

Pengendapan Uranium pada Monasit Bangka sebagai *Ammonium Diuranate* (ADU) Menggunakan Gas NH_3

Uranium Precipitation in Bangka Monazite as Ammonium Diuranate (ADU) Using NH_3 Gas

Riesna Prassanti^{1*}, Ahmad Miftah Fauzan², Aditya Widian Putra¹, Afiq Azfar Pratama¹,
Erlan Dewita¹, Rachmat Fauzi Hidayat¹, Budi Yuli Ani¹, Yoga Permana¹

¹Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir – BATAN

Jl. Lebak Bulus Raya No. 9, Pasar Jumat, Jakarta, Indonesia, 12440

²Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknologi Industri – Universitas Jayabaya

Jl. Raya Jakarta Bogor Km. 28 Jakarta, Indonesia, 13710

*E-mail: riesna@batan.go.id

Naskah diterima: 8 Mei 2020, direvisi: 20 Mei 2020, disetujui: 21 Mei 2020

DOI: 10.17146/eksplorium.2020.41.1.5879

ABSTRAK

Monasit, sebagai produk ikutan penambangan timah, mengandung unsur-unsur logam tanah jarang (LTJ) serta unsur radioaktif seperti uranium (U) dan torium (Th). Penelitian dan pengembangan pengolahan monasit di Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir - Badan Tenaga Nuklir Nasional (PTBGN-BATAN) telah berhasil memisahkan LTJ sebagai senyawa hidroksida dengan *recovery* 85%. Unsur radioaktif U dan Th masing-masing diperoleh sebagai produk dalam bentuk konsentrat senyawa *ammonium diuranate* (ADU)/ $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ dan torium hidroksida ($\text{Th}(\text{OH})_4$). Pada penelitian sebelumnya, pemisahan U sebagai ADU pada monasit dilakukan dengan proses pengendapan menggunakan larutan NH_4OH . Pada penelitian ini, U ini akan diendapkan sebagai ADU menggunakan reagen gas NH_3 dengan tujuan memperoleh kondisi optimum pengendapan. Umpan pengendapan berupa larutan (U, Th, LTJ) sulfat diperoleh dari proses pengolahan monasit secara basa yaitu dekomposisi menggunakan NaOH , pelarutan parsial menggunakan HCl , dan pelarutan total menggunakan H_2SO_4 . Parameter yang diteliti meliputi pengaruh laju alir gas NH_3 , temperatur proses, dan waktu kontak terhadap *recovery* U. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada kondisi statis pH-7, kondisi optimum pengendapan U menggunakan gas NH_3 adalah pada laju alir gas NH_3 150 ml/menit, temperatur proses 30°C, dan waktu kontak 15 menit dengan *recovery* pengendapan U 100%, Th 99,97%, dan LTJ 99,93%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa unsur U sudah terambil seluruhnya akan tetapi masih bercampur dengan unsur lain yaitu Th dan LTJ, sehingga diperlukan penelitian berikutnya untuk memperoleh U dengan kemurnian yang tinggi pada kondisi pH optimum.

Kata kunci: monasit, pengendapan, *ammonium diuranate*, gas NH_3

ABSTRACT

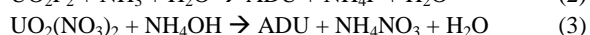
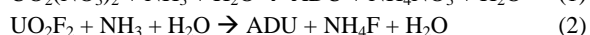
Monazite, as a by-product of tin mining, contains rare earth elements (REE) and radioactive elements like uranium (U) and thorium (Th). The monazite processing Research and Development at the Center for Nuclear Mineral Technology-National Nuclear Energy Agency (PTBGN-BATAN) has succeeded in separating REE as a hydroxide compound with an 85% recovery. The radioactive elements U and Th are each obtained as a product in the form of concentrated compounds of ammonium diuranate (ADU)/ $(\text{NH}_4)_2\text{U}_2\text{O}_7$ and thorium hydroxide ($\text{Th}(\text{OH})_4$). In previous studies, the separation of U as ADU in monazite was carried out by the precipitation process using NH_4OH solution. In this research, U will be precipitated as an ADU using NH_3 gas reagents to obtain precipitation optimum conditions. Precipitation feed in the form of (U, Th, REE) sulfate solution derived from the monazite processing using the alkali or base method, which includes decomposition using NaOH , partial dissolution using HCl , and total dissolution using H_2SO_4 . The parameters studied include the effect of NH_3 gas flow rate, process temperature, and contact time on U recovery. The results showed that on the static pH-7 condition, the optimum state of U precipitation using NH_3 gas is at NH_3 gas flow rate of 150 ml/minutes,

processing temperature of 30°C, and 15 minutes contact time with precipitation recovery of U 100%, Th 99.97%, and REE 99.93%. These results indicate that U has been taken entirely but still mixed with other elements, which are Th and REE, so that further research is needed to obtain U with high purity on optimum pH condition.

Keywords: *monazite, precipitation, ammonium diuranate, NH₃ gas*

PENDAHULUAN

Ammonium diuranate (ADU) merupakan senyawa antara yang penting untuk produksi bahan bakar nuklir [1]. Proses produksi dan sifat UO₂ sebagai bahan bakar reaktor daya maupun logam uranium sebagai bahan bakar reaktor riset, sebagian besar tergantung pada karakteristik ADU [2]. Secara umum, ADU diperoleh melalui rute *uranyl nitrate (UN)* dan *uranyl fluoride (UF)* yang direaksikan dengan larutan NH₄OH atau gas NH₃ [2]. Reaksi yang terjadi pada pembentukan ADU adalah sebagai berikut [2]:

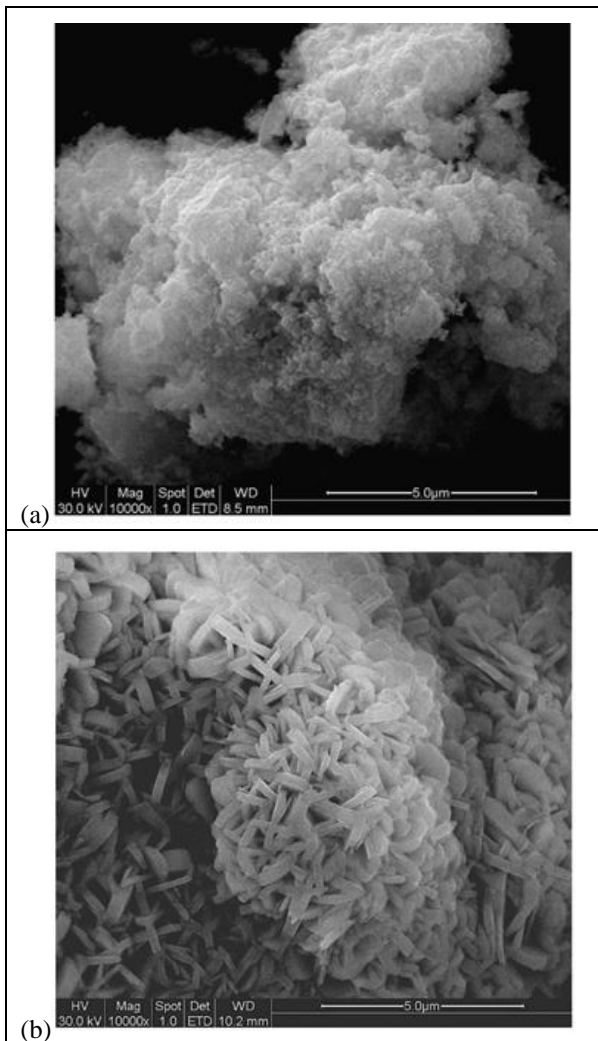


Pada reaksi (1) dan (2), UF dan UN direaksikan dengan gas NH₃, sedangkan pada reaksi (3) dan (4), UF dan UN direaksikan dengan larutan NH₄OH. ADU yang dihasilkan selanjutnya dikalsinasi pada suhu 700°C sehingga membentuk uranium oksida berupa campuran UO₃ dan U₃O₈. Proses berikutnya campuran UO₃ dan U₃O₈ direduksi dengan gas H₂ pada suhu 700 °C sehingga membentuk UO₂ sebagai bahan bakar reaktor nuklir [3–6].

Pada penelitian sebelumnya, kondisi pengendapan ADU berpengaruh secara langsung pada sifat UO₂, namun variabel temperatur belum dimasukkan [7]. Temperatur tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada proses pengendapan ADU. Penggunaan reagen berbeda akan berpengaruh pada karakteristik ADU yang dihasilkan, selanjutnya akan mempengaruhi sifat UO₂ sebagai bahan bakar [8].

Morfologi dan pertumbuhan partikel ADU dipengaruhi oleh tahap pengendapan yang berbeda, penggunaan gas NH₃ dan larutan NH₄OH, serta keberadaan pengotor (*seeding material*) pada morfologi ADU [1]. Struktur mikro partikel ADU hasil reaksi menggunakan larutan NH₄OH terlihat menyatu sehingga porositasnya lebih rendah (Gambar 1.a) dibandingkan dengan ADU yang diperoleh dengan gas NH₃ [1] (Gambar 1.b). Struktur mikro berupa platelet yang saling terhubung membentuk aglomerat sehingga porositasnya lebih besar [1] (Gambar 1.b). Ini adalah salah satu karakteristik baik yang diperlukan pada tahap produksi UO₂ dari ADU. Dari uraian di atas tampak bahwa penggunaan jenis reagen pada tahap awal proses produksi ADU cukup berpengaruh pada produk akhir UO₂ yang dihasilkan.

Keterdapat uranium sendiri bisa diperoleh dari sumber daya *conventional* dan *unconventional*. Sumber daya *conventional* adalah sumber daya uranium yang diperoleh sebagai produk utama, produk bersama (*co-product*), atau produk samping penting, yaitu pada mineral-mineral seperti *uraninite*, *coffinite*, *brannerite*, *betafite*, *davidite*, *uranothorite*, dan *uranothorianite* [4, 9–12]. Sedangkan sumber daya *unconventional* adalah sumber daya ketika uranium hanya dapat diperoleh sebagai produk-produk samping minor seperti pada deposit batuan fosfat, logam tanah jarang (LTJ), *black shales*, air laut, tailing emas, dan abu terbang (*fly ash*) batu bara [9].



Gambar 1. (a) Foto SEM ADU dengan perbesaran 10000 kali menggunakan reagen larutan NH_4OH ; (b) menggunakan reagen gas NH_3 [1].

Pada penelitian ini, uranium akan dipisahkan sebagai ADU dengan material asal uranium dari sumber daya *unconventional*, yaitu deposit LTJ. Khususnya deposit LTJ yang diolah adalah mineral monasit. Monasit merupakan salah satu mineral utama sumber LTJ selain bastnasit dan xenotim. Meskipun mineral sumber LTJ jumlahnya sangat banyak, sekitar 95% dari semua sumber daya LTJ di dunia terdapat pada tiga mineral, yaitu bastnasit, monasit, dan xenotim [13, 14].

Keberadaan monasit sangat melimpah di Indonesia. Daerah potensial dengan kandungan monasit tinggi antara lain Kepulauan Bangka Belitung yang merupakan

jalur timah, serta Kalimantan Barat meliputi Karimata, Ketapang, Rirang, dan Tanah Merah [15, 16]. Monasit di Kepulauan Bangka Belitung diperoleh sebagai mineral ikutan pada penambangan timah. Komposisi utama monasit Bangka adalah LTJ, U, Th, dan fosfat (PO_4) dengan kadar berturut-turut 50–67%, 1500–3000 ppm, 2,5–3,6%, dan 18–30% [17].

Adanya unsur radioaktif U dan Th dalam monasit menjadikan Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), khususnya Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir (PTBGN) sebagai lembaga yang berwenang dalam pengolahan monasit [17]. Kerjasama antara PT. Timah, Tbk., sebagai produsen timah terbesar di Indonesia dengan PTBGN-BATAN dalam pengolahan monasit telah dirintis sejak tahun 1990-an dan masih berlanjut hingga saat ini melalui berbagai kegiatan penelitian dan pengembangan yang berkesinambungan [17]. Penelitian dan pengembangan di PTBGN-BATAN menggunakan monasit yang disediakan oleh PT. Timah, Tbk., telah menghasilkan teknologi untuk memperoleh produk LTJ hidroksida bebas radioaktif dengan *recovery* 85% [18]. Kegiatan pemisahan unsur radioaktif U dan Th dari monasit masih terus dilakukan hingga sekarang, salah satunya adalah penelitian ini.

Konsentrat U dan Th yang diperoleh dari proses pengolahan monasit masih berada pada fase cair sebagai larutan (U, Th) sulfat. Oleh karena itu, untuk memperoleh produk ADU, larutan (U, Th) sulfat tersebut harus diendapkan. Selama ini, reagen pengendapan yang digunakan adalah larutan NH_4OH . Berdasarkan referensi di atas, jenis reagen yang digunakan pada tahap awal proses produksi ADU cukup berpengaruh pada produk akhir UO_2 yang dihasilkan serta produk ADU dengan reagen pengendap gas

NH₃ memiliki karakteristik lebih baik untuk produksi UO₂ ke depannya [1]. Oleh karena itu, pada penelitian ini akan dilakukan pengendapan U sebagai ADU menggunakan gas NH₃. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh kondisi optimum pengendapan U menggunakan gas NH₃ dengan parameter penelitian meliputi variasi laju alir gas NH₃, temperatur proses, dan waktu kontak.

METODOLOGI

Alat dan Bahan

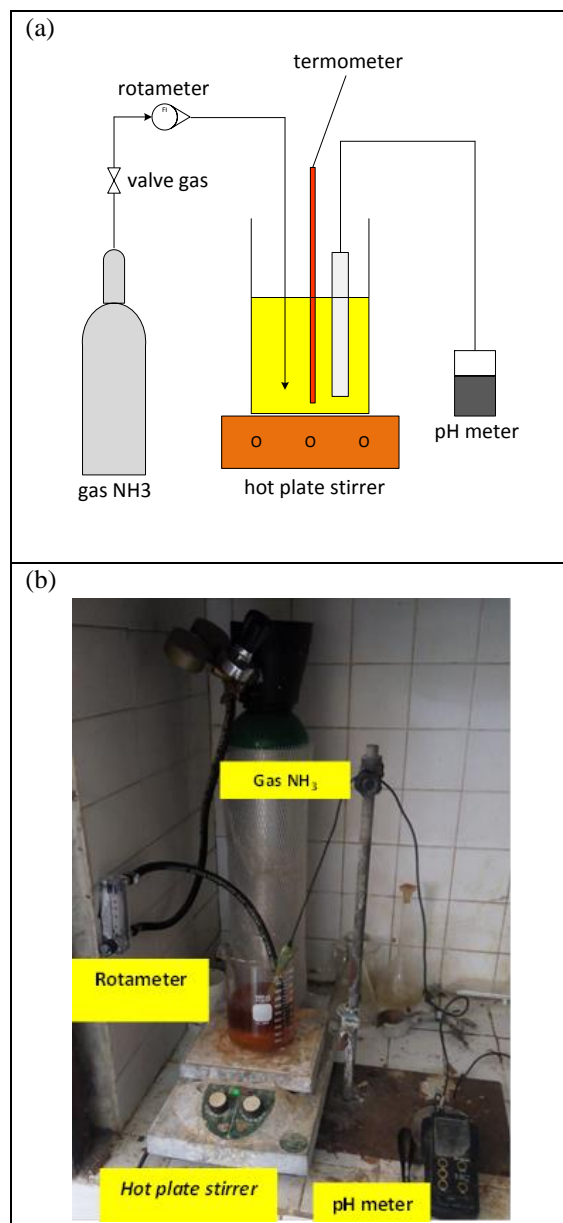
Bahan yang digunakan pada penelitian ini antara lain monasit Bangka, soda kaustik (NaOH), asam klorida (HCl), larutan NH₄OH, asam sulfat (H₂SO₄) dan gas NH₃. Sedangkan alat yang digunakan adalah gelas beaker, gelas ukur, *hot plate stirrer*, rotameter, pH meter, termometer, kertas saring, neraca, vakum filter, dan oven. Untuk analisis kadar U, Th, dan PO₄ digunakan spektrofotometer *ultraviolet-visible* (UV-Vis) sedangkan kadar LTJ dianalisis menggunakan metode *inductively coupled plasma-optical emission spectrometry* (ICP-OES).

Metode

Penelitian pengendapan U dengan gas NH₃ dilakukan melalui 2 (dua) tahap kegiatan, yaitu pembuatan larutan umpan pengendapan dan uji coba pengendapan. Pembuatan umpan larutan (U, Th) sulfat dilakukan melalui proses dekomposisi monasit menggunakan NaOH dan pelarutan parsial dengan HCl. Residu pelarutan parsial dilarutkan menggunakan HCl kemudian filtratnya diendapkan dengan NH₄OH, selanjutnya endapan dilarutkan dengan H₂SO₄ pada pH-1 sehingga diperoleh larutan (U, Th) sulfat [19].

Parameter yang diteliti pada penelitian pengendapan U dengan gas NH₃ adalah laju

alir gas NH₃, temperatur proses, dan waktu kontak. Rangkaian alat percobaan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian alat proses pengendapan U dengan gas NH₃; (a) skema, (b) peralatan percobaan.

Pengambilan data parameter laju alir gas NH₃ dilakukan dengan cara mengaduk larutan (U, Th) sulfat sejumlah 500 ml dengan *hot plate stirrer* kecepatan 300 rpm, pada suhu kamar (30°C), kemudian ditambahkan gas NH₃ dengan variasi laju alir (50, 80, 100, 150, 200) ml/menit hingga pH mencapai 7.

Selanjutnya, kondisi pH-7 tetap dijaga selama 15 menit dengan tetap dilakukan pengadukan. Setelah 15 menit, dilakukan filtrasi untuk memisahkan fase padat dan cair hasil proses. Berikutnya, dilakukan pengambilan sampel padatan dan cairan hasil proses untuk dianalisis kadar U, Th, dan LTJ dengan alat Spektrofotometer UV-Vis dan ICP-OES.

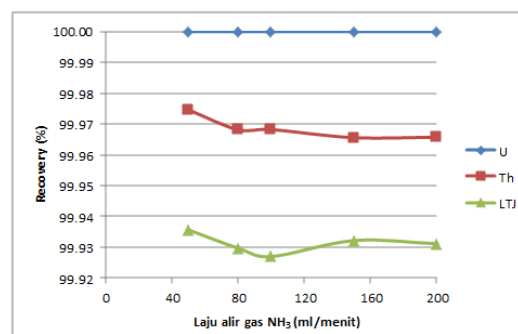
Pengambilan data parameter temperatur proses dilakukan dengan cara mengaduk larutan (U, Th) sulfat sebanyak 500 ml menggunakan *hot plate stirrer* dengan kecepatan 300 rpm, pada kondisi temperatur proses bervariasi (30, 40, 50, 60, 70, 80)°C, kemudian ditambahkan gas NH₃ dengan laju alir optimum yang diperoleh dari langkah sebelumnya (parameter laju alir gas NH₃) hingga pH mencapai 7. Selanjutnya, kondisi pH-7 tetap dijaga selama 15 menit dengan tetap dilakukan pengadukan. Setelah 15 menit, dilakukan filtrasi untuk memisahkan fase padat dan cair hasil proses. Berikutnya, dilakukan pengambilan sampel padatan dan cairan hasil proses untuk dianalisis kadar U, Th, dan LTJ dengan alat Spektrofotometer UV-Vis dan ICP-OES.

Pengambilan data parameter waktu kontak dilakukan dengan cara mengaduk larutan (U, Th) sulfat sebanyak 500 ml dengan *hot plate stirrer* kecepatan 300 rpm, pada kondisi temperatur optimum proses yang diperoleh dari langkah sebelumnya (parameter temperatur proses), kemudian ditambahkan gas NH₃ dengan laju alir optimum dari perolehan sebelumnya hingga pH mencapai 7. Selanjutnya, kondisi pH-7 tetap dijaga selama waktu yang bervariasi yaitu (15, 30, 45, 60, 90) menit dengan tetap melakukan pengadukan. Setelah masing-masing variasi waktu tersebut, dilakukan filtrasi untuk memisahkan fase padat dan cair hasil proses. Berikutnya pengambilan sampel padatan dan cairan hasil proses dilakukan

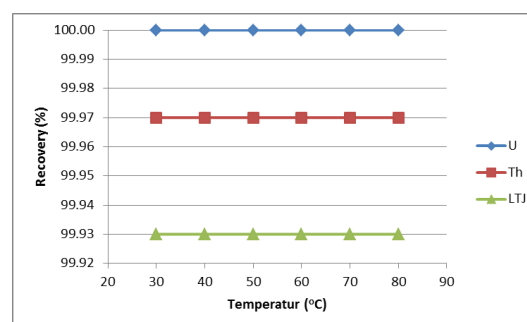
untuk analisis kadar U, Th, dan LTJ menggunakan alat Spektrofotometer UV-Vis dan ICP-OES.

HASIL DAN PEMBAHASAN

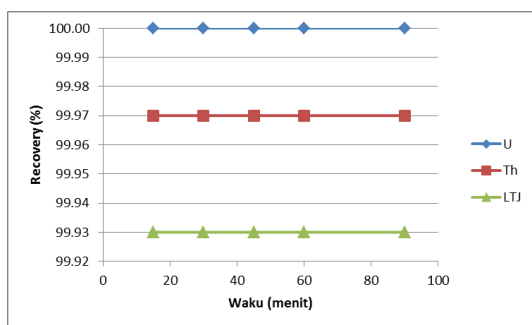
Data hasil perhitungan untuk *recovery* pengendapan U parameter laju alir gas NH₃, temperatur proses, dan waktu kontak disajikan pada Gambar 3–5. Fenomena *recovery* pengendapan U dengan parameter laju alir gas NH₃, temperatur proses, dan waktu kontak mempunyai kecenderungan sama, bahwa ketiga unsur yang diamati yaitu U, Th, dan LTJ mengendap dengan *recovery* di atas 90%, bahkan U mengendap 100% pada pH-7. Merujuk pada penelitian sebelumnya bahwa pengendapan ADU paling optimum terjadi pada pH-7 [1, 2, 20], maka pada penelitian ini tidak dilakukan variasi parameter pH sehingga pH-7 diambil sebagai pH akhir proses pengendapan.



Gambar 3. *Recovery* pengendapan U parameter laju alir gas NH₃.



Gambar 4. *Recovery* pengendapan U parameter temperatur proses



Gambar 5. *Recovery* pengendapan U parameter waktu kontak.

Gambar 3 memperlihatkan variasi laju alir gas NH₃ tidak terlalu signifikan berpengaruh terhadap *recovery* pengendapan U. Besarnya laju alir berhubungan dengan lamanya waktu yang dibutuhkan untuk mencapai pH diinginkan. Peningkatan laju alir gas NH₃ berbanding terbalik dengan waktu yang diperlukan untuk mencapai pH-7. Laju alir yang besar menyebabkan waktu untuk mencapai pH-7 menjadi lebih singkat (Tabel 1). Semakin besar laju alir gas NH₃, maka ion-ion (NH₄)⁺ akan semakin cepat berikatan dengan ion-ion (UO₂)²⁻ pada umpan larutan (U, Th) sulfat sehingga proses pengendapan terjadi lebih cepat. Hal ini sejalan dengan hasil penelitian pada pengendapan U menggunakan *disodium oxalate* (Na₂C₂O₄) [21].

Tabel 1. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai pH-7 pada variasi laju alir gas NH₃.

Laju alir gas NH ₃ (ml/menit)	Waktu (menit)
50	100
80	65
100	45
150	30
200	15

Sementara itu, hasil *recovery* pengendapan baik untuk U, Th, dan LTJ, angka yang dihasilkan cenderung sama yaitu telah mencapai kondisi setimbang. Hal ini

diduga karena reaksi telah mencapai kondisi setimbang pada pH di bawah 7. Seperti pada penelitian sebelumnya, proses pengendapan pada reaksi pengendapan ADU dari larutan *uranyl nitrate* menggunakan gas NH₃ dimulai pada pH-3,5.

Kondisi pH-3,5 ini tetap bertahan beberapa waktu meskipun gas NH₃ terus ditambahkan hingga *recovery* U mencapai 95% [1]. Penambahan gas NH₃ yang tetap dilanjutkan hingga pH-7 bertujuan untuk menyempurnakan proses pengendapan hingga diperoleh *recovery* U 100% [1]. Data hasil percobaan menunjukkan bahwa laju alir gas NH₃ optimum diambil pada kecepatan 150 ml/menit, karena dengan proses yang cepat penggunaan energi akan lebih efisien dan lebih hemat secara ekonomi. Meskipun dengan laju alir gas NH₃ 200 ml/menit waktunya menjadi lebih singkat, namun kondisi ini tidak dipilih karena pada laju alir 200 ml/menit menghasilkan padatan yang mempunyai konsistensi berbeda dari padatan dengan laju alir lebih rendah. Pada laju alir yang tinggi viskositas larutan menjadi lebih tinggi sehingga susah diaduk. Hal ini diduga karena laju alir reagen terlalu besar sehingga proses pengendapan menjadi sangat cepat dan menyebabkan kecepatan putar *stirrer* tidak sebanding dengan banyaknya endapan yang terbentuk.

Parameter temperatur proses pada Gambar 4 memperlihatkan bahwa variasi temperatur tidak berpengaruh terhadap *recovery* pengendapan U. Menggunakan temperatur kamar (30°C) *recovery* U, Th, dan LTJ masing-masing sudah mencapai 100%, 99,97%, dan 99,93%. Temperatur proses terbukti tidak berpengaruh terhadap *recovery* pengendapan, seperti terjadi pada pengendapan ADU dari larutan *uranyl nitrate* menggunakan larutan NH₄OH [8].

Temperatur proses tidak berpengaruh terhadap *recovery* ADU tetapi berpengaruh pada aglomerasi endapan ADU yang terbentuk. Aglomerasi ADU terjadi pada temperatur yang lebih tinggi dengan laju pengendapan rendah. Adanya aglomerasi akan memudahkan proses sintering pada produksi UO_2 dari ADU [8]. Data hasil percobaan menunjukkan bahwa temperatur optimum pengendapan U dengan gas NH_3 diperoleh pada suhu $30^\circ C$ dengan pertimbangan efisiensi energi dan ekonomi.

Selanjutnya untuk parameter waktu kontak, Gambar 5 memperlihatkan bahwa lamanya waktu kontak tidak berpengaruh pada *recovery* pengendapan U. Maksud waktu kontak pada penelitian ini adalah lamanya waktu yang dihitung setelah pH pengendapan mencapai 7 dan proses tetap dilanjutkan dengan pengadukan tanpa penambahan gas NH_3 . Tujuan dilanjutkannya proses pengadukan selama beberapa saat setelah kondisi akhir pH-7 tercapai adalah untuk mencapai kesempurnaan reaksi. Hasil percobaan ini menunjukkan bahwa hal tersebut tidak berpengaruh terhadap *recovery* U, karena diduga reaksi telah sempurna dan mencapai kesetimbangan sebelum mencapai pH-7 seperti yang sudah diuraikan pada pembahasan parameter laju alir gas NH_3 di atas. Berdasarkan data hasil percobaan, waktu kontak optimum didapatkan pada 15 menit dengan *recovery* pengendapan U, Th, dan LTJ berturut-turut 100%, 99,97%, dan 99,93%.

Selain *recovery* U, pada penelitian ini diamati juga unsur lain yang ada pada umpan pengendapan yaitu Th dan LTJ. Berdasarkan ketiga parameter penelitian yang dilakukan, diperoleh *recovery* Th dan LTJ di atas 99%. Hal ini karena Th sudah mulai mengendap pada pH-1 seperti terjadi dalam penelitian pengendapan Th dari monasit menggunakan

larutan NH_4OH [17], bahwa pada pH-1,2 *recovery* pengendapan Th sudah mencapai 84,74% sehingga pada pH-7 Th yang mengendap sudah mendekati 100%. Sementara itu, LTJ sendiri sudah mulai mengendap pada pH-4 seperti dalam penelitian pengendapan LTJ dari bijih thorit Mamuju dengan larutan NH_4OH [22] serta pengendapan LTJ dari monasit dengan larutan NaOH [23], bahwa pada pH-9,8 LTJ mengendap dengan *recovery* 99,79%. Hal ini tidak menutup kemungkinan bahwa pada pH-7 LTJ sudah mengendap dengan *recovery* di atas 99%.

KESIMPULAN

Kondisi optimum pengendapan U dengan gas NH_3 didapat pada kondisi laju alir gas NH_3 150 ml/menit, temperatur $30^\circ C$, dan waktu kontak 15 menit, dengan *recovery* pengendapan U 100%, Th 99,97%, dan LTJ 99,93%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa unsur U sudah terambil seluruhnya, namun masih bercampur dengan unsur lain yaitu Th dan LTJ. Karena penelitian dilakukan pada kondisi pH tetap (pH-7) maka dinamika proses tidak tampak pada data yang diperoleh. Oleh karena itu, perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan memasukkan variasi pH sebagai salah satu parameter penelitian untuk mengetahui kondisi pH optimum pada saat *recovery* U mencapai 100%.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada rekan-rekan di PTBGN-BATAN, khususnya di Bidang TPP karena telah membantu kelancaran pelaksanaan penelitian sampai terwujudnya makalah ini. Terima kasih kepada PT. Timah, Tbk., karena telah menyediakan monasit sebagai bahan baku untuk penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Manna, S. B. Roy, dan J. B. Joshi, "Study of Crystallization and Morphology of Ammonium Diuranate and Uranium Oxide," *Nuclear Materials*, 424, pp. 94–100, 2012.
- [2] S. Manna, R. Kumar, dan S. K. Satpati, "Study of the Changes in Composition of Ammonium Diuranate with Progress of Precipitation, and Study of the Properties of Ammonium Diuranate and its Subsequent Products Produced from both Uranyl Nitrate and Uranyl Fluoride Solutions," *Nuclear Engineering and Technology*, 49, pp. 541–548, 2017
- [3] M. Joyce, "Nuclear Engineering: A Conceptual Introduction to Nuclear Power," Elsevier and Butterworth-Heinemann, pp. 297–305, 2018.
- [4] S. H. Farjana, N. Huda, M. A. P. Mahmud, dan C. Lang, "Comparative Life-cycle Assessment of Uranium Extraction Processes," *Cleaner Production*, vol. 202, pp. 666–683, 2018.
- [5] J. B. S. Neto, E. F. U. de Carvalho, R. H. L. Garcia, A. M. Saliba-silva, H. G. Riella, dan M. Durazzo, "Production of Uranium Tetrafluoride from The Effluent Generated in The Reconversion Via Ammonium Uranyl Carbonate," *Nuclear Engineering and Technology*, vol. 49, pp. 1711–1716, 2017.
- [6] M. H. Sadeghi, M. Outokesh, dan M. H. Zare, "Progress in Nuclear Energy Production of High Quality Ammonium Uranyl Carbonate from Uranyl Nitrate + Carbonate Precursor Solution," *Progress in Nuclear Energy*, vol. 122, 2020.
- [7] J. Janov, P. G. Alfredson, dan V. K. Vilkaitis, "The Influence of Precipitation Conditions on the Properties of Ammonium Diuranate and Uranium Dioxide Powders," *Nuclear Materials*, vol. 44, pp. 161–174, 1972.
- [8] B. N. Murty, P. Balakrishna, R. B. Yadav, dan C. Ganguly, "Influence of Temperature of Precipitation on Agglomeration and Other Powder Characteristics of Ammonium Diuranate," *Power Technology*, vol. 115, pp. 167–183, 2001.
- [9] I. Hore-Lacy, *Production of by Product Uranium and Uranium from Unconventional Resources*, Elsevier Ltd, 2016.
- [10] G. M. Mudd, "The Future of Yellowcake: A Global Assessment of Uranium Resources and Mining," *Science of Total Environmental*, vol. 472, pp. 590–607, 2014.
- [11] Y. Zhou, G. Li, L. Xu, J. Liu, Z. Sun, dan W. Shi, "Hydrometallurgy Uranium Recovery from Sandstone-type Uranium Deposit by Acid In-situ Leaching - an Example from the Kujieertai," *Hydrometallurgy*, vol. 19, pp. 105-209, 2020.
- [12] S. Gabriel, A. Baschwitz, G. Mathonnière, F. Fizaine, dan T. Eleouet, "Building Future Nuclear Power Fleets: The Available Uranium Resources Constraint," *Resources Policy*, vol. 38, no. 4, pp. 458–469, 2013.
- [13] Z. Zhu, Y. Pranolo, dan C. Y. Cheng, "Separation of Uranium and Thorium from Rare Earths for Rare Earth Production - A Review," *Minerals Engineering*, vol. 77, pp. 185–196, 2015.
- [14] C. K. Gupta dan N. Krishnamurthy, "Extractive Metallurgy of Rare Earths," *International Materials Reviews*, vol. 37, no.1 pp. 197-248, 1992.
- [15] S. Tjokroardono, B. Soetopo, dan Ngadenin, "Tinjauan Sumberdaya Monasit di Indonesia sebagai Pendukung Litbang/ Industri Superkonduktor," *Prosiding Seminar IPTEK Nuklir dan Pengelolaan Sumber Daya Tambang*, Jakarta, 2002.
- [16] R. Prassanti, B. Y. Ani, E. Dewita, dan Sumiarti, "Pengendalian Torium (Th) dari Monasit Bangka Setelah Proses Solvent Impregnated Resin (SIR)," *Eksplorium*, vol. 40, no. 2, pp. 127–134, 2019.
- [17] R. Prassanti, "Digesti Monasit Bangka dengan Asam Sulfat," *Eksplorium*, vol. 33, no. 1, pp. 41–54, 2012.
- [18] K. Trinopiawan, R. Prassanti, Sumarni, dan R. Pudjianto, "Pemisahan Uranium dari Thorium pada Monasit Dengan Metode Ekstraksi Pelarut Alamine," *Eksplorium*, vol. XXXII, no. 155, pp. 47–52, 2011.
- [19] R. Prassanti, D. S. Putra, B. P. Kusuma, dan F. W. Nawawi, "Analysis of The Effects of Stirring Condition of Separation of Thorium in the Elution Process of Monazite Partial Solution by Solvent Impregnated Resin Method," *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 303, no. 1, pp. 1–6, 2018.
- [20] F. Riza, H. L. Nuri, E. R. Arief, S. Walujo, R. Witjahjati, "Kajian Proses Pengolahan U Kalan Menjadi Yellow Cake," *Prosiding Seminar Teknoekonomi Iptek Nuklir*, Serpong, 2006.
- [21] A. Kumari, S. Jha, J. Narayan, S. Chakravarty, dan M. Kumar, "Processing of Monazite Leach Liquor for The Recovery of Light Rare Earth Metals (LREMs)," *Minerals Engineering*, vol. 129, pp. 9–14, 2018.
- [22] M. I. N. Said, M. Angraini, M. Z. Mubarak, dan K. S. Widana, "Studi Ekstraksi Bijih Thorit dengan Metode Digesti Asam dan Pemisahan Thorium dari Logam Tanah Jarang dengan Metode Oksidasi-Presipitasi Selektif," *Eksplorium*, vol. 38, no. 2, p. 109, 2018.
- [23] H. L. Nuri, R. Faizal, W. Sugeng, S. Budi, dan S. Arif, "Pengolahan Monasit dari Limbah Penambangan Timah: Pemisahan Logam Tanah Jarang (RE) dari U Dan Th," *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir V*, pp. 54–60, 2000.