senyawa UN memiliki potensi bisa digunakan sebagai bahan bakar nuklir karena memiliki titik lebur tinggi, densitas tinggi, tampang lintang serapan neutron tinggi dan

konduktivitas termal yang tinggi. Karakter ini memenuhi criteria sebagai bahan bakar nuklir untuk daya tinggi. Senyawa UN bisa diperoleh dengan proses nitriding pada suhu > 665°C, yaitu suhu di atas transformasi a-bU. Perbandingan lebih spesifik antara UO<sub>2</sub> dan UN ditampilkan pada Tabel 2.

Kegunaan lapisan TRISO yang terdiri dari 3 lapisan adalah sebagai berikut: Lapisan *buffer* karbon berfungsi untuk menyediakan ruang kosong bagi produk hasil fisi dan CO, mengakomodasi pembengkakan kernel, dan melindungi lapisan TRISO dari recoil produk fisi. Lapisan *inner pyrocarbon* (iPyC) berfungsi untuk menahan gas produk fisi, sebagai penahan produk fisi bentuk logam, dan sebagai pelindung mekanik aktif endapan SiC. Lapisan silikon karbida berfungsi sebagai barrier pertama produk fisi, penahan semua gas dan produk fisi padat lainnya dan sebagai lapisan penahan beban. Lapisan *outer pyrocarbon* (oPyC) berfungsi untuk menahan gas produk fisi, menciptakan beban tekan untuk SiC selama iradiasi (*irradiation shrinkage*), dan menyediakan lapisan *bonding* dengan karbon untuk matrix bahan bakar (Hunt dkk., 2014; Washington dkk., 2014).

Pembuatan logam UN berbentuk bola dengan ukuran butir lembut antara 0,65-0,80 mm dengan cara konvensional tidak dapat dilakukan karena bentuknya tidak beraturan. Bahan bakar yang memiliki karakter *freeflowing* sangat baik, densitas tinggi, dan permukaan yang halus bisa dipenuhi dengan membentuk partikel serbuk berbentuk bola. Salah satu metode yang umum digunakan untuk metalurgi serbuk logam berbentuk bola dengan diameter 0,65-0,80 mm adalah dengan proses atomisasi logam cair dengan gas inert, dalam suatu ruang tertutup (Ashgriz, 2011). Dengan mengganti gas inert dengan nitrogen

kemurnian tinggi, maka selain berfungsi sebagai pendingin juga sebagai pereaksi sehingga akan diperoleh paduan U-N. Proses atomisasi dengan gas nitrogen sebagai media dirancang untuk mendapatkan bentuk butir seperti bola dengan *atomizer*, yaitu mengubah logam uranium dalam bentuk cair, disemburkan kedalam ruang pendingin berupa piring putar, dipertemukan dengan semburan dengan gas nitrogen dan diharapkan akan terbentuk bola dengan ukuran 0,65-0,80 mm.

Pembuatan paduan U-N dengan proses hidriding-dehidriding dan diikuti dengan proses nitriding telah dilakukan (Suwarno, 2013). Dengan cara ini hasil UN sangat murni namun serbuk yang dihasilkan terlalu halus dan tidak berbentuk kernel.

Reaksi uranium dengan gas nitrogen bisa berlangsung pada suhu yang bervariasi diatas 400°C. Paduan UN terbentuk bersifat sebagai senyawa stabil hingga suhu 2700°C. Gambar 1 menampilkan diagram fasa sistem uranium-nitrogen, dimana selain UN masih ada senyawa U<sub>x</sub>N<sub>y</sub> yang merupakan senyawa tidak stabil dibandingkan dengan UN (Massalski, 1990).

Titik leleh UN yang tinggi, sedikit lebih rendah dari titik leleh UO<sub>2</sub>, namun memiliki densitas lebih tinggi, senyawa ini bisa dipromosikan sebagai substitusi UO<sub>2</sub>. Pertimbangan lain yang diajukan adalah bahwa untuk membuat UO<sub>2</sub> bentuk bola diperlukan proses yang sangat panjang, mulai dari proses penyediaan larutan nitrat, proses pengendapan melalui proses ADU (ammonium diuranate), AUC (ammonium uranyl carbonate), atau ADUN (acid deficiency uranyl nitrate) sehingga terbentuk endapan berbentuk bola, pengeringan membentuk UO<sub>3</sub> dan dilanjutkan dengan proses kalsinasi membentuk U<sub>3</sub>O<sub>8</sub> sebelum akhirnya direduksi menjadi senyawa UO<sub>2</sub> bentuk bola. Proses kimia ini cukup panjang, biaya

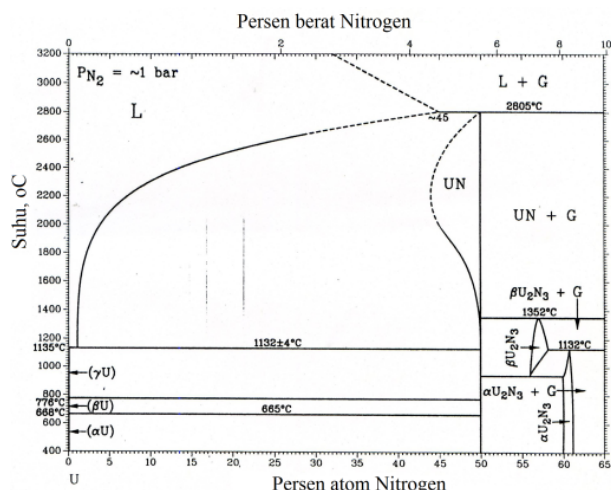
Tabel 1. Sifat beberapa senyawa uranium

Senyawa	Densitas g/cc	Kand. U (%)	Titik lebur, °C	Penampang serapan netron/(barn)
U	19,13	100	1128	0,1637 (*,**)
UN	14,32	71	2650	0,1824 (*,**)
UC	13,63	69	2350	0,1143 (*,**)
U <sub>3</sub> Si <sub>2</sub>	12,20	59	1665	0,1010 (*,**)
UC <sub>2</sub>	11,68	56	2500	0,0917 (*,**)
UO <sub>2</sub>	10,96	53	2750	0,0838 (*,**)
UAl <sub>2</sub>	8,26	35	1590	0,0696 (*,**)
C13	2,25	-	3550	1,4±0.2 (***)
C12	2,25	-	3550	0,0065 (***)

\* IAEA (2003), \*\* Rupak dkk., (2012), \*\*\* Shigyo dkk., (2014)

Tabel 2. Perbandingan karakter UO<sub>2</sub> dan UN (Feng dkk., 2012)

Karakter	UO <sub>2</sub>	UN
Densitas teoritis (g/cm <sup>3</sup> )	10,96	14,32
Densitas terukur (g/cm <sup>3</sup> )	9,67	13,52
Panas spesifik (J/kg K)	330 (1000 °C)	230 (1000 °C)
Titik lebur (°C)	2800	2700
Suhu disosiasi (°C)	N/A	1700
Modulus elastisitas (GPa)	200 (800 °C)	260 (800 °C)
Fracture stress (MPa)	130 (800 °C)	370 (800 °C)
Kecepatan <i>creep</i> karena iradiasi (800 °C)	1	0,1
Konduktivitas termal (W/m K)	7,19 (200 °C)	12 (200 °C)
	3,35 (100 °C)	20 (1000 °C)



Gambar 1. Diagram fasa sistem uranium-nitrogen

tinggi, limbah cair yang cukup banyak, dan prosen kegagalannya cukup tinggi. Dengan pertimbangan ini maka melalui metode pelelehan uranium langsung melalui proses atomisasi dipandang lebih praktis dan ekonomis.

Proses pelapisan senyawa UN dengan karbon dan senyawa SiC sebagai TRISO dipromosikan sebagai pengungkungnya. Partikel TRISO akan berfungsi sebagai penghambat pelepasan produk hasil fisi pada suhu tinggi dan dalam suasana oksidasi (Besmann dkk., 2014). Lapisan SiC dipilih karena memiliki konduktivitas termal yang tinggi dan tahan terhadap oksidasi sehingga bahan bakar dapat beroperasi pada suhu relatif rendah dan mampu mengungkung produk hasil fisi. Oleh karena itu lapisan TRISO akan menahan produk hasil fisi agar tidak keluar dari inti bahan bakar pada suhu tinggi dan dalam suasana oksidasi bila lapisan pertama inti bahan bakar gagal. Konfigurasi bahan bakar TRISO ini harus dibuat dengan mengatur volume fraksi uranium sehingga fraksi produk hasil fisi yang dihasilkan mampu dikungkung dengan aman. Hal ini dapat dicapai dengan mengatur tebal lapisan TRISO. Paper ini membahas pembuatan kernel UN, proses lapisan TRISO-UN dan karakterisasinya untuk dipromosikan sebagai bahan bakar tipe pelet reaktor suhu tinggi.

**METODE PENELITIAN**

Gagasan ini disusun setelah melihat karakter UN yang tidak berbeda jauh dengan UO<sub>2</sub>. Metodologi yang digunakan adalah dengan melakukan kajian pembuatan senyawa UN, pembuatan kernel UN, pembuatan senyawa TRISO-UN, dengan cara mengumpulkan berbagai sumber di jurnal internasional, data tersedia di *International Atomic Energy Agency* (IAEA) yang terkait dengan senyawa UN. Pembuatan senyawa UN berbentuk kernel bisa dilakukan dengan beberapa teknik, pembuatan senyawa TRISO-UN menggunakan teknologi sama dengan cara pembuatan TRISO-UO<sub>2</sub> karena belum ada teknologi lain. Pembuatan *full size* bahan bakar TRISO-UN tergantung dari jenis HTGR yang

dirancang dan tidak dibahas dalam makalah ini. Karakter TRISO-UN juga dipresentasikan dalam makalah ini.

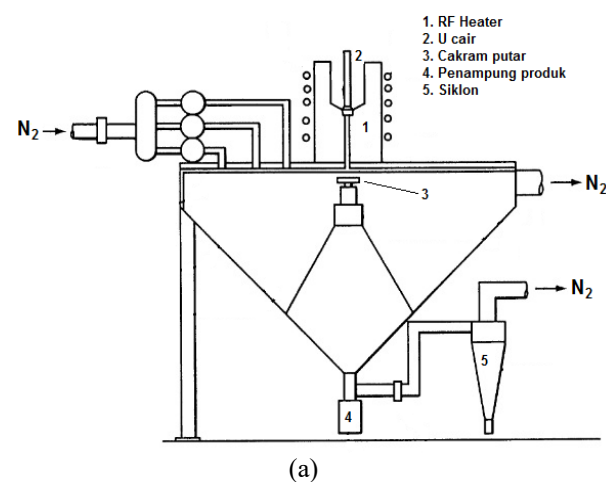
**HASIL DAN PEMBAHASAN**

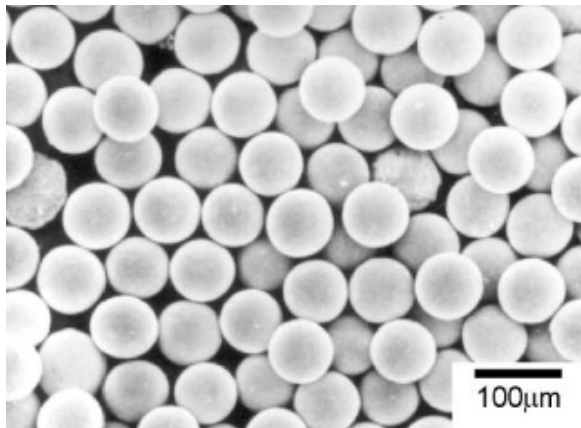
**Pembuatan Bahan Bakar Kernel**

Untuk membuat paduan UN yang termasuk kelompok bahan bakar non-oksida banyak metode yang digunakan, baik secara kimia, peleburan, dan interaksi metal-gas. Berikut ini akan disajikan beberapa teknologi tersebut.

**Proses atomisasi**

Proses atomisasi dilakukan terhadap logam uranium bentuk serbuk atau serpihan menggunakan proses atomisasi sentrifugal. Dalam proses ini digunakan sebuah *atomizer* yang dilengkapi dengan sistem vakum dan pemanas listrik frekuensi tinggi atau tungku induksi yang dapat menghasilkan suhu hingga 2300°C (Yang, 2012; Yang, 2014). Potongan logam U diletakkan di *crucible* alumina, dipanaskan hingga 1300°C dengan kecepatan pemanasan 70°C/min dalam suasana gas N<sub>2</sub> dan dilakukan aniling selama ½ jam untuk membentuk senyawa nitride. Sampel dipanaskan hingga suhu 1600°C dalam suasana argon dengan gas berupa campuran 10% H<sub>2</sub>-Ar untuk mendapatkan fasa tunggal uranium mono nitrid, UN. Dengan cara ini diperoleh paduan UN dengan bentuk kernel. Diameter kernel UN yang diinginkan tergantung dari spesifikasi/kondisi operasi alat dan untuk mendapatkan diameter kernel UN sesuai yang diinginkan diperlukan analisis kondisi operasi peralatan. Gambar 2 adalah skhema alat pembuat kernel UN yang dipatenkan oleh Chang Kyu Kim (Chang, 1999). Alat ini digunakan juga untuk membuat paduan U<sub>3</sub>Si, U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>, dan paduan senyawa uranium dengan logam lain dengan hasil akhir bentuk kernel dengan diameter yang bervariasi.



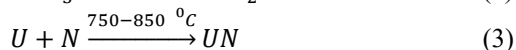
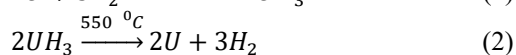
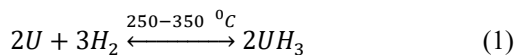


(b)

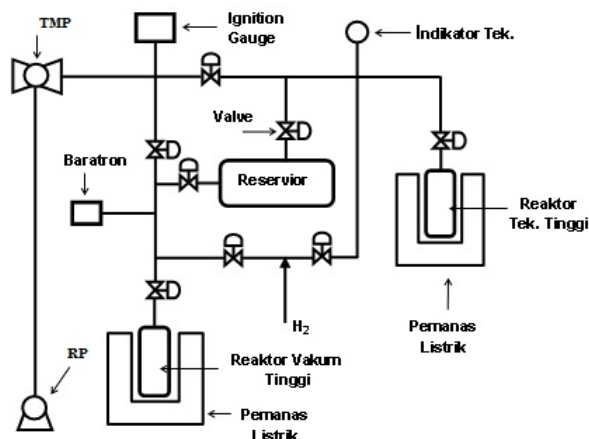
Gambar 2. (a) Centrifugal atomizer yang digunakan dan (b) hasil kernel UN (Kim dkk., 1999)

**Proses hidriding-dehidriding dan nitriding**

Proses hidriding-dehidriding dan diikuti dengan nitriding adalah metode lain untuk membuat paduan UN. Dalam metode ini diperlukan suatu alat hidriding-dehidriding yang mengikuti prinsip Sievert. Proses pembuatannya adalah sebagai berikut. Logam uranium dalam bentuk serpihan dihidriding pada suhu 250-350°C sehingga menjadi serbuk UH<sub>3</sub>. Dengan proses dehidriding pada suhu 550°C, UH<sub>3</sub> akan terurai menjadi logam U dan H<sub>2</sub>. Logam U kemudian dinitriding pada suhu 750-850°C akan berubah menjadi senyawa UN. Reaksi hidriding, dehidriding, dan nitriding dapat dituliskan sebagai berikut.



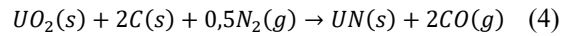
Gambar 3 adalah sistem Sievert yang dikembangkan oleh penulis (Suwarno, 2013). Dengan sistem ini dapat dibuat senyawa UN dengan hasil akhir dalam bentuk serbuk. Untuk mengubah bentuk serbuk menjadi kernel diperlukan proses lanjutan, seperti atomizer.



Gambar 3. Sistem hidriding-dehidriding dan nitriding

**Proses carbotermik**

Proses reduksi carbotermik dilakukan dengan mereaksikan UO<sub>2</sub> dengan karbon dan nitrogen dengan reaksi sebagai berikut:



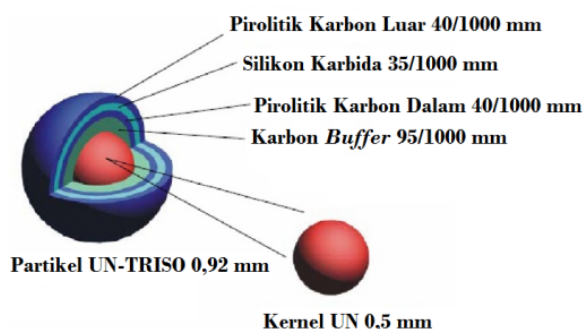
Dalam proses carbotermik UN, gas N<sub>2</sub> memegang dua peranan penting sebagai reaktan dan sebagai *carrier* untuk gas CO yang dihasilkan. Produk reaktan yang diperoleh memiliki formula UN<sub>1-x-y</sub>C<sub>x</sub>O<sub>y</sub>. Oksigen dan karbon yang tinggal di dalam paduan UN tergantung dari tekanan parsial nitrogen dan karbon monoksida, kecepatan alir gas (N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>), rasio molar oksigen dan karbon dari campuran UO<sub>2</sub>-C dan penggunaan hidrogen untuk mengusir kelebihan karbon. Karbon digunakan untuk mereduksi UO<sub>2</sub> sedang nitrogen digunakan untuk mengonversi menjadi UN. Proses pembuatan UN dengan metode carbotermik adalah sebagai berikut. Serbuk UO<sub>2</sub> dicampur dengan serbuk karbon, digiling kemudian dilakukan proses carbothermic nitriding secara bersamaan pada suhu 1552°C selama 48 jam. Hasilnya berupa serbuk senyawa UN. Serbuk kemudian dikenai proses pre-kompaksi menjadi kernel pada tekanan 280-350 MPa, dengan densitas kernel 60-65% T.D. Kernel disintering menjadi UN dengan densitas mencapai 97%. Untuk mendapatkan senyawa fasa tunggal UN dengan kandungan oksigen dan karbon yang rendah digunakan karbon sebanyak 10% masa berlebihan agar membentuk campuran oksida karbon dan sintesa dilakukan pada suhu 1500-1600°C dalam suasana gas N<sub>2</sub>, diikuti dengan aliran campuran N<sub>2</sub>+H<sub>2</sub> dan Argon. Gas CO yang dihasilkan harus dimonitor secara kuantitatif (Lindemer dkk., 2014; Phillips dkk., 2012).

**Pembuatan TRISO-UN**

Gambar 4 menampilkan skema senyawa TRISO-UN yang akan dibuat, mencakup contoh dimensi kernel, lapisan *buffer*, iPyC, SiC, oPyC. Proses pelapisan kernel UN, seperti halnya UO<sub>2</sub>, dapat dideskripsikan sebagai berikut. Dengan sebuah reaktor fluidisasi yang dilengkapi dengan sistem pemanas listrik, reaktor dipanaskan hingga suhu 1100°C untuk melapisi kernel dengan campuran gas (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> + Ar) sehingga terbentuk lapisan *buffer* yang bersifat *porous* tebal 95/1000 mm, dilanjutkan dengan pembentukan lapisan pirolitik karbon bagian dalam (iPyC) pada suhu 1400°C dengan menggunakan campuran gas (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> + Ar) hingga diperoleh tebal lapisan 40/1000 mm, dilanjutkan dengan pelapisan silikon karbida dengan menggunakan campuran gas MTS (*Metyl TrichloroSilene*, CH<sub>3</sub>SiCl<sub>3</sub>) + H<sub>2</sub> + Ar hingga tebal lapisan 35/1000 mm pada suhu 1500°C, dilanjutkan dengan pelapisan pirolitik karbon bagian luar (oPyC) dengan gas (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> + Ar) untuk membentuk lapisan *buffer* tebal 40/1000 mm pada suhu 1400°C.

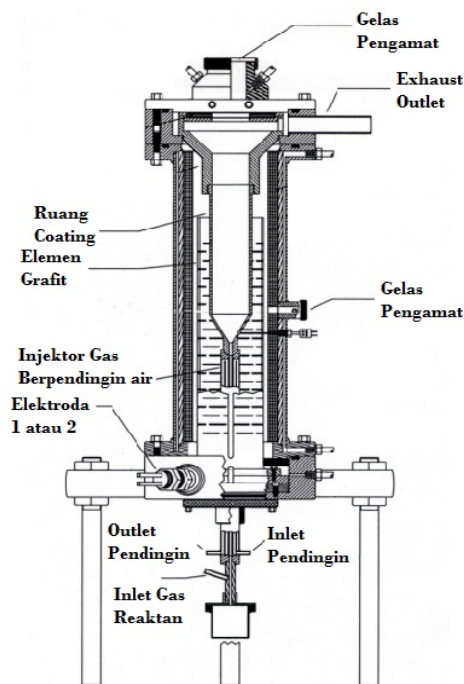
Untuk membuat lapisan TRISO hingga saat ini hanya ada satu teknologi yang dipakai, biasa disebut *fluidized bed chemical vapor deposition* (FBCVD). Alat ini sudah dikembangkan di Amerika (Jolly dkk., 2015), Charollais dkk., CEA & AREVA HTR *fuel*

particle manufacturing and characterization R & D program, ATALANTE, June, 2004 di Perancis, sementara Jerman menggunakan teknologi Amerika (USNRC, Technical Report, 19 July 2012, <http://www.nrc.gov/docs/ML1204/ML12045A014.pdf>). Pabrik bahan bakar HTGR saat ini hanya ada di China dan Jepang.



Gambar 4. Skematis partikel TRISO-UN

Gambar 5 menampilkan tungku pelapis (*coating*) yang tersusun atas sebuah ruangan pelapis grafit berbentuk konis yang dikelilingi oleh elemen pemanas yang dikungkung dengan dinding pemanas air. Gas dialirkan melalui injektor, sedangkan kernel UN dimasukkan melalui bagian atas bersama dengan gas Ar melalui sebuah injektor. Setiap kali proses pelapisan selesai sistem didinginkan hingga suhu kamar, kemudian dilanjutkan dengan proses pelapisan tahap berikutnya. Setelah tahap proses pelapisan selesai kernel dikumpulkan melalui bagian bawah injektor.

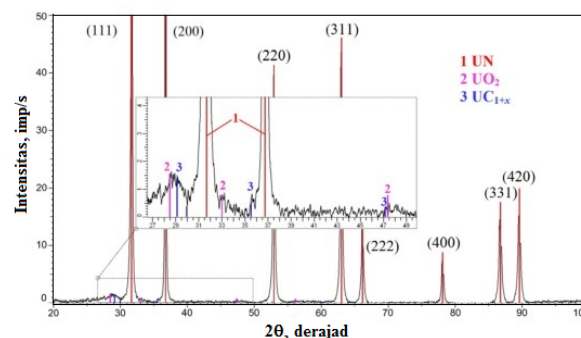


Gambar 5. Reaktor fluidisasi untuk pembuatan TRISO-UN (Jolly dkk., 2015).

Untuk mendapatkan spesifikasi TRISO-UN sesuai dengan yang diinginkan perlu dilakukan penelitian sehingga diperoleh kondisi operasi alat yang digunakan. Hingga saat ini belum ada yang melakukan penelitian pembuatan TRISO-UN dengan metode atomisasi.

**Beberapa Analisis Kernel UN Analisis difraksi sinar X (XRD)**

Defraksi sinar-x merupakan metode umum untuk menganalisis pembentukan senyawa UN. Gambar 6 menampilkan hasil XRD yang disampaikan oleh Baranov menggunakan metode carbothermik (Baranov dkk., 2016). Spektrum XRD digambarkan dengan garis-garis yang menyatakan adanya UN, UO<sub>2</sub>, maupun UC<sub>1+x</sub>. Konsekuensi pembuatan senyawa UN dengan metode ini adalah ada senyawa UC<sub>1+x</sub> maupun UO<sub>2</sub> karena proses nitriding yang tidak sempurna. Hal ini ditunjukkan dengan hasil analisis kuantitatif seperti ditampilkan dalam Tabel 3. Dari Tabel 3 tampak tidak ada senyawa *sesquinitride* (U<sub>2</sub>N<sub>3</sub>), seperti yang terjadi apabila menggunakan proses hidriding, dehidriding dan nitriding.

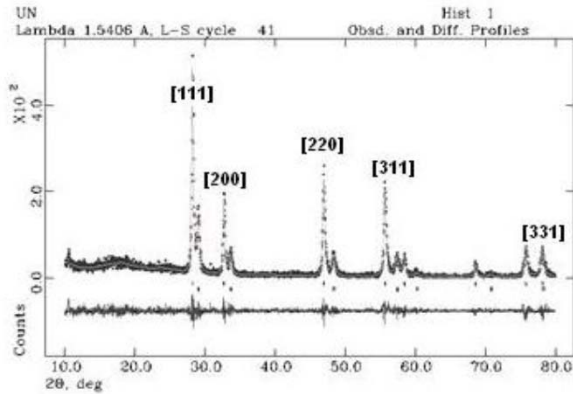


Gambar 6. Hasil XRD UN dibuat dengan metode carbothermik (Baranov dkk., 2016)

Tabel 3. Hasil analisis komposisi UN dibuat dengan metode carbothermik (Baranov dkk., 2016)

Senyawa	% masa	Elemen	% masa
U	94,28	UN	96,4
O	0,19	UO <sub>2</sub>	1,84
N	5,38	UC <sub>1+x</sub>	1,76
C	0,15		

Spektrum XRD senyawa UN dibuat dengan metode hidriding, dehidriding dan nitriding ditampilkan pada Gambar 7 (Suwarno, 2013). Dari analisis XRD diindikasikan bahwa puncak-puncak spektrumnya adalah senyawa UN dengan sedikit kandungan senyawa U<sub>2</sub>N<sub>3</sub>. Dengan teknik ini partikel senyawa UN yang diperoleh adalah dalam bentuk serbuk tanpa ada pengotor UO<sub>2</sub> maupun UC<sub>1+x</sub>. Untuk menjadi kernel masih diperlukan proses lanjutan. Tergantung dari metode pembuatan, senyawa UN murni jarang ditemui, namun hasil yang diperoleh oleh Feng, dkk. (2012) merupakan hasil yang paling baik.



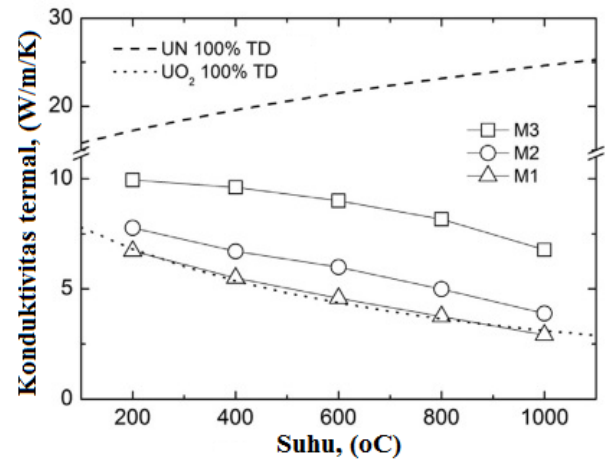
Gambar 7. Hasil XRD UN dibuat dengan metode hidriding, dehidriding, nitriding (Suwarno, 2013)

**Analisis mikrostruktur**

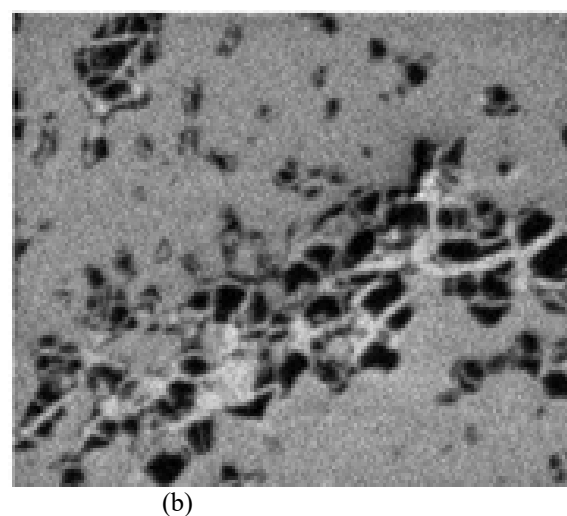
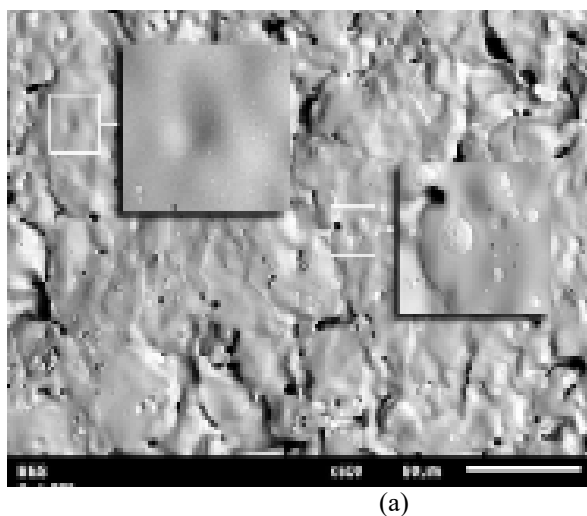
Mikrostruktur UN yang diperoleh dari proses nitriding uranium telah dilakukan oleh Malkki dengan metode hidriding, dehidriding dan nitriding (Malkki, 2015). Gambar 8a menunjukkan senyawa UN yang homogen yang merupakan struktur kubus dengan sedikit mengandung porositas yang ditunjukkan dengan noda-noda tak berwarna. Porositas bisa dideteksi sebagai porositas tertutup dengan densitas terukur (Shigyo dkk., 2014). Hasil pemeriksaan elemental dengan *Wavelength Dispersive Spectroscopy* (WDS) menunjukkan bahwa ada beberapa titik menunjukkan adanya senyawa *sesquinitride*,  $U_2N_3$ , seperti ditunjukkan dengan warna gelap. Hal ini dimungkinkan oleh proses reduksi yang tidak sempurna selama sintering pada suhu  $> 1600^{\circ}C$ , seperti ditunjukkan dalam Gambar 8b. Waktu sintering yang lebih lama akan menyempurnakan pembentukan senyawa UN.

**Analisis sifat termal**

Analisis sifat termal senyawa UN berupa pengukuran konduktivitas termal telah dilakukan oleh beberapa peneliti. Gambar 9 menampilkan konduktivitas termal yang diperoleh oleh Yang untuk senyawa UN yang diperoleh dengan metode atomisasi (Yang, 2015). Tampak bahwa UN memiliki konduktivitas termal yang lebih tinggi dibanding dengan  $UO_2$ , maupun UN yang mengandung  $UO_2$  dan  $U_2N_3$ . Adanya  $UO_2$  diindikasikan sebagai proses nitriding yang tidak sempurna, sedangkan adanya  $U_2N_3$  (biasa ditulis sebagai  $UN_{1,5+x}$ ) disebabkan oleh tidak sempurnanya proses sintering. Dari uji mikrostruktur juga ditunjukkan bahwa adanya  $U_2N_3$  menyebabkan naiknya porositas. Dari analisis XRD oleh Yang diperoleh bahwa kandungan senyawa  $U_2N_3$  dalam orde ppm, mirip dengan hasil analisis XRD yang dihasilkan oleh Baranov (Baranov dkk., 2016). Data konduktivitas UN yang ditampilkan oleh Yang juga mirip dengan hasil yang diperoleh oleh Baranov.



Gambar 9. Konduktivitas termal senyawa UN dan  $UO_2$  (Baranov dkk., 2016).



Gambar 8. (a) Mikrostruktur UN dengan sedikit porositas dan (b) WDS mapping unsur N (Lunev dkk., 2016; Malkki, 2015).

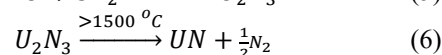
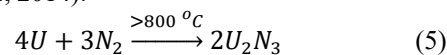
**Efek radiasi**

Belum ada peneliti yang menganalisis hasil paska iradiasi kernel TRISO-UN dengan bahan SiC untuk iPyC dan oPyC. Yang disampaikan dalam makalah ini adalah hasil analisis Bessman dari *Oak Ridge National Laboratory*, USA, dengan *computer code PERFUME (PARTicle FUEL ModeEL)* untuk menghitung gas produk fisi dan digabung dengan perangkat lunak *COMSOL Multiphysics* untuk kalkulasi elemen hingganya (*finite element*) (Yang, 2015). Urutan kalkulasi yang dilakukan adalah mencari probabilitas mampu bertahan (*survival*) dan tekanan maksimum ke arah tangensial, untuk kernel ukuran kernel 0,65 mm dan 0,80 mm sebagai fungsi dari tebal buffer, tebal PyC dan tekanan maksimum. Setelah diperoleh data ketahanan kernel arah tangensial kemudian dikalkulasi tekanan minimum (Ps) dan stress maksimum untuk PyC ( $\sigma_{PyC}$ ) untuk nilai  $P_s \geq 0,99$  dan  $\sigma_{PyC} \leq 350$  MPa. Hasil kalkulasi ditampilkan pada Tabel 4. Dari tabel tampak bahwa untuk suhu operasi mencapai 800 °C, ketahanan kernel tidak dipengaruhi oleh tebal buffer dan tebal iPyC dan oPyC. Pada suhu 1250°C dan  $P_s \geq 0,99$ , kernel masih memiliki ketahanan yang bagus pada kondisi tebal *buffer* dan iPyC dan oPyC tertentu. Hasil kalkulasi ini harus dibuktikan dengan analisis di laboratorium.

**Aplikasi bahan bakar di reaktor**

Dari pembahasan tampak bahwa pembuatan senyawa UN kernel dipandang lebih mudah dibanding dengan UO<sub>2</sub> kernel karena tanpa melalui rute proses kimia cair yang panjang serta tidak menghasilkan limbah cair. Sementara itu, dari tiga metode fabrikasi UN yang diterangkan di atas, metode *atomizing*, hidriding-dehidriding diikuti dengan nitriding, serta *carbothermic*, nampak bahwa metode *atomizing* merupakan cara termudah untuk membuat senyawa UN karena dengan *atomizing* bahan dasar yang digunakan adalah logam uranium dalam bentuk masif yang dilelehkan dan bisa langsung dihasilkan senyawa UN dalam bentuk kernel. Hal ini telah dibuktikan oleh Yang dkk. (2011) yang telah menemukan metode terbaru untuk membuat senyawa UN dalam bentuk kernel. Ukuran kernel yang dihasilkan dapat diatur sesuai dengan yang diinginkan. Malkki membuktikan bahwa senyawa UN yang stabil tidak dapat diperoleh langsung karena ada 3 senyawa terbentuk, yaitu UN<sub>2</sub> dan U<sub>2</sub>N<sub>3</sub>, selain UN.

Untuk memperoleh senyawa UN langkah-langkah reaksi yang ditempuh adalah sebagai berikut (Malkki dkk., 2014):



Tabel 4. Kondisi diterima untuk tebal PyC partikel TRISO-UN dengan  $\phi$  kernel 650 mm dan 800 mm sebagai fungsi tebal *buffer*, tebal PyC dan tekanan maksimum

Kondisi diterima: Diameter kernel = 650 mm, SiC = 35 mm									
Buffer Tebal, mm	Tekanan			Lapisan 10 mm PyC			Lapisan 15 mm PyC		
	800 °C P, (MPa)	1250 °C P, (MPa)	1600 °C P, (MPa)	800 °C Ps	1250 °C Ps	1600 °C Ps	800 °C Ps	1250 °C Ps	1600 °C Ps
25	9,46	76,6	230,00	Ya	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak
50	4,83	41,20	122,00	Ya	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak
75	3,30	28,30	84,90	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya
100	2,55	21,90	64,60	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya
Buffer Tebal, mm	Lapisan 20 mm PyC			Lapisan 25 mm PyC			Lapisan 30 mm PyC		
	800 °C Ps	1250 °C Ps	1600 °C Ps	800 °C Ps	1250 °C Ps	1600 °C Ps	800 °C Ps	1250 °C Ps	1600 °C Ps
25	Ya	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak
50	Ya	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak
75	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya
100	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya
Kondisi diterima: Diameter kernel = 800 mm, SiC = 35 mm									
Buffer Tebal, mm	Tekanan			Lapisan 10 mm PyC			Lapisan 15 mm PyC		
	800 °C P, (MPa)	1250 °C P, (MPa)	1600 °C P, (MPa)	800 °C Ps	1250 °C Ps	1600 °C Ps	800 °C Ps	1250 °C Ps	1600 °C Ps
25	7,22	59,60	179,00	Ya	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak
50	3,74	32,20	96,90	Ya	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak
75	2,59	22,40	66,60	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya
100	2,02	17,60	50,80	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya
Buffer Tebal, mm	Lapisan 20 mm PyC			Lapisan 25 mm PyC			Lapisan 30 mm PyC		
	800 °C Ps	1250 °C Ps	1600 °C Ps	800 °C Ps	1250 °C Ps	1600 °C Ps	800 °C Ps	1250 °C Ps	1600 °C Ps
25	Ya	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak
50	Ya	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Ya	Ya	Tidak
75	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya
100	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya



Dari persamaan (6) tampak bahwa senyawa UN bisa diperoleh pada suhu > 1500 °C, oleh karena itu proses sintering bisa dilakukan juga di alat *atomizer* yang digunakan.

**Pelapisan TRISO**

Alat untuk pelapisan TRISO-UN banyak macamnya, tergantung dari desain masing-masing pabrik pembuat. Untuk maksud ini dipilih alat *fluidized bed chemical vapor deposition* (FBCVD) buatan Amerika yang telah digunakan untuk memproduksi TRISO-UO<sub>2</sub> untuk reaktor HTGRs (Jolly dkk., 2015).

Bahan pelapis TRISO hingga saat ini dipakai adalah pirolitik carbon berpori (*buffer C*) berasal dari (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> + Ar), pirolitik karbon densitas tinggi bagian dalam (iPyC) berasal dari (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> + Ar), silikon karbida (SiC) berasal dari (CH<sub>3</sub>SiCl<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>), dan pirolitik karbon bagian luar densitas tinggi (oPyC) berasal dari (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub> + Ar) (Ueta dkk., 2011). Selama bahan bakar dioperasikan lapisan SiC telah diketahui akan melepas bahan radioaktif dari <sup>110m</sup>Ag yang harus dikendalikan karena pancaran emisi sinar-g yang kuat (umur paruh 249,8 hari) akan mengakibatkan permukaan bahan bakar diseliputi oleh helium sehingga akan menyulitkan operasi dan perawatan reaktor (van Rooyen dkk., 2014; van Rooyen dkk., 2014; Barrachin dkk., 2011). Akibatnya, integritas mekanik lapisan SiC akan berkurang, terutama setelah suhu mencapai 1700°C karena akan terjadi transformasi dari b-SiC menjadi a-SiC serta mengakibatkan dekomposisi termal. Oleh karena itu penelitian mengganti SiC dengan ZrC saat ini sedang dilakukan dengan intensif (Yang, 2016; Porter dkk., 2013; Kim dkk., 2014). Senyawa ZrC berfungsi untuk penangkap oksigen yang

akan membatasi pembentukan CO dan memperlambat migrasi kernel. Meskipun ZrC lebih menjanjikan namun hingga saat ini belum ada reaktor yang menggunakannya sebagai pengganti SiC. Oleh karena itu lapisan SiC tetap dipilih sebagai bahan pelapis UN.

Apabila bahan bakar UN ingin dikembangkan sebagai bahan bakar reaktor HTGR tipe *block*, maka spesifikasi bahan bakar HTTR, Jepang, seperti ditampilkan pada Tabel 5 bisa digunakan sebagai pertimbangan. Apabila tipe bahan bakar HTR-10, China, yang akan diacu, maka Tabel 6 adalah spesifikasinya. Data HTR-10 tidak komplit, namun kelengkapan spesifikasi bisa mengacu pada data HTTR-Jepang.

**KESIMPULAN**

Kajian pembuatan senyawa UN, pembuatan TRISO-UN, dan analisis karakter senyawa UN maupun TRISO-UN menunjukkan bahwa senyawa UN memiliki karakter yang mirip dengan UO<sub>2</sub>. UN memiliki densitas yang lebih tinggi, sehingga senyawa UN bisa dipromosikan sebagai bahan bakar baru untuk jenis reaktor suhu tinggi, HTR.

Teknologi atomizing dipilih untuk fabrikasi kernel UN karena lebih sederhana dan sedikit menghasilkan limbah. Teknologi pelapisan TRISO-UN mengikuti teknologi yang sudah ada untuk UO<sub>2</sub>, yaitu dengan *fluidized bed chemical vapor deposition*.

Spesifikasi bahan bakar tergantung dari jenis reaktor yang dirancang, apabila menggunakan reaktor HTR tipe *block*, maka spesifikasi yang digunakan oleh reaktor HTTR, Jepang bisa dijadikan pertimbangan. Sementara apabila tipe *pebble*, maka spesifikasi bahan bakar HTR-10, China bisa digunakan sebagai acuan.

Tabel 5. Spesifikasi bahan bakar HTTR, Jepang (Ueta dkk., 2011)

Bahan Bakar Kernel			
Diameter, µm	600 ± 55	<i>Fuel compact</i>	
Densitas, g/cc	10,63 ± 0,26	<i>Coated fuel particles packing fraction (%vol)</i>	30 ± 3
Impuritas, ppm KBE <sup>a</sup>	≤ 3	Impuritas, ppm KBE <sup>a</sup>	≤ 5
Lapisan Coating		<i>Exposed uranium fraction</i>	30 ± 3
Tebal lap. Buffer, mm	60 ± 12	Impuritas, ppm KBE <sup>a</sup>	≤ 5
Tebal lap iPyC, mm	30 ± 6	<i>Exposed uranium fraction</i>	≤ 1,5x10 <sup>-4</sup>
Tebal lap. SiC, mm	25	<i>SiC failure fraction</i>	≤ 1,5x10 <sup>-3</sup>
Tebal lap. oPyC, mm	45 ± 6	Diameter luar, mm	26,0 ± 0,1
Densitas Buffer, g/cc	1,10 ± 0,10	Diameter dalam, mm	10,0 ± 0,1
Densitas lap. iPyC, g/cc	1,85	Tinggi, mm	577 ± 0,5
Densitas lap. SiC, g/cc	≥ 3,20	Densitas matriks, g/cc	1,70 ± 0,05
Densitas lap. oPyC, g/cc	1,85	Compressive strength, N	≥ 4900
OPTAF <sup>b</sup> untuk iPyC dan oPyC	≤ 1,03	<i>Fuel Rod</i>	
<i>Coated fuel particle</i>		Kandungan Uranium, g	189 ± 6
Diameter, mm	9,20	Panjang Total, mm	577 ± 0,5
<i>Sphericity</i>	≤ 1,2	Panjang fuel compact, mm	≥ 544

KBE: Kandungan Boron Ekuivalen  
OPTAF: *Optical anisotropic factor*

Tabel 6. Spesifikasi HTR-10 China dan bahan bakarnya (Wu dkk., 2002).

Items	Unit	Nilai
<i>Reactor thermal power</i>	MW	10
Volume teras aktif	M <sup>3</sup>	5
Power density rata-rata	MW/m <sup>3</sup>	2
Tekanan helium primer	MPa	3
Suhu helium masuk	°C	250/300
Suhu helium keluar	°C	700/900
Kecepatan alir helium	Kg/det	4,3/3,2
Bahan bakar		UN
Kandungan U <sup>235</sup>	%	17
Diameter bbn bentuk bola	Mm	60
Jumlah bbn		27.000
Model <i>refueling</i>		Multi-pass continuously
<i>Average discharge burnup</i>	MWd/t	80.000

### DAFTAR PUSTAKA

Ashgriz, N. (2011). *Handbook of Atomization and Sprays*, Springer, 2nd Ed., New York, pp. 133-145.

Barrachin, B., Dubourg, R., De Groot, S., Kissane, M.P., and Bakker K., (2011), Fission Product Behavior in Irradiated TRISO-Coated Particles: Results of the HFR-EU 1 Bis Experiment and their Interpretation, *Journal of Nuclear Materials*, 415, pp. 104-116.

Baranov, V.G., Tenishev, A.V., Kuzmin, R.S., Pokrovskiy, S.A., Mikhalkhik, V.V., Astafyev, V.A., Taubin, M.L., and Solntseva, E.S., (2016), Thermal Stability Investigation Technique for Uranium Nitride, *Analyses Nuclear Energy*, 87, pp. 784-792.

Besmann, T.M., Ferber, M.K. Lin, H.T., and Collin, B.P. (2014), Fission Product Release and Survivability of UN-Kernel LWR TRISO Fuel, *Journal of Nuclear Materials*, 448, pp. 412-419.

Feng, B., Karahan, A., and Kazimi, M.S., (2012), Steady-state Fuel Behavior Modelling of Nitride Fuels in FRAPCON-EP, *Journal of Nuclear Materials*, 427, pp. 30-38.

Hunt, R.D., Silva, C.M., Lindemer, T.B., Johnson, J.A., and Collins, J.L., (2014), Preparation of UC<sub>0,07-0,10</sub>N<sub>0,90-0,93</sub> Spheres for TRISO Coated Fuel Particles, *Journal of Nuclear Materials*, 448, pp. 399-403.

IAEA, (2003), Development Status of Metallic Dispersion and Non-Oxide Advanced and Alternative Fuels for Power and Research Reactors, *Technical Report*, IAEA-TECDOC-1374.

IAEA, (2010), High Temperature Gas Cooled Reactor Fuels and Materials, *Technical Report*, IAEA-TECDOC 1645.

IAEA, (2015), Technical Meeting on the Economic Analysis of High Temperature Gas Cooled Reactors and Small and Medium Sized Reactors, *IAEA 13-TM-50156*.

Jolly, B., Lindemer, T., and Terrani, K., (2015), Submit Report on Results from Initial Coating Layer Development for UN TRISO Particles, *Technical Report*, ORNL/LTR-2015/87 M3FT-15OR0202237.

Kim, C.K., Kim, K.H., Jang, S.J., Kim, E.S., Kuk, I.H., and Sohn, D.S., (1999), Dispersion Fuel with Spherical Uranium Alloy and the Fuel Fabrication Process, *US Patent, No. 5,978,432*.

Kim, D.J., Ko, M.J., Park, J.Y., Cho, M.S., and Kim, W.J., (2014), Influence of Free Carbon on the Characteristics of ZrC and Deposition of Near-Stoichiometric ZrC in TRISO Coated Particle Fuel, *Journal of Nuclear Materials*, 451, pp. 97-103.

Krappe, H.J. and Pomorski, K., (2012), A Text Book Series, *Theory of Nuclear Fission, Lecture Notes in Physics No. 838*, ISBN 978-3-642-23514-6.

Lindemer, T.B., Voit, S.L., Silva, C.M., Besmann, T.M., and Hunt, R.D. (2014), Carbothermic Synthesis of 820 lm Uranium Nitride Kernels: Literature Review, Thermodynamics, Analysis, and Related Experiments, *Journal of Nuclear Materials*, 448, pp. 404-411.

Lunev, A.V., Mikhalkhik, V.V., Tenishev, and Baranov, V.G. (2016). Kinetic and Microstructural Studies of Thermal Decomposition in Uranium Mononitride Compacts Subjected to Heating in High Purity Helium, *Journal of Nuclear Materials*, 475, pp. 266-273.

Malkki, P. (2015), The Manufacturing of Uranium Nitride for Possible Use in Light Water Reactors, *Licentiate Thesis*, Department of Reactor Physics, Royal Institute of Technology, Stockholm, pp. 30-34.

Malkki, P., Jolkkonen, M., Hollmer, T., and Wallenius, J. (2014), Manufacture of Fully Dense Uranium Nitride Pellets Using Hydride Derived Powders with Spark Plasma Sintering, *Journal of Nuclear Materials*, 452, pp. 548-551.

- Massalski, T.B., (1990), Binary Alloys Phase Diagrams, Metals Park, OH: *The American Society for Metals*, 2<sup>nd</sup> Edition, 3, pp. 2070-2072.
- Phillips, J.A., Nagley, S.G., and Shaber, E.L., (2012), Fabrication of Uranium Oxycarbide Kernels and Compacts for HTR Fuel, *Nuclear Engineering Design*, 251, pp. 261-281.
- Porter, I.E., Knight, T.W., Dulude, M.C., Roberts E., and Hobbs, J., (2013), Design and Fabrication of an Advanced TRISO Fuel with ZrC Coating, *Nuclear Engineering Design*, 259, pp. 180-186.
- Rupak, G, Fernando, L, and Vaghani, A., (2012), Radiative Neutron Capture on Carbon-14 in Effective Field Theory, *Physical Review*, C86, pp. 608-614.
- Shigyo, N., Uozumi, U., Uehara, H., Nishizawa, T. Mizuno, T., Takamiya, M., Hashiguchi, T., Satoh, D., Sanami, T., Koba, Y., Takada, M., and Matsufuji, N., (2014), Measurement of 100 and 290 MeV/A Carbon Incident Neutron Production Cross Sections for Carbon, Nitrogen and Oxygen, *Nuclear Data Sheets*, 119, pp. 303-306.
- Suwarno, H. (2013). Preparation of Uranium Nitride from Uranium Metal through by Hydriding and Nitriding Process, *Advanced Materials Research*, 789, pp. 360-366.
- Ueta, S., Aihara, J., Sawa, K., Yasuda, A., Honda, M., and Noboru Furihata, N. (2011), Development of High Temperature Gas-Cooled Reactor (HTGR) Fuel in Japan, *Progress in Nuclear Energy*, 53, pp. 788-793.
- van Rooyen, I.J., Gougar, M.L.D., and van Rooyen, P.M., (2014), Silver (Ag) Transport Mechanism in TRISO Coated Particles: A Critical Review, *Nuclear Engineering Design*, 271, pp. 180-188.
- van Rooyen, I.J., lillo, T.M., and Wu, Y.Q., (2014), Identification of Silver and Palladium in Irradiated TRISO Coated Particles of the AGR-1 Experiment, *Journal of Nuclear Materials*, 446, pp. 178-186.
- Washington, J., King, J., and Shayer, Z., (2014), Selection and Evaluation of Potential Burnable Absorbers Incorporated into Modified TRISO particles, *Nuclear Engineering Design*, 278, pp. 377-386.
- Wu, Z.X, Lin, D.C, and Zhong, D.X., (2002), The Design Feature of the HTR-10, *Nuclear Engineering Design*, 218, pp. 25-32.
- Yang, J.H., Kim, D.J., Oh, J.S., Kim, K.S., Rhee, Y.W., and Koo, Y.H., (2012), Fabrication of non-oxide uranium ceramic powders, Proceedings, Top Fuel, Reactor Fuel Performance, Manchester, United Kingdom, *European Nuclear Society*, paper No. A0087, pp. 201-210.
- Yang, J.H., Kim, D.J, Kim, K.S. Jong Hun KIM, Oh, J.S., Rhee, Y.W., and Koo, Y.H., (2014), Fabrication of Uranium-based Nitride Alloy Powders and Pellets, *Proceedings of WRFPM 2014*, Paper No. 100077, Sendai, Japan.
- Yang, J.H., Kim, D.J., Kim K.S., and Koo, Y.H., (2015), UO<sub>2</sub>-UN composites with enhanced uranium density and thermal, *Journal of Nuclear Materials*, 465, pp. 509-515.
- Yang, J.H., Park, J.M., and Kim, C.K., (2011), Fabrication and Characterization of the Uranium Nitride Layer Coated U-Mo Spherical Particles, *The 33<sup>rd</sup> RERTR 2011 International Meeting on Reduced Enrichment for Research and Test Reactors*, paper S11-P2, Santiago, Chile,
- Yang, Y.K. and Allen, T.R., (2016), The Measurement of Silver Diffusivity in Zirconium Carbida to Study The Release Behavior of 110 mAg in the ZrC-TRISO-Coated Nuclear Fuel Particle, *Journal of Nuclear Materials*, 470, pp. 76-83.