



PENGOLAHAN URANIUM DALAM BENTUK *YELLOW CAKE COGEMA* MENJADI SERBUK UO_2 SEBAGAI BAHAN BAKAR REAKTOR NUKLIR DI FASILITAS NUKLIR SERPONG

Putra Oktavianto^a, Ade Saputra^a, Andri Saputra^{b*}

^aPusat Riset Teknologi Bahan Nuklir dan Limbah Radioaktif – ORTN BRIN, KST BJ Habibie Gd 720, Tangerang Selatan, Banten 15313, Indonesia

^bProgram Studi Pengolahan Karet dan Plastik, Politeknik ATK Yogyakarta

Jl. Prof. Dr. Wirjono Projodikoro, Sewon, Bantul, Daerah Istimewa Yogyakarta, 55188, Indonesia

*E-mail: andri.saputra@atk.ac.id

Masuk Tanggal : 10 Mei, revisi tanggal: 17 Mei, diterima untuk diterbitkan tanggal : 6 Juni 2024

Abstrak

Indonesia mempunyai cadangan Uranium yang cukup besar saat ini. Kelompok riset Teknologi Galian Nuklir dari Pusat Riset Teknologi Bahan Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTBNLR) – ORTN BRIN telah melakukan pemetaan cadangan Uranium di Indonesia sekitar 81.090 ton dalam bentuk *yellow cake* yang akan mampu memenuhi kebutuhan 7 unit pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) dengan kapasitas masing-masing 1.000 MWe untuk beroperasi 40 tahun. Untuk memenuhi kebutuhan bahan bakar PLTN dalam negeri, Indonesia harus mampu untuk mengolah *yellow cake* tersebut menjadi bahan bakar yang dapat digunakan untuk PLTN sehingga kita tidak perlu untuk melakukan impor bahan bakar untuk PLTN. Pengolahan *yellow cake* menjadi bahan bakar nuklir salah satunya dilakukan pada fasilitas pemurnian dan konversi milik DPFK-BRIN yang dinamakan *pilot conversion plant* (PCP). PCP mempunyai kapasitas produksi 100 kg/hari serbuk UO_2 *nuclear grade*. Serbuk UO_2 yang dihasilkan PCP kemudian difabrikasi sampai menjadi elemen bahan bakar nuklir (EBN) di *Fuel Fabrication Laboratory* (FFL). PCP saat ini telah berhasil menghasilkan sekitar $\pm 15,5$ Kg serbuk UO_2 yang sudah *nuclear grade* dari pengolahan *yellow cake* yang berasal dari *cogema*. Saat ini PCP masih digunakan sebagai instalasi penelitian terkait optimalisasi parameter untuk setiap tahapan prosesnya sehingga dapat diperoleh parameter proses yang efektif dan efisien dengan mengutamakan kualitas produk serbuk UO_2 . Hal ini tentunya akan sangat penting dalam penyiapan kemandirian bangsa terhadap pengadaan energi dengan mengandalkan bahan bakar dari PLTN bisa diproduksi oleh Indonesia sendiri.

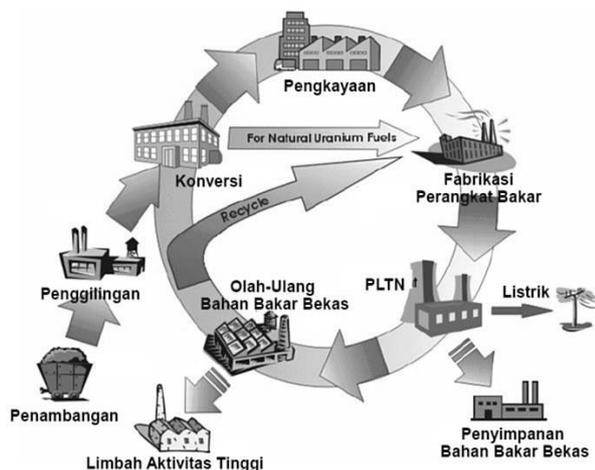
Kata Kunci: Uranium, *Yellow cake*, Derajat nuklir, Serbuk UO_2 , PLTN

Abstract

Indonesia has considerable uranium reserves at present. The Nuclear Excavation Technology research group from the Research Center for Nuclear Material and Radioactive Waste Technology (PRTBNLR)-ORTN BRIN has mapped the uranium reserves in Indonesia at around 81,090 metric tons in the form of *yellow cake*, which will be able to meet the needs of 7 units of nuclear power plants (NPP) with a capacity of 1,000 MWe each for 40 years of operation. To meet the fuel needs of domestic nuclear power plants, Indonesia must be able to process the *yellow cake* into fuel that can be used for nuclear power plants so that we do not need to import fuel for nuclear power plants. The processing of *yellow cake* into nuclear fuel is carried out at DPFK-BRIN's refining and conversion facility called the *Pilot Conversion Plant* (PCP). PCP has a production capacity of 100 kg/day of nuclear-grade UO_2 powder. The UO_2 powder produced by PCP is then fabricated into nuclear fuel elements (EBN) at the *Fuel Fabrication Laboratory* (FFL). PCP has currently succeeded in producing around ± 15.5 kg of UO_2 powder that has been nuclear grade from processing *yellow cake* originating from *cogema*. Currently, PCP is still used as a research installation related to optimizing parameters for each stage of the process so that effective and efficient process parameters can be obtained by prioritizing the quality of UO_2 powder products. This will certainly be very important in preparing the nation's independence in energy procurement by relying on fuel from NPP that can be produced by Indonesia itself.

1. PENDAHULUAN

Bijih Uranium yang berasal dari hasil tambang, kemudian diproses dengan proses *leaching* kimia untuk mengekstrak uranium. Proses ini akan menghasilkan material padat berbentuk padatan bubuk kering (konsentrat uranium) yang disebut *yellow cake* yang dijual di pasar sebagai U₃O₈ [1].



Gambar 1. siklus bahan bakar [2]

Siklus bahan bakar nuklir dimulai dari penambangan batuan uranium yang menghasilkan bijih uranium (*uranium ore*) dan limbah bebatuan. Setelah melalui proses penggilingan (*mill*) akan menjadi U₃O₈ yang biasa disebut sebagai uranium alam (*yellow cake*). *Yellow cake* yang digunakan adalah *yellow cake* yang berasal dari Cogema (sebuah perusahaan produsen uranium asal Perancis). *Yellow cake* dijadikan serbuk UO₂ melalui proses konversi yang dilakukan di *pilot conversion plant* (PCP). Serbuk UO₂ yang telah memenuhi derajat nuklir (*nuclear grade*) selanjutnya difabrikasi untuk menghasilkan perangkat bahan bakar nuklir yang akan digunakan dalam reaktor sebagai pembangkit daya di pembangkit listrik tenaga nuklir (PLTN) [3].

Dalam Prioritas Riset Nasional (PRN) 2020-2024, Indonesia mencanangkan pembangunan PLTN pada rencana pembangunan jangka menengah (RPJMN) 2020-2024, dengan pilihan PLTN berdaya rendah (*small modular reactor*, SMRs) dari generasi III dan III⁺ berbasis air ringan menggunakan bahan bakar uranium [4]. HTGR pun mulai dijadikan acuan dalam pemilihan tipe reaktor untuk PLTN yang akan dibangun pertama kali di Indonesia. Disisi lain, dalam mencapai target *net zero emission* (NZE) pada tahun 2060 sesuai dengan Peraturan Presiden No. 98 Tahun 2021 Tentang Nilai Ekonomi Karbon, Indonesia

merencanakan pengoperasian PLTN dimulai pada tahun 2045 dengan kapasitas sebesar 5 GW [5].

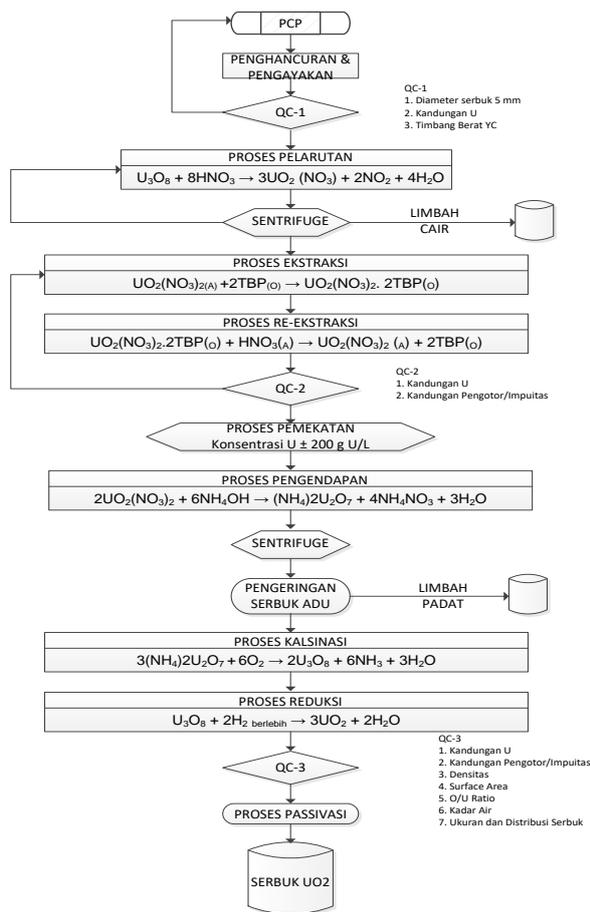
Untuk mendukung pembangunan PLTN perlu dilakukan analisis ketersediaan uranium agar dapat dibuat strategi pasokan uranium yang baik dan berkelanjutan. Pasokan uranium direncanakan berasal dari dalam negeri maupun luar negeri (*impor*). Hasil pemetaan yang telah dilakukan oleh kelompok riset Teknologi Galian Nuklir (TGN) – PRTBNLR – ORTN BRIN menunjukkan bahwa Indonesia memiliki cadangan uranium sekitar 81.090 ton dan tersebar di berbagai daerah [6].

Sebagian besar cadangan uranium kebanyakan berada di Kalimantan Barat sebagian lagi ada di Papua, Bangka Belitung dan Sulawesi Barat. Kajian terakhir dilakukan di Mamuju, Sulawesi Barat, dan deteksi pendahuluan menyebutkan kadar Uranium di lokasi tersebut berkisar antara 100 dan 1.500 ppm (mg/kg). Selain itu daerah lainnya di Indonesia yang berpotensi mengandung cadangan uranium cukup besar adalah Pulau Singkep, Tapanuli dan Hatapang Sumatera Utara, Sumatera Barat, Kalimantan Timur, Mamuju Sulawesi Barat, Maluku, Irian Jaya (Papua) dan lain-lain [7].

Dengan banyaknya cadangan uranium yang dimiliki Indonesia tentunya membuka peluang yang cukup besar untuk Indonesia mengembangkan bahan bakar PLTN secara mandiri di masa depan. Penelitian ini akan menjelaskan tentang proses pemurnian dan konversi uranium menjadi serbuk UO₂ yang digunakan sebagai bahan bakar nuklir pada PLTN. Hal ini tentunya akan menjadi pembuktian bahwa Indonesia telah siap memproduksi bahan bakar PLTN secara mandiri di masa depan.

2. METODOLOGI

Fasilitas pemurnian dan konversi uranium atau sering disebut *pilot conversion plant* (PCP) terdiri dari 12 seksi (seksi 100 sampai 1200) yang masing-masing seksi mempunyai tugas dan peran dalam melakukan proses. Tahapan proses yang dilakukan di PCP diperlihatkan dalam diagram alir proses berikut.



Gambar 2. Diagram Alir Proses (DAP) Konversi *Yellow Cake* menjadi serbuk UO_2 di PCP

2.1 Proses Pelarutan (Seksi 300)

Yellow cake terlebih dahulu digerus (*crushing*) dan diayak (*sieving*) dalam unit crushing seksi 100 hingga diameter butir < 5 mm sehingga luas permukaan butir dan kontak permukaan menjadi lebih besar yang berakibat kecepatan reaksi saat proses pelarutan menjadi lebih cepat. Penggerusan batuan *yellow cake* menggunakan *jaw crusher* dengan cara menggiling *yellow cake* yang masuk ke rahang penggerusnya kemudian dilanjutkan pengayakan menggunakan *vibrosieving* untuk memisahkan serbuk *yellow cake* yang sudah berukuran 5 mm atau yang masih di atas 5 mm [8], [9]. Uranium dalam bentuk *yellow cake*, dilarutkan dalam tangki pelarutan dengan asam nitrat (HNO_3). Proses pelarutan bertujuan untuk mengubah uranium bentuk padat yang terdapat dalam *yellow cake* menjadi uranium bentuk cair sehingga memudahkan proses pemisahan uranium dengan pengotor-pengotornya pada proses pemurnian. Proses pelarutan menggunakan 3 (tiga) parameter proses yaitu konsentrasi asam nitrat, suhu proses pelarutan dan laju pengadukan. Dengan mengacu pada parameter proses yang telah ditetapkan maka diperoleh hasil pelarutan yang cukup baik/optimal [10]. Sejumlah asam nitrat (HNO_3) dimasukkan dalam tangki pelarutan

dan dikondisikan hingga mencapai konsentrasi 7 – 7.5 M. Larutan asam nitrat dalam tangki pelarutan dipanaskan dengan uap panas (*steam*) hingga suhu 60 – 90°C. Unit pelarutan (Seksi 300) dilengkapi dengan *valve automatic* yang mengatur aliran *steam* dan air pendingin secara bergantian. Apabila suhu larutan melewati kondisi batas operasi (KBO) aman > 95°C, maka aliran *steam* akan dihentikan dan digantikan oleh air pendingin dan sebaliknya bila suhu terlalu rendah (<40°C), maka aliran air pendingin dihentikan dan diganti oleh aliran *steam*. Bahan baku *yellow cake* diumpankan secara bertahap ke dalam tangki pelarutan yang berisi HNO_3 panas melalui corong pengumpan yang terpasang pada *glove box* pengumpan *yellow cake* dan diatur secara otomatis pengumpanannya menggunakan *butterfly valve*.

Proses pelarutan *yellow cake* menghasilkan larutan *uranil nitrat* (UN). Larutan UN hasil pelarutan ditampung dalam tangki penampung hasil proses pelarutan. Selanjutnya dilakukan proses pemisahan dengan endapan yang tidak larut menggunakan *centrifuge* sehingga diperoleh larutan *uranil nitrat* bersih dari lumpur yang ditampung dalam tangki penampung hasil pemisahan dan siap untuk umpan proses pemurnian.

2.2 Proses Pemurnian (Seksi 400)

Hasil proses pelarutan *yellow cake* masih memiliki impuritas (sangat kotor) karena banyak unsur-unsur yang terikat atau larut dalam HNO_3 . Apabila impuritas ini tidak diturunkan hingga batas ambang, akan menyebabkan larutan UN hasil proses pelarutan belum dapat digunakan sebagai umpan pada proses pengendapan (*precipitation process*) karena belum memenuhi persyaratan sebagai bahan bakar nuklir [11]. Proses pemurnian dilakukan dengan alat *mixer settler* (pengaduk-pengendap) yang terdiri dari 2 (dua) unit yaitu unit ekstraksi-pencucian dan unit re-ekstraksi. Larutan UN diumpankan ke dalam *mixer settler* dan diekstrak dengan menggunakan pelarut TBP (*tributyl phosphate*)-kerosin dengan tujuan dari untuk memurnikan uranium dengan harapan diperoleh larutan uranium murni (*nuclear grade*) [12].

Ekstrak (fase air) keluaran unit re-ekstraksi merupakan larutan UN yang sudah murni dari pengotor dan ditampung pada tangki penampung hasil proses pemurnian. Sedangkan rafinat (fase organik) merupakan larutan TBP-Kerosin bekas yang ditampung dalam tangki penampung kerosin bekas. TBP-Kerosin bekas dikirim ke seksi 500 untuk dilakukan proses regenerasi menggunakan larutan natrium karbonat (Na_2CO_3) yang hasilnya merupakan TBP segar ditampung dalam tangki

penampung kerosin segar dan siap untuk digunakan kembali dalam ekstraksi berikutnya.

2.3 Proses Pemekatan (Seksi 600)

Larutan UN hasil proses pemurnian yang pengotornya telah memenuhi batas yang ditetapkan (dilakukan analisa pengotor pada larutan UN hasil proses pemurnian) dikirim ke proses pemekatan di seksi 600. Larutan UN harus dipekatkan terlebih dahulu agar kadar U nya cukup tinggi sebelum dilakukan proses pengendapan. Larutan UN hasil proses pemurnian pada umumnya memiliki kadar U yang relatif rendah yaitu antara 40 gU/l hingga 100 gU/l. Konsentrasi U dalam uranil nitrat tersebut masih terlalu rendah untuk dilakukan proses pengendapan amonium diuranat (ADU), sehingga larutan UN harus dilakukan proses pemekatan terlebih dahulu. Proses pemekatan dilakukan dengan memanaskan larutan UN menggunakan uap panas (*steam*) yang dialirkan melalui penukar panas pada tangki evaporator. *Steam* yang diperlukan untuk memanaskan Larutan UN berkisar 120°C - 130°C. Larutan UN dari tangki penampung hasil proses pemurnian dialirkan secara kontinu ke dalam tangki evaporator. Pengumpanan dilakukan dengan menggunakan pompa dosis secara kontinu pada tekanan 1,5 bar [13]. Volume larutan UN dalam tangki evaporator akan berkurang karena adanya penguapan sehingga larutannya akan menjadi pekat dan kadar uraniumnya akan naik. Proses pemekatan berlangsung secara kontinu, hasil pemekatan larutan uranil nitrat dipantau dengan menggunakan sensor densitas untuk memperkirakan kadar uranium dalam larutan UN yang dapat dilihat melalui indikator densitas larutan pada kontrol panel. Nilai densitas larutan UN disetting pada nilai 1.27 kg/l yang setara dengan kadar uranium ± 200 gU/liter. Densitas ini merupakan parameter yang diamati selama proses berlangsung. Apabila nilai densitas larutan sudah mencapai 1.27 kg/l, maka pompa transfer secara otomatis akan hidup dan mengirim larutan UN ke tangki penampungan hasil proses pemekatan [14].

2.4 Proses Pengendapan (Seksi 900)

Larutan UN hasil proses evaporasi dialirkan ke dalam tangki pengendapan yang dipanaskan dengan mengalirkan air panas ke jaket kolom pengendapan hingga suhu $\pm 60^\circ\text{C}$. Selanjutnya larutan amonia dari tangki penampung amonia dengan pompa dialirkan ke tangki pengendapannya dengan kecepatan alir ± 20 liter/jam dan secara otomatis berkurang jika pH larutan mendekati nilai setting. Pengendapan dilakukan pada pH ± 7 dan temperatur 60°C .

Selama operasi, proses penetralan dan pengendapan dilakukan sebagai satu tahap dan kedua alat kontrol pH diatur pada pH=9.

Terdapat beberapa macam pereaksi kimia yang dapat digunakan untuk mengendapkan uranium yaitu amonium karbonat $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$, perhidrol (H_2O_2) , natrium hidroksida (NaOH) dan amonium hidroksida $(\text{NH}_4)_4\text{OH}$ [15], [16]. Namun pada PCP pereaksi yang digunakan adalah amonium hidroksida $(\text{NH}_4)_4\text{OH}$ sesuai dengan reaksi di atas sehingga hasil proses pengendapan adalah ADU. ADU memiliki kelebihan lebih mudah disinter, akan tetapi susah dikompakkan sehingga butuh *pre-treatment* sebelum dikompakkan [17].

Apabila pengendapan ADU sudah selesai, suspensi dipindahkan dari tangki pengendapan ke tangki penampung hasil pengendapan sebelum proses sentrifugasi. Tangki pengendapan dapat diisi dengan larutan yang berasal dari tangki seksi 1000 sebagai unit pengolahan air induk. Apabila analisa menunjukkan konsentrasi U dalam tangki-tangki ini terlalu tinggi, maka larutan didaur ulang ke tangki pengendapan untuk dapat memungut kembali uranium dengan cara pengendapan. Endapan ADU yang terbentuk merupakan suspensi padat-cair (*slurry*). *Slurry* yang terbentuk kemudian dipisahkan padat dan cair dengan alat centrifuge.

2.4 Proses Kalsinasi (Seksi 1100)

Sebelum dilakukan proses kalsinasi, ADU basah hasil dari pengendapan harus dikering dalam alat *spray dryer*. *Spray chamber* dipanaskan hingga mencapai suhu 200°C kemudian ADU basah dialirkan ke dalamnya dan kecepatan putaran atomizer diatur pada kecepatan 25.000 rpm. Selanjutnya ADU dihisap secara pneumatik dan dilewatkan pipa kumpar yang dipanaskan dan ditampung dalam tabung bergeometri aman. Senyawa ADU yang berasal dari *spray dryer* diumpankan ke dalam tungku kalsinasi yang telah dibilas dengan nitrogen, melalui *hopper* dalam *glove box* umpan yang dilengkapi dengan suatu sistem *screw* yang dapat diputar dengan kemiringan 4° dan suhu 760°C . Kecepatan aliran serbuk melalui tabung dapat diatur dengan adanya putaran tungku dan sudut inklinasi/kemiringan tungku.

Hasil kalsinasi berupa oksida U_3O_8 dikeluarkan dan dimasukkan ke dalam penyimpanan berbentuk tabung dalam *glove box*. Gas yang dihasilkan selama kalsinasi adalah NH_3 , N_2 , H_2O , O_2 . Gas buang ini selanjutnya dialirkan ke scrubber dimana air bebas mineral akan menyerap serbuk yang terikat bersama gas. Hasil serapan cairan selanjutnya akan dialirkan ke tangki limbah

sedangkan gas buang dialirkan ke sistem ventilasi aktif.

2.5 Proses Reduksi (Seksi 1100)

Proses reduksi dilakukan di dalam tungku reduksi dimana senyawa uranium oksida U_3O_8 yang berasal dari unit kalsinasi membentuk senyawa UO_2 . Proses dimulai dengan memvakum alat untuk mengosongkan udara di dalam alat dan mengalirkan gas nitrogen ke dalam alat dengan tekanan lebih tinggi dari tekanan udara luar sehingga atmosfer di dalam alat dipenuhi dengan gas nitrogen. Hal ini dilakukan karena nantinya produk serbuk UO_2 sangat mudah terkontaminasi terhadap udara sehingga akan sulit menghasilkan serbuk UO_2 . Kemudian pemanas mulai dinyalakan untuk menaikkan temperatur alat lalu gas LPG dinyalakan. Gas hidrogen dimasukkan pada suhu sekitar $585^\circ C$ dimana *auto-ignition* temperatur dari gas hidrogen sudah terlewati. Gas hidrogen masuk bersama dengan gas nitrogen sampai beberapa menit, kemudian gas nitrogen dimatikan sehingga di dalam alat hanya ada gas hidrogen saja [18]. Gas hidrogen inilah yang nantinya akan bereaksi dengan serbuk U_3O_8 sehingga menjadi produk akhir serbuk UO_2 . Gas hidrogen sisa yang keluar dari alat dibakar oleh api dari gas LPG. Pemanasan terus dilakukan sampai suhunya mencapai suhu $820^\circ C$ dan dijaga konstan selama beberapa jam [19].

Hasil reduksi berupa senyawa UO_2 selanjutnya masuk ke dalam glove box untuk disimpan dalam kaleng sebelum diteruskan ke unit pasivasi. Sementara itu, gas sisa pembakaran yakni gas H_2 dan uap air (H_2O) dialirkan ke scrubber untuk memisahkan serbuk yang terikut dengan gas sisa. Serbuk UO_2 hasil proses reduksi kemudian dipassivasi dengan menggunakan gas nitrogen agar serbuk UO_2 stabil dan tidak teroksidasi kembali menjadi U_3O_8 .

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada proses pelarutan yang telah dilakukan, *yellow cake* dengan kadar uranium $\pm 80\%$ telah dihaluskan pada seksi 100 sebanyak 71,92 kg lalu dilarutkan ke dalam tangki pelarutan menggunakan larutan asam nitrat pekat dengan konsentrasi 14,3 M. Pada proses pelarutan terjadi reaksi pelarutan sebagai berikut:



Reaksi pelarutan akan berlangsung beberapa saat ditandai dengan meningkatnya tekanan negatif dalam tangki yang dapat dipantau pada *pressure reader instrument panel* (IP) dan juga

terbentuknya gas NO_2 sebagai hasil reaksi yang dapat dilihat pada gelas intip kaca. Gas NO_2 yang terjadi selama reaksi berlangsung akan bereaksi dengan oksigen dari udara pengaduk dan diserap dengan air hingga terbentuk asam nitrat dengan persamaan reaksi sebagai berikut:

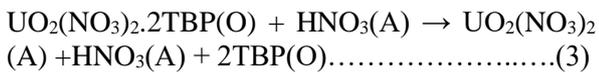


Dari proses pelarutan dihasilkan larutan uranil nitrat (UN) dengan kadar U sebesar 82 gr U/l. Dengan kadar ini larutan UN sudah bisa diumpankan untuk proses pemurnian. Selanjutnya dilakukan pengaturan kecepatan alir untuk umpan larutan UN dan TBP-kerosinnya. Kalau kadar U di bawah 100 grU/l, maka laju alir umpan larutan UN harus lebih besar dari laju alir TBP-kerosin. Dan sebaliknya, apabila kadar U di atas 100 gr U/l maka laju alir TBP-kerosinnya harus lebih besar dari laju alir umpan karena TBP-kerosin mempunyai kemampuan untuk mengikat U antara 100 – 120 gr U/l.

Proses pemurnian dilakukan dengan mengekstraksi uranium dalam larutan uranil nitrat dengan kadar U 82 gr U/L menggunakan pelarut organik tributyl phosphate (TBP) 30% - kerosin 70% volume sehingga terpisah dari pengotornya (impuritas). Pelaksanaan proses pemurnian dilakukan dengan pengaturan:

- a. Kecepatan putar pengaduk = ± 600 rpm
- b. Kecepatan alir umpan fase air (UN) dalam tangki umpan proses pemurnian = 15 L/jam
- c. Kecepatan alir pelarut fase organik TBP-kerosin dalam tangki penampung TBP-kerosin segar = 52 l/jam
- d. Kecepatan alir pencuci ABM dalam tangki ABM = 5 l/jam
- e. Kecepatan alir pengekstrak asam nitrat (HNO_3) 0.05 N dalam tangki asam nitrat encer = 52 l/jam
- f. Kecepatan alir natrium karbonat ($NaCO_3$) dalam tangki natrium karbonat = 15 l/jam

Uranium dalam fase air diekstraksi oleh TBP-kerosin ke dalam fase organik secara selektif sehingga terpisah dengan pengotornya sedangkan unsur-unsur pengotor tetap berada dalam fase air. Kemudian ekstrak hasil proses ekstraksi masih mengandung sejumlah pengotor yang menyertai uranium ke fase organik sehingga perlu dilakukan pencucian dengan ABM (air bebas mineral). Lalu dilakukan proses re-ekstraksi dalam *mixer settler* dengan menggunakan asam nitrat encer. Uranium yang berada dalam fase organik akan diekstrak kembali ke fase air seperti reaksi berikut:

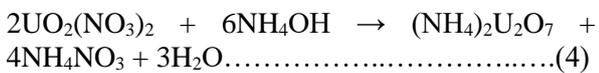


Larutan UN hasil proses pemurnian kemudian dikirim ke evaporator untuk dilakukan proses pemekatan. Pada proses pemekatan tidak terjadi reaksi proses karena pada proses ini hanya terjadi penguapan kadar air dalam larutan UN hasil proses pemurnian sampai kadar airnya habis dan menjadi pekat. Semakin pekat larutan UN maka kadar uraniumnya semakin besar. Kadar larutan UN yang dihasilkan dari proses pemekatan seksi 600 adalah 188 gr U/L (Hasil proses pemekatan yang harus dicapai antara 180 -200 gr U/L). Kadar yang dihasilkan sudah cukup tinggi untuk dilakukan proses pengendapan. Larutan UN ini diumpankan untuk proses pengendapan pada seksi 900 dengan menggunakan amonium hidroksida. Pada proses pengendapan yang telah dilakukan, kecepatan umpan amonium hidroksida yang digunakan adalah 20 L/jam.

Pengendapan pada pH rendah (< 7), akan menghasilkan aglomerat yang lebih besar sehingga lebih cepat mengendap dan lebih mudah untuk disaring tetapi reaksi pengendapannya kurang sempurna, sedangkan bila ADU (amonium diuranat) diendapkan pada pH yang lebih tinggi (>7), maka aglomeratnya lebih halus, waktu pengendapannya lebih lama dan lebih sulit untuk disaring tetapi reaksi pengendapannya akan lebih sempurna [20]. Proses pengendapan dianggap sempurna sewaktu pH mencapai nilai 9.

Faktor yang mempengaruhi kesempurnaan reaksi pada proses pengendapan antara lain reagen yang digunakan, konsumsi reagen yang ditambahkan pada proses pengendapan, suhu, dan waktu pengendapan. Selain itu waktu reaksi dan kecepatan reaksi juga berpengaruh terhadap proses pengendapan [21].

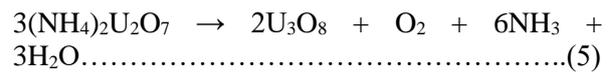
Pengendapan uranium yang terjadi sesuai dengan reaksi berikut:



pH larutan yang tercapai adalah 7,6. Pada pH ini endapan ADU sudah terbentuk walaupun pada filtratnya kemungkinan masih banyak mengandung uranium sehingga pada saat proses selanjutnya yaitu proses sentrifugasi pada centrifuge dilakukan pengecekan kadar uranium di dalam filtratnya. Pengecekan kadar uranium di dalam filtrat yang ditampung dalam tangki penampung berkadar tinggi sehingga harus dikembalikan ke seksi 900 untuk dilakukan proses pengendapan kembali. Proses pengendapan yang dilakukan dianggap sempurna karena pH nya

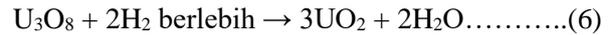
sudah mencapai di atas pH 7 dengan terbentuknya endapan ADU. Endapan ADU kemudian dilanjutkan dengan proses pengeringan dalam *spray dryer* pada suhu 250 – 300°C sehingga diperoleh serbuk ADU yang kering. Proses pengendapan dan pengeringan telah menghasilkan serbuk ADU kering sebanyak 3 kg. Umpan sebanyak 71,92 kg hanya dapat menghasilkan ADU kering sebanyak 3 kg dikarenakan banyak hal, salah satunya adalah penghilangan pengotor pada proses pemurnian serta larutan yang masih tertinggal di tangki proses sebelumnya. Pengotor yang telah dipisahkan dari larutan kemudian dikirim ke seksi 700 untuk dilimbahkan. Kemudian adanya larutan yang masih tertinggal di pipa – pipa selama proses transfer, serta larutan yang keluar dari pipa (keluar dari rangkaian proses) pada saat adanya perbaikan pada sistem proses.

ADU kering kemudian diumpankan ke tungku kalsinasi untuk dilakukan proses pemanasan. Reaksi kalsinasi berlangsung pada suhu 650 ± 50°C sebagai berikut:



Hasilnya adalah serbuk U₃O₈ sebanyak 15.5 kg, sedangkan sisanya sebanyak 7,607 kg masih tertinggal di dalam tanur kalsinasi. Setelah itu serbuk U₃O₈ tersebut diumpankan ke dalam tungku reduksi untuk dilakukan proses reduksi.

Reaksi reduksi yang terjadi berlangsung pada suhu 800 ± 20°C dengan persamaan reaksi sebagai berikut:



Hasilnya adalah serbuk UO₂ berderajat nuklir. Serbuk UO₂ yang sudah berderajat nuklir dilihat dari kandungan pengotor dalam serbuk UO₂ harus di bawah batas maksimal yang disyaratkan dalam Annual book of ASTM Standards 2002 Section Twelve, Vol.12.1 [22]. Spesifikasi Serbuk UO₂ hasil proses reduksi harus memenuhi kriteria berderajat nuklir (nuclear grade) dan derajat keramik (ceramic grade). Derajat nuklir ditentukan oleh tingkat kemurnian serbuk UO₂ terhadap unsur-unsur pengotor/impuritas sedangkan derajat keramik sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat fisik serbuk UO₂.

Impuritas dengan tampang lintang rendah namun dengan konsentrasi tinggi seperti alkali dan alkali tanah dan logam transisi dapat menurunkan efisiensi bahan bakar, sebagai contoh menurunkan densitas bahan bakar. Logam alkali cenderung membentuk oksida yang akan mempengaruhi

rasio oksigen / logam. Logam alkali dan alkali tanah, beberapa logam tanah jarang, Mangan (Mn) dan Kobalt (Co) teraktivasi menghasilkan radionuklida setelah iradiasi di reaktor. Oleh karena itu, Impuritas konsentrasi logam dalam bahan bakar harus di bawah tingkat maksimal yang diizinkan sehingga memenuhi persyaratan *nuclear-grade* [23], [24].

Tabel 1 menunjukkan hasil analisa kandungan pengotor dalam uranium dalam bentuk larutan UN hasil proses pemurnian dan dalam serbuk U₃O₈ hasil proses kalsinasi.

Tabel 1. Kandungan Impuritas dalam Larutan UN dan Serbuk U₃O₈

No	Simbol Kimia	Impuritas max. (ppm)	Kand. Impuritas (ppm)	
			Lar. UN Hasil Proses Pemurnian	Serbuk U ₃ O ₈ Hasil Proses Kalsinasi
1	Al	250	0,447 ± 0,070	147,152 ± 12,899
2	Mg	200	1,188 ± 0,126	10,426 ± 1,028
3	Ca		8,233 ± 0,646	48,788 ± 1,552
4	Mn	250	0,683 ± 0,060	20,857 ± 1,067
5	Mo	250	0,620 ± 0,100	6,003 ± 0,686
6	Co	100	0,122 ± 0,076	<LOD 0,0009
7	Cu	250	0,286 ± 0,032	22,153 ± 2,158
8	Ni	200	1,120 ± 0,928	40,162 ± 3,197
9	C	100	-	0,017 ± 0,0013
10	Pb	250	0,147 ± 0,015	20,314 ± 2,059
11	Zn	250	0,523 ± 0,019	22,097 ± 1,487
12	Si	300	3,233 ± 0,462	<LOD 0,0012
13	Sn	250	< 0,031	<LOD 0,0006
14	Fe	250	0,674 ± 0,040	1.192,071 ± 47,845
15	V	250	< 0,001	<LOD 0,0003
16	N	200		
17	P	250		
18	W	250		105,565 ± 9,682
19	Cl	100		
20	Ch	200		
21	F	100		
22	Ti	250		<LOD 0,0003
23	Ta	250		

Dari data hasil uji impuritas yang telah dilakukan terhadap larutan UN dan serbuk U₃O₈ pada Tabel 1, terlihat bahwa jumlah pengotor yang ada pada UN (hasil proses pemurnian) relatif lebih rendah dari pada jumlah pengotor dalam U₃O₈ (hasil proses kalsinasi). Ini berarti bahwa ada penambahan sejumlah pengotor dalam rangkaian proses mulai dari pemekatan, pengendapan, sentrifugasi maupun kalsinasi. Akan tetapi nilai pengotornya masih di bawah batas maksimal yang diperbolehkan kecuali kadar Fe nya. Kadar Fe yang tinggi dalam serbuk U₃O₈ kemungkinan disebabkan adanya faktor korosi dalam pipa yang

dilewati selama proses pengiriman ke proses berikutnya dan juga dalam tangki penyimpanan. Dikarenakan PCP telah lama dibangun tetapi baru dioperasikan sejak 2014 sehingga kemungkinan faktor korosi di dalam pipa dan tangki pun tinggi. Dengan pengoperasian fasilitas PCP secara rutin diharapkan tingkat korosinya pun berkurang.

Setiap tahapan proses yang dilakukan di PCP harus dilakukan uji kualitas/kontrol kualitas baik terhadap bahan baku, produk antara maupun produk akhir. Uji kualitas dilakukan di laboratorium kendali kualitas dengan mengacu pada persyaratan standar yang telah ditetapkan. Pada Tabel 2 dapat kita lihat hasil uji kendali kualitas tiap proses.

Tabel 2. Hasil Uji Kendali Kualitas tiap Proses

Proses	Pengujian Kualitas		Jumlah Bahan yang didapat (Kg)
	Kadar U (gr U/L)	Impuritas (ppm)	
Penggerusan & Pengayakan	80% U dalam YC	-	71,92
Pelarutan	82	-	-
Pemurnian	70	Tabel 1	-
Pemekatan	188	-	-
Pengendapan	-	-	3
Kalsinasi	-	Tabel 1	15,5

Dari Tabel 2 di atas dapat disimpulkan bahwa kualitas produk akhir pada proses di PCP ini adalah banyaknya pengotor (impuritas) pada produk. Pengotor harus berada di bawah batas maksimal yang disyaratkan dan hasil yang didapatkan pada proses di PCP ini telah memenuhi kriteria tersebut.

4. KESIMPULAN

Dari hasil yang didapatkan, membuktikan bahwa untuk pengolahan *yellow cake* menjadi bahan bakar untuk PLTN sudah bisa dilakukan oleh fasilitas pemurnian dan konversi uranium. Kedepannya dengan lebih banyak penelitian parameter, diharapkan lebih bisa menyempurnakan produk yang dihasilkan. Hal ini tentunya akan sangat penting dalam penyiapan kemandirian bangsa terhadap pengadaan energi dengan mengandalkan bahan bakar dari PLTN bisa diproduksi oleh Indonesia sendiri. Dengan adanya cadangan uranium yang cukup dan para ahli teknologi pengolahan bahan bakarnya, seharusnya kita sudah siap untuk membuat bahan bakar nuklir untuk PLTN sendiri demi menunjang kebutuhan energi di negara kita.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada ibu Ir. RR. Ratih Langenati, M.T selaku Koordinator kelompok riset teknologi bahan bakar nuklir yang sudah memberikan dukungan dan arahan untuk kegiatan ini. Terima kasih kepada semua rekan-rekan IEBE yang telah membantu kelancaran kegiatan ini

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Torowati, "Penentuan Efisiensi Ekstraksi Uranium pada Proses Ekstraksi Uranium dalam Yellow Cake Menggunakan TBP-Kerosin," *Maj. Ilm. PIN*, vol. II, no. 4, pp. 1–11, 2009.
- [2] H. Tulsidas, "Nuclear Fuel Cycle Simulation System: Improvements and Applications (IAEA TECDOC SERIES)," 2019. doi: 10.13140/RG.2.2.16166.78407.
- [3] A. Muchsin, "Pelatihan Penyegaran Operator dan Supervisor 2018." PUSDIKLAT BATAN, Serpong, 2018.
- [4] BATAN, "Perka BATAN No. 6 Tahun 2020 Tentang Renstra BATAN 2020-2024," 2020.
- [5] Peraturan Presiden, "Peraturan Presiden Nomor 98 Tahun 2021 Tentang Penyelenggaraan Nilai Ekonomi Karbon untuk Pencapaian Target Kontribusi yang ditetapkan Secara Nasional dan Pengendalian Emisi Gas Rumah Kaca dalam Pembangunan Nasional," 2021.
- [6] Ngadenin, H. Syaeful, and K. Setiawan Widana, *50 Tahun Eksplorasi Uranium di Indonesia*. Penerbit BRIN, 2022.
- [7] I. Bastori and M. D. Birmano, "Analisis Ketersediaan Uranium di Indonesia untuk Kebutuhan PLTN Tipe PWR 1000 MWe," *J. Pengemb. Energi Nukl.*, vol. 19, no. 2, pp. 95–102, 2018.
- [8] Triarjo, S. Rianto, and E. Muljono, "Pengaturan Tekanan Glove Box-101 Sebagai Persyaratan Crushing and Sieving pada Proses Konversi Yellow Cake Menjadi Serbuk UO₂," *Maj. Ilm. PIN*, vol. X, no. 18, pp. 41–48, 2017.
- [9] Triarjo, P. Oktavianto, and E. Muljono, "Analisa Proses Pengoperasian Alat Penghancuran dan Pengayakan Yellow Cake pada Seksi 100 di Instalasi Pemurnian dan Konversi (PCP)," *Maj. Ilm. PIN*, vol. XI, no. 20, pp. 51–60, 2018.
- [10] Triarjo, S. Rianto, A. Muchsin, and E. Muljono, "Analisis Kerusakan Centrifuge (XD-301) Pada Proses Pemisahan Uranyl Nitrat Seksi 300 Instalasi PCP," *Maj. Ilm. PIN*, vol. IX, no. 16, pp. 13–20, 2016.
- [11] M. Anwar and G. Widodo, "Proses Ekstraksi-Stripping UO₂ (NO₃)₂ Berimpuritas Hasil Pelarutan dari Yellow Cake," *Urania*, vol. 23, no. 1, pp. 23–32, 2017.
- [12] Torowati, Pranjono, Rahmiati, and L. Windaryati, "Proses Re-Ekstraksi Uranium Hasil Ekstraksi Yellow Cake Menggunakan Air Hangat," *Maj. Ilm. PIN*, vol. III, no. 06, pp. 1–8, 2010.
- [13] Sunardi, "Penyiapan Larutan Uranyl Nitrat untuk Proses Konversi Kimia Melalui Evaporasi," *Maj. Ilm. PIN*, vol. III, no. 05, pp. 14–22, 2010.
- [14] P. Oktavianto, A. Ariyanita, and A. Saputra, "Kontrol Parameter Pada Proses Pemekatan Seksi-600 Di Instalasi Pemurnian dan Konversi (PCP)," *Maj. Ilm. PIN*, vol. XI, no. 20, pp. 61–70, 2018.
- [15] Torowati and N. Yudhi, "Pemungutan Uranium Dalam Limbah Uranium Cair Menggunakan Amonium Karbonat," *Maj. Ilm. PIN*, vol. II, no. 04, pp. 12–16, 2009.
- [16] Torowati, "Pengaruh Kandungan Uranium dalam Umpan Terhadap Efisiensi Pengendapan Uranium," *Maj. Ilm. PIN*, vol. III, no. 06, pp. 9–15, 2010.
- [17] G. K. Suryaman, Torowati, Rahmiati, and R. Langenati, "Komparasi Sifat Kimia dan Fisik Serbuk UO₂ Hasil Konversi Yellow Cake Limbah Pupuk Fosfat dan Yellow Cake Komersial Melalui Jalur ADU Ganisa K. Suryaman, Torowati, Rahmiati, Ratih Langenati," *J. Teknol. Bahan Nukl.*, vol. 9, no. 2, pp. 77–83, 2013.
- [18] Triarjo and S. Rianto, "Analisis Keselamatan Sistem Kendali Tungku Muffle Furnace ME-11 pada Proses Reduksi Gagal Pelet UO₂," *Maj. Ilm. PIN*, vol. XII, no. 23, pp. 51–60, 2020.
- [19] P. Oktavianto, A. Saputra, N. Rahmita, I. Abdurrosyid, Triarjo, and S. Rianto, "Comparison of UO₂ powder products from reduction process using rotary kiln H-1102 and muffle furnace ME-11 at pilot conversion plant (PCP) facility □," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2967, 2024.
- [20] J. Setiawan *et al.*, "Karakterisasi Morfologi dan Struktur Kristal Serbuk UO₂ dari Yellow Cake dengan Variasi Temperatur Pengendapan ADU," *Urania*, vol. 17, no. 1, pp. 9–17, 2011.
- [21] M. Anggraini, B. Saroni, S. Waluyo, Rusydi, and Sujono, "Pengendapan Uranium dan Thorium Hasil Pelarutan Slag II Uranium," *Eksplorium*, vol. 36, no.

- 2, pp. 125–132, 2015.
- [22] ASTM C-753, “Standard Specification for Nuclear-Grade, Sinterable Uranium Dioxide Powder (C753-99),” 1999.
- [23] A. L. De Souza, M. Elena, B. Cotrim, M. Aparecida, and F. Pires, “An overview of spectrometric techniques and sample preparation for the determination of impurities in uranium nuclear fuel grade,” *Microchem. J.*, vol. 106, pp. 194–201, 2013, doi: 10.1016/j.microc.2012.06.015.
- [24] D. Mustika, Asminar, Rahmiati, and Torowati, “Penentuan Recovery dan Limit Deteksi Unsur Menggunakan Spektrofotometer Serapan Atom,” *Maj. Ilm. PIN*, vol. IX, no. 17, pp. 12–21, 2016.