



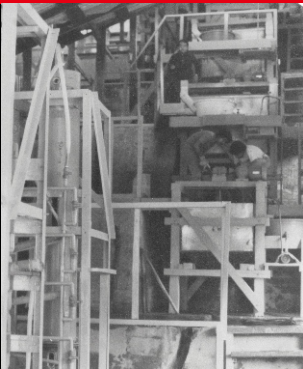
BRIN

BADAN RISET
DAN INOVASI NASIONAL

Ngadenin, Heri Syaeful,
Kurnia Setiawan Widana, dkk.

50
Tahun

Eksplorasi Uranium di *Indonesia*



ik dipijualbelikan.

50
Tahun

**Eksplorasi
Uranium di
*Indonesia***

Diterbitkan pertama pada 2022 oleh Penerbit BRIN

Tersedia untuk diunduh secara gratis: penerbit.brin.go.id



Buku ini di bawah lisensi Creative Commons Attribution Non-commercial Share Alike 4.0 International license (CC BY-NC-SA 4.0).

Lisensi ini mengizinkan Anda untuk berbagi, mengopi, mendistribusikan, dan mentransmisi karya untuk penggunaan personal dan bukan tujuan komersial, dengan memberikan atribusi sesuai ketentuan. Karya turunan dan modifikasi harus menggunakan lisensi yang sama.

Informasi detail terkait lisensi CC-BY-NC-SA 4.0 tersedia melalui tautan: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ngadenin, Heri Syaeful,
Kurnia Setiawan Widana, dkk.

50
Tahun

**Eksplorasi
Uranium di
*Indonesia***

Penerbit BRIN

Buku ini tidak diperjualbelikan.

© 2022 Badan Riset dan Inovasi Nasional
Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif

Katalog dalam Terbitan (KDT)

50 Tahun Eksplorasi Uranium di Indonesia/Ngadenin, Heri Syaeful, Kurnia Setiawan Widana, Adi Gunawan Muhammad, I Gde Sukadana, Fadiah Pratiwi, Rachman Fauzi, Riesna Prassanti, Mutia Anggraini, Kurnia Trinopiawan, & Dani Poltak Marisi–Jakarta: Penerbit BRIN, 2022.

xxv + 114 hlm.; 14,8 × 21 cm.

ISBN 978-623-7425-10-6 (cetak)
978-623-7425-11-3 (*e-book*)
978-623-8052-11-0 (*e-book*)

1. Uranium
2. Eksplorasi
3. Sumber Daya Alam




333.8

Copy editor : Annisa' Eskahita Azizah
Proofreader : Emsa Ayudia Putri & Dhevi E.I.R. Mahelingga
Penata isi : Rina Kamila
Desainer sampul : Meita Safitri

Cetakan pertama : November 2020
Cetakan edisi revisi : Desember 2022



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie, Jl. M.H. Thamrin No.8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: 0811-8612-369
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

 Penerbit BRIN
 Penerbit_BRIN
 penerbit_brin

Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR ISI

PENGANTAR PENERBIT	xiii
KATA PENGANTAR	xv
PRAKATA	xix
UCAPAN TERIMA KASIH	xxv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
A. Uranium	1
B. Kebutuhan Uranium Dunia	2
C. Cebakan Uranium Dunia	3
D. Sumber Daya Uranium Dunia	10
E. Produksi Uranium Dunia	10
F. Harga Uranium Dunia	12
G. Di mana Posisi Indonesia dalam Pemanfaatan Energi Nuklir?	14

Buku ini tidak diperjualbelikan.



BAB 2	BAGAIMANA MELAKUKAN EKSPLORASI URANIUM?	21
	A. Tahapan Eksplorasi Uranium	23
	B. Klasifikasi Sumber Daya dan Cadangan Uranium	28
BAB 3	MENYINGKAP URANIUM DI INDONESIA	31
	A. Eksplorasi Uranium Kerja Sama CEA dan BATAN pada Tahun 1969–1977	31
	B. Eksplorasi Uranium di Seluruh Indonesia oleh BATAN	38
	C. Terowongan Percobaan Penambangan Uranium di Cekungan Kalan	43
	D. Percobaan Pengolahan Bijih Uranium Eko-Remaja	55
	E. Menangani Limbah Ekstraksi Uranium	64
BAB 4	RISET EKSTRASI MONASIT DI INDONESIA	67
	A. Mengenal Monasit	67
	B. Ekstraksi Monasit Rirang	69
BAB 5	MENAKAR KELAYAKAN TAMBANG URANIUM DI INDONESIA	81
	A. Potensi Sumber Daya Uranium di Indonesia	81
	B. Prastudi Kelayakan Tambang Uranium Kalan, Kalimantan Barat	83
	C. Prospek Tambang Uranium di Indonesia	87
BAB 6	PENUTUP	91
	DAFTAR PUSTAKA	95
	GLOSARIUM	101
	INDEKS	107
	BIOGRAFI PENULIS	111



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1	Pasokan dan Permintaan Uranium Dunia 2010–2030.....	3
Gambar 1.2	Tipe Cebakan Uranium terhadap Proses-Proses pada Siklus Geologi	4
Gambar 1.3	Sebaran Cebakan Uranium di Dunia.....	9
Gambar 1.4	Jumlah Cebakan Uranium Dunia	9
Gambar 1.5	Jumlah Sumber Daya Uranium Dunia Berdasarkan Tipe Cebakan Uranium	10
Gambar 1.6	Harga Uranium (U_3O_8) 20 Tahun Terakhir dalam USD/pon.....	13
Gambar 1.7	Reaktor G.A. Siwabessy di Serpong	15
Gambar 2.1	Tahapan Eksplorasi Uranium.....	22
Gambar 2.2	Alat Pemetaan Radioaktivitas Batuan	24
Gambar 2.3	Pembuatan Parit Uji	25
Gambar 2.4	Kegiatan Pengeboran.....	26
Gambar 2.5	Kegiatan Logging Sinar Gamma	27
Gambar 3.1	Lokasi Kegiatan Eksplorasi CEA Prancis	32
Gambar 3.2	Bongkah Monasit Kaya Uranium.....	33

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Gambar 3.3	Peta Geologi Cekungan Kalan, Kabupaten Melawi, Kalimantan Barat	34
Gambar 3.4	Peta Anomali Radiometri Cekungan Kalan, Kabupaten Melawi, Kalimantan Barat.....	35
Gambar 3.5	Penyebaran Parit Uji (TR dan TRK) di Cekungan Kalan, Kabupaten Melawi, Kalimantan Barat	36
Gambar 3.6	Mesin Bor Inti Long Year 38	37
Gambar 3.7	Mesin Bor Non-inti ROC 601	37
Gambar 3.8	Peta Cakupan Wilayah Eksplorasi Uranium di Indonesia	39
Gambar 3.9	Peta Sebaran Mineralisasi Uranium di Indonesia Status Tahun 2018.....	41
Gambar 3.10	Jalur-Jalur Mineralisasi Uranium di Terowongan Tambang Eko-Remaja	44
Gambar 3.11	Peta Situasi Terowongan Tambang Uranium Eko-Remaja	47
Gambar 3.12	Pembuatan Lubang Tembak.....	49
Gambar 3.13	Pengisian Bahan Peledak pada Lubang Tembak	49
Gambar 3.14	Pengangkutan Bijih Uranium Menggunakan Lori.....	50
Gambar 3.16	<i>Stock Pile</i> Bijih Uranium di Lokasi Tambang Remaja.....	51
Gambar 3.15	Alat Muat Bijih Load Haulage Dump (LHD).....	51
Gambar 3.17	Sistem Ventilasi Terowongan Eko-Remaja	52
Gambar 3.18	Terowongan tanpa penyangga	53
Gambar 3.19	Terowongan dengan penyangga	53
Gambar 3.20	Drainase Terowongan Eko-Remaja.....	54
Gambar 3.21	Preparasi Bijih Uranium	57
Gambar 3.22	Hidrometalurgi Bijih Uranium Skala Laboratorium	57
Gambar 3.23	Pembangunan Pilot Plant Pengolahan Uranium di Lemajung.....	59
Gambar 3.24	Kompleks Laboratorium Percobaan Pengolahan Uranium Skala Pilot di Lemajung	60
Gambar 3.25	Diagram Alir Proses Pengolahan Bijih Uranium Eko-Remaja	61



Gambar 3.26	Proses Pengolahan Bijih Uranium Eko-Remaja di Lemajung, Kalan, Kalimantan Barat	62
Gambar 3.27	Peralatan Analisis Kontrol	64
Gambar 4.1	Peta Jalur Prospek Monasit di Indonesia.....	68
Gambar 4.2	Peralatan Preparasi Bijih.....	70
Gambar 4.3	Ekstraksi Pelarut Uranium dengan TBP	73
Gambar 4.4	Proses Benefisiasi Mineral Kasiterit di PT Timah (Persero) Tbk	74
Gambar 4.5	Blok Diagram Pengolahan Monasit Bangka Metode Basa.....	76
Gambar 4.6	Konfigurasi Modul pada Pilot Plant Pengolahan Monasit	78
Gambar 4.7	Pilot Plant PLUTHO	79
Gambar 5.1	Peta Daerah Potensial Uranium di Cekungan Kalan	84



Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR TABEL

Tabel 1.1	Produksi Uranium dari Tambang 2013–2017 (dalam ton uranium).....	11
Tabel 1.2	Produksi Uranium Dunia Berdasarkan Metode Penambangan	12
Tabel 1.3	Emisi Gas Rumah Kaca dari Produksi Listrik.....	18
Tabel 3.1	Hasil Pengeboran 1976–1977 di Cekungan Kalan	38
Tabel 3.2	Sebaran Mineralisasi Uranium di Indonesia Status Tahun 2018.....	42
Tabel 3.3	Jalur-Jalur Mineralisasi Uranium di Terowongan Tambang Eko-Remaja.....	44
Tabel 3.4	Kegiatan Proses Percobaan Pengolahan Bijih Uranium di Pilot Plant Lemajung	63
Tabel 5.1	Jumlah Sumber Daya Uranium di Indonesia Status Tahun 2018 (dalam ton U_3O_8).....	82
Tabel 5.2	Jalur-Jalur Mineralisasi dan Jumlah Sumber Daya Uranium di Eko-Remaja Hasil Estimasi Tahun 1991.....	85

Buku ini tidak diperjualbelikan.





Buku ini tidak diperjualbelikan.

PENGANTAR PENERBIT

Sebagai penerbit ilmiah, Penerbit BRIN mempunyai tanggung jawab untuk terus berupaya menyediakan terbitan ilmiah yang berkualitas. Upaya tersebut merupakan salah satu perwujudan tugas Penerbit BRIN untuk turut serta membangun sumber daya manusia unggul dan mencerdaskan kehidupan bangsa sebagaimana yang diamanatkan dalam pembukaan UUD 1945.

Buku berjudul *50 Tahun Eksplorasi Uranium di Indonesia* ini sebelumnya sudah pernah diterbitkan oleh BATAN Press pada tahun 2020 dan kini diterbitkan kembali oleh Penerbit BRIN dengan pengemasan ulang. Penerbitan kembali dengan akses terbuka bertujuan agar buku ini dapat diakses lebih luas dan dimanfaatkan secara gratis oleh masyarakat.

Buku ini membahas tentang sejarah awal penemuan uranium sebagai bahan bakar utama dari reaktor nuklir dan bahan mentah senjata nuklir saat ini serta merangkum kegiatan eksplorasi uranium di Indonesia yang sudah berjalan selama 50 tahun. Secara alamiah uranium terdapat di alam dalam bentuk mineral, yang dikenal dengan mineral radioaktif dan terkandung di kerak bumi serta dapat dite-

Buku ini tidak diperjualbelikan.

mukan di hampir semua jenis batuan. Namun, untuk dapat memiliki nilai ekonomi, uranium harus melalui proses pengolahan tertentu.

Indonesia tidak luput melakukan kegiatan eksplorasi, penambangan, dan pengolahan uranium karena uranium merupakan kekayaan strategis Indonesia yang di masa depan akan dimanfaatkan untuk kemakmuran rakyat. Pada bab akhir buku ini menjelaskan prospek tambang uranium di Indonesia termasuk perhitungan potensi cebakan uranium yang layak ditambang untuk menjadi cadangan uranium. Sumber daya uranium di Indonesia sebagian besar tersebar di berbagai daerah di Kalimantan, Sumatra Utara, Sulawesi Barat, dan jalur timah.

Kami berharap, hadirnya buku ini dapat bermanfaat bagi para pegiat, peneliti, pengajar, pemerhati, praktisi, dan masyarakat umum lainnya yang ingin memperkaya wawasan terkait dengan eksplorasi, penambangan, dan pengolahan uranium. Akhir kata, kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu proses penerbitan buku ini.

Penerbit BRIN

KATA PENGANTAR

Pada 12 Juli 2019, Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir (PTBGN), salah satu unit kerja di Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN) yang diberi tugas melakukan eksplorasi, penambangan, dan pengolahan bahan galian nuklir, genap berusia 50 tahun. Lima puluh tahun atau tahun emas merupakan momen yang sangat penting bagi setiap perjalanan sebuah organisasi. Dengan demikian, sangat penting untuk melihat apa yang telah dilakukan dan dicapai, kemudian melihat apa yang akan dilakukan selanjutnya.

Buku *50 Tahun Eksplorasi Uranium di Indonesia* ini menjadi refleksi perjalanan dan perjuangan panjang eksplorasi dan pengolahan uranium di Indonesia. Banyak hal telah didapatkan selama kurun waktu tersebut. Dari sisi pengembangan sumber daya manusia, telah banyak dicetak ahli eksplorasi, penambangan, pengolahan uranium, dan pengelolaan lingkungan penambangan. Dari sisi pengembangan keilmuan dan teknologi nuklir, telah banyak *paper* dan tulisan ilmiah uranium yang dipublikasikan dan menjadi referensi dalam berbagai kegiatan terkait bahan nuklir. Dari sisi penyediaan sumber daya alam, telah dilakukan estimasi sumber daya uranium yang merupakan

Buku ini tidak diperjualbelikan.



kekayaan strategis di Indonesia, yang suatu saat akan dimanfaatkan untuk sebesar-besarnya kemakmuran rakyat.

Di tengah berkurangnya sumber daya manusia karena banyaknya pegawai kompeten yang pensiun dan adanya kebijakan moratorium PNS beberapa tahun terakhir, terbitnya buku ini seperti menjadi oase di padang pasir. Buku ini dapat dijadikan sebagai sarana untuk *transfer of knowledge* dari pegawai senior ke pegawai junior. Selain itu, buku ini juga dapat dimanfaatkan sebagai salah satu referensi untuk pengambilan kebijakan terkait dengan eksplorasi, penambangan, dan pengolahan uranium di Indonesia.

Sejarah perjuangan eksplorasi di tengah hutan belantara, pembuatan laboratorium terowongan eksplorasi, dan pembuatan *pilot plant* pengolahan bijih uranium menjadi *yellow cake* adalah karya besar para pendahulu kita dan merupakan torehan prestasi yang luar biasa. Tentu prestasi tersebut harus diapresiasi dan patut dijadikan pelajaran dan inspirasi untuk generasi penerus.

Buku ini mengupas perjalanan dan sejarah panjang PTBGN dengan tutur bahasa populer, ringan, dan lugas sehingga bisa dinikmati oleh pembaca yang awam terhadap hal ihwal eksplorasi, penambangan, dan pengolahan uranium.

Di sisi lain, seiring dengan perkembangan dunia, di Indonesia pun telah terjadi berbagai dinamika dalam eksplorasi, penambangan, dan pengolahan uranium. Bahkan di akhir dekade ini, telah terjadi perubahan paradigma dengan melakukan eksplorasi dan pengolahan mineral ikutan yang sangat berharga dan menjanjikan, seperti logam tanah jarang dan molibdenum. Konsep simbiosis mutualisme melalui kerja sama dengan pihak lain juga akan berlaku untuk eksplorasi dan pengolahan mineral radioaktif di masa yang akan datang.

Kami merasa bangga dengan ide penulisan buku ini dan memberikan apresiasi setinggi-tingginya kepada para penyusun buku ini. Semoga buku ini dapat memberikan manfaat kepada pegiat,

peneliti, pengajar, pemerhati, praktisi, pelaku ekonomi, dan pemangku kepentingan lainnya. Kami mengucapkan terima kasih kepada semua pihak sehingga buku ini dapat diterbitkan.

Kepala Badan Tenaga Nuklir Nasional 2019–2021

Prof. Dr. Ir. Anhar Riza Antariksawan

Buku ini tidak diperjualbelikan.





Buku ini tidak diperjualbelikan.

PRAKATA

Perubahan adalah suatu keniscayaan, begitu pun dengan perkembangan dinamika struktur organisasi yang terus berubah secara signifikan. Berdasarkan Surat Keputusan Direktur Jenderal BATAN Nomor 27.AD/VII/1969, berdiri kantor Direktorat Survey Geologi (DSG), BATAN, yang beralamat di Jalan Lebak Bulus Raya Nomor 9, Pasar Jumat, Jakarta Selatan. Dalam perjalanannya yang cukup panjang, DSG telah berganti nama beberapa kali hingga kemudian menjadi Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir (PTBGN) berdasarkan Peraturan Kepala BATAN Nomor 14 Tahun 2013 tentang Organisasi dan Tata Kerja Badan Tenaga Nuklir Nasional.

Berdasarkan Peraturan Presiden Nomor 74 Tahun 2019 tentang Badan Riset dan Inovasi Nasional, didirikan suatu lembaga yang menjalankan integrasi penelitian, pengembangan, pengkajian dan penerapan, serta invensi dan inovasi, yaitu Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN). Dengan demikian, lembaga-lembaga terkait riset dan inovasi, seperti Badan Tenaga Nuklir Nasional (BATAN), Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT), dan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional (LAPAN) bergabung menjadi BRIN. Sebagai

Buku ini tidak diperjualbelikan.

tindak lanjut dari pembentukan BRIN, Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN) dibentuk sebagai organisasi nonstruktural pada BRIN yang mewadahi penelitian dan pengembangan serta penyelenggaraan di bidang ketenaganukliran. PTBGN kemudian berubah menjadi Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR) setelah digabung dengan Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN) dan Pusat Teknologi Limbah Radioaktif (PTLR) sebagaimana diatur pada Peraturan Badan Riset dan Inovasi Nasional Nomor 6 Tahun 2022 tentang Tugas, Fungsi, dan Struktur Organisasi Riset Tenaga Nuklir.

Dalam perjalanannya, PTBGN yang kemudian berubah menjadi PRTDBBNLR telah melakukan banyak kegiatan terutama menyangkut eksplorasi, penambangan, dan pengolahan uranium sesuai dengan yang diamanahkan Undang-Undang (UU) Nomor 31 Tahun 1964 tentang Ketentuan-Ketentuan Pokok Tenaga Atom yang kemudian diubah menjadi UU Nomor 10 Tahun 1997 tentang Ketenaganukliran dan UU Nomor 11 Tahun 2020 tentang Cipta Kerja. Sejarah perjuangan untuk melakukan eksplorasi di tengah hutan belantara, pembuatan pilot/laboratorium terowongan eksplorasi, dan pembuatan *pilot plant* pengolahan bijih uranium menjadi *yellow cake* adalah pekerjaan besar para pendahulu kita dan merupakan torehan prestasi yang luar biasa. Tentu prestasi tersebut yang harus diapresiasi dan patut dijadikan pelajaran dan inspirasi untuk generasi penerus.

Lima puluh tahun merupakan momen yang sangat penting bagi setiap perjalanan hidup manusia, baik sebagai individu, dalam bermasyarakat, dalam berorganisasi, maupun dalam bernegara, yang biasa kita sebut sebagai tahun emas. Perjalanan dalam kurun waktu 50 tahun, pada umumnya, telah memberikan banyak pengalaman baik senang maupun susah, baik keberhasilan maupun kegagalan, baik harapan maupun tantangan sehingga biasanya sudah masuk dalam fase kedewasaan, kemapanan, dan kestabilan.



Buku ini disusun dalam rangka menyambut ulang tahun yang ke-50 atau biasa sering disebut ulang tahun emas PTBGN BATAN yang jatuh pada tanggal 12 Juli 2019. Buku ini diterbitkan pertama kali BATAN Press pada Tahun 2020. Selain untuk menyambut ulang tahun emas PTBGN, buku ini disusun karena sebagian besar pelaku sejarah eksplorasi, penambangan, dan pengolahan uranium sudah menjalani masa purnabakti dan belum sempat membagi ilmu pengetahuan dan pengalaman praktis yang dimilikinya kepada para penerusnya sehingga timbul *gap* kompetensi dan penguasaan teknologi antar-generasi yang cukup besar. *Gap* tersebut timbul karena kebijakan *zero growth* pegawai negeri sipil pada 2004–2010 dan *moratorium* pada 2011–2017. Buku ini juga dimaksudkan sebagai sarana preservasi iptek bidang eksplorasi dan penambangan bahan galian nuklir, proses pemisahan uranium, serta pengelolaan limbahnya.

Buku ini berisi rangkuman kegiatan PTBGN, yang telah berubah menjadi PRTDBBNLR, serta hasil-hasil penelitian dan pengembangan selama kurang lebih 50 tahun, dimulai dari kegiatan eksplorasi uranium pada 1969 di Kalimantan bekerja sama dengan CEA Prancis sampai dengan terwujudnya *Pilot Plant* Pemisahan Logam Tanah Jarang, Uranium, dan Thorium (PLUTHO) pada 2016, serta prospek pengembangan industri bahan nuklir dan logam tanah jarang berbasis PLUTHO. Hasil kerja sama eksplorasi antara CEA Prancis dan BATAN di Kalimantan selama periode 1969 sampai dengan 1977 mendapatkan tiga cebakan uranium. Pertama, cebakan uranium di Cekungan Kalan, Kalimantan Barat; kedua, cebakan uranium di hulu Sungai Seruyan, Kalimantan Tengah; dan ketiga, cebakan uranium di hulu Sungai Mahakam, Kalimantan Timur. Cebakan uranium di Kalimantan Barat dan Kalimantan Tengah terdapat pada batuan malihan Pinoh berumur Permo-Karbon (345–251 juta tahun lalu), sedangkan cebakan uranium di Kalimantan Timur terdapat pada batuan gunung api berkomposisi asam berumur Eosen Tengah (50 juta tahun lalu).

Secara umum, bijih uranium di Cekungan Kalan dapat dikelompokkan menjadi dua, yaitu bijih uranium tipe turmalin dan bijih uranium tipe monasit. Setelah kerja sama dengan CEA Prancis berakhir pada 1977, percobaan penambangan dan pengolahan bijih uranium tipe turmalin yang berasal dari sektor Eko-Remaja dilakukan secara mandiri pada 1981–1994. Hasil percobaan penambangan dan pengolahan sebanyak 964 ton bijih uranium telah menghasilkan 740,5 kg *yellow cake*, terdiri atas MgU_2O_7 , sebanyak 200,8 kg dan $(NH_4)_2U_2O_7$ (ADU, amonium diuranat) sebanyak 539,7 kg. Kegiatan percobaan penambangan dan pengolahan uranium dilakukan dalam rangka penguasaan teknologi penambangan dan pengolahan uranium.

Selain di Kalimantan, kegiatan eksplorasi juga dilakukan di daerah-daerah yang secara geologi berpotensi terdapat cebakan uranium, yaitu di Sumatra, Sulawesi, dan Papua. Hasil dari kegiatan eksplorasi telah berhasil menemukan mineralisasi uranium dan bahkan cebakan uranium di beberapa daerah. Namun, di banyak daerah tidak ditemukan mineralisasi uranium dan hanya ditemukan indikasi mineralisasi uranium berupa anomali radioaktivitas batuan, anomali kadar uranium batuan, dan endapan sungai. Mineralisasi uranium berhasil ditemukan di Way Pubian, Lampung, pada 1975 dan Neis Geumpang, Aceh, pada 1977. Cebakan uranium ditemukan pada 1979 di daerah Aloban, Sibolga, Sumatra Utara, dan pada 2013 di Mamuju, Sulawesi Barat. Kegiatan eksplorasi tahun 2013 hingga 2018 difokuskan di daerah Mamuju. Hasil estimasi sumber daya sampai dengan tahun 2018 memperoleh sumber daya uranium sebesar 81.090 ton U_3O_8 , terdiri atas 5.235 ton kategori terukur, 5.903 ton kategori terindikasi, 4.796 ton kategori tereka, 39.441 ton kategori hipotetik, dan 25.715 ton kategori spekulatif.

Dalam rangka penguasaan teknologi penambangan, pada tahun 1994–1995, dilakukan uji coba pembuatan terowongan di sektor Rirang untuk mengetahui keterdapatn bijih uranium di bawah permukaan,

tetapi tidak berhasil. Selanjutnya, pada 1996–1999, kegiatan diganti dengan cara membuat kupasan dalam semacam tambang terbuka.

Dalam bidang pengolahan, telah dikuasai teknologi pengolahan untuk bijih uranium tipe turmalin Eko-Remaja dan bijih uranium tipe monasit Rirang. Kegiatan pengolahan bijih uranium tipe monasit Rirang dilakukan pada skala laboratorium untuk memisahkan uranium dan thorium terpisah dari logam tanah jarang. Setelah pengolahan bijih uranium tipe monasit Rirang berhasil, pengolahan diterapkan untuk bijih monasit Bangka skala laboratorium. Pengolahan bijih monasit Bangka pada tahap awal difokuskan untuk mendapatkan logam tanah jarang (LTJ) hidroksida (REOH_3) bebas radioaktif, sesuai dengan prioritas nasional untuk pengembangan industri berbasis LTJ. Setelah skala laboratorium berhasil, pengolahan ditingkatkan ke skala pilot dan sekarang menjadi *Pilot Plant* Pemisahan Logam Tanah Jarang, Uranium, dan Thorium atau disingkat PLUTHO. Dalam rangka menuju skala industri, PT Timah dan Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN) telah bersinergi melakukan studi penyusunan desain konsep dan tekno ekonomi pabrik pengolahan monasit menjadi lan-tanum oksida, cerium oksida, dan konsentrat neodimium. Mengingat nilai strategis LTJ, yang saat ini menjadi komoditas kunci dalam perang dagang (Tiongkok dan Amerika), maka sudah seharusnya penelitian dari hulu ke hilir pengembangan industri berbasis LTJ menjadi perhatian dan prioritas nasional.

Setiap perubahan yang terjadi dari waktu ke waktu, tentunya membawa ciri dan kontribusi yang signifikan dan memberikan corak dalam pengembangan ilmu teknologi eksplorasi hingga pengolahan bahan galian nuklir serta kontribusi dalam keilmuan sebagai bagian dari ilmu ketenaganukliran. PRTDBBNLR merupakan salah satu penggerak kesinambungan dari siklus daur bahan bakar nuklir di Indonesia, terutama terkait penyediaan bahan bakar nuklir dengan tetap mengutamakan keselamatan, kesehatan, dan proteksi radiasi.

Ilmu pengetahuan dan teknologi (iptek) nuklir, khususnya dalam bidang eksplorasi, penambangan, dan pengolahan mineral radioaktif, termasuk salah satu iptek yang harus dipertahankan eksistensinya dan dalam beberapa tahun ini mengalami kekritisian dalam keberlanjutan dan pengembangannya. Penulisan buku ini dilakukan sebagai sarana yang tepat untuk alih iptek kepada generasi milenial untuk menjaga kesinambungan penguasaan iptek antargenerasi. Semoga buku ini bisa menjadi jembatan bagi *knowledge transfer* dan akan menjadi salah satu acuan untuk eksplorasi, penambangan, dan pengolahan uranium di masa sekarang dan yang akan datang.

Jakarta, 18 Agustus 2022

Penulis

Buku ini tidak diperjualbelikan.



UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan terselesaikannya penyusunan buku ini, penulis mengucapkan terima kasih sebanyak-banyaknya kepada Prof. Dr. Ir. Anhar Riza Antariksawan, selaku Kepala BATAN yang telah memberikan sambutan dan pengantar, kemudian kepada Ir. Yarianto Sugeng Budi Susilo, M.Si., selaku Kepala Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir, Badan Tenaga Nuklir Nasional, yang telah memberikan motivasi dan fasilitas kepada seluruh penulis sehingga buku ini dapat diselesaikan sesuai dengan waktu yang direncanakan. Kepada teman-teman penulis, terima kasih atas kerja kerasnya sehingga buku ini dapat terwujud. Untuk para anggota Komisi Pembina Tenaga Fungsional, terima kasih atas saran, sumbangsih, dan kerja samanya.

Tidak lupa, penulis juga mengucapkan terima kasih kepada para narasumber, yaitu Ir. Djodjo, Dr. Karyono H.S., Dr. A. Sarwiyana S., Johan Baratha, M.Sc., Dr. Mulyanto, Kosim Affandi, B.Sc., Ir. Mainar S., dan Ir. Susilaningtyas sebagai pelaku sejarah langsung dalam kegiatan eksplorasi, penambangan, atau pengolahan uranium yang telah memberikan informasi dan masukan kepada penulis tentang kegiatan beberapa puluh tahun yang lalu.

Buku ini tidak diperjualbelikan.





Buku ini tidak diperjualbelikan.

BAB 1

PENDAHULUAN

A. URANIUM

Uranium merupakan bahan bakar utama dari reaktor nuklir dan sebagai bahan mentah untuk senjata nuklir yang ada sekarang. Uranium pertama kali ditemukan oleh ahli kimia berkebangsaan Jerman bernama Martin Heinrich Klaproth pada tahun 1789. Kemudian pada tahun 1938, ahli fisika Jerman Otto Hahn dan Fritz Strassmann menemukan bahwa uranium dapat membelah dan menghasilkan energi (World Nuclear Association, 2019b). Penemuan tersebut telah mengubah dunia. Karena energinya yang besar, uranium dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar reaktor nuklir yang dapat menghasilkan listrik dalam kapasitas sangat besar. Selain itu, pada Perang Dunia ke-II, uranium juga digunakan sebagai senjata nuklir.

Uranium merupakan salah satu unsur alami terberat yang ditemukan di alam. Seperti banyak unsur lainnya, uranium ditemukan di alam dalam beberapa bentuk isotop. Uranium di kerak bumi ditemukan dalam tiga bentuk isotop alami, yaitu uranium-238 dengan kelimpahan sebesar 99,2745%, uranium-235 sebesar 0,72%, dan uranium-234 sebesar 0,0055% (World Nuclear Association, 2019b).

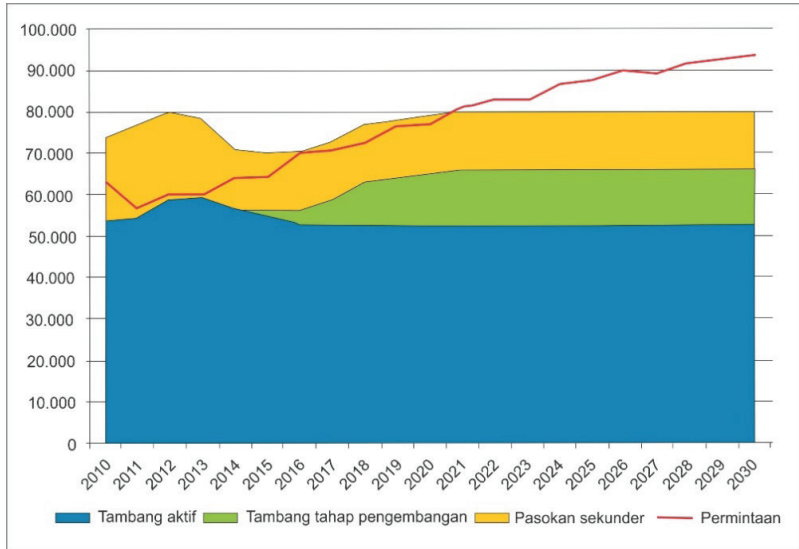
Secara alamiah uranium terdapat di alam dalam bentuk mineral, yang dikenal dengan mineral radioaktif. Mineral radioaktif adalah mineral yang mengandung paling sedikit 0,05% (500 ppm) unsur uranium, thorium, radium, dan/atau peluruhannya, serta kombinasi seluruh unsur tersebut, seperti terdapat dalam mineral *pitchblende*, uraninit, *carnotite*, dan mineral lain yang mengandung uranium serta anak luruhnya.

B. KEBUTUHAN URANIUM DUNIA

Manfaat uranium sangat berhubungan dengan karakteristik dari uranium, yaitu memiliki densitas energi yang besar. Artinya, dengan jumlah yang sangat kecil, uranium mampu menghasilkan energi yang besar. Jika dibandingkan dengan batu bara, 1 pelet uranium sebesar ujung jari dapat menghasilkan energi yang sama dengan 1 ton batu bara (Hore-Lacy, 2016). Dibandingkan dengan sumber energi lainnya, energi nuklir merupakan satu-satunya energi yang sudah terbukti dapat dikembangkan di berbagai kondisi lingkungan dan dapat menghasilkan energi listrik secara terus-menerus tanpa emisi karbon dioksida dan polusi udara sehingga energi ini dapat dikatakan ramah lingkungan.

Saat ini, energi nuklir menyumbang sekitar 11% energi dunia (World Nuclear Association, 2019a) dan tercatat terdapat 452 reaktor nuklir yang aktif beroperasi dan tersebar di 31 negara di dunia dengan total kapasitas 399.354 MW (International Atomic Energy Agency [IAEA], 2019a). Setiap tahunnya diperkirakan lebih dari 66.883 ton uranium dibutuhkan untuk menjalankan reaktor-reaktor ini (Hore-Lacy, 2016). Saat ini, sebanyak 54 reaktor baru sedang dibangun di 19 negara (IAEA, 2019b) dan diperkirakan pada tahun 2035 kebutuhan uranium dunia akan meningkat sekitar 30% menjadi 72.000–122.000 ton (Hore-Lacy, 2016). Kidd (2016) memproyeksikan akan terjadi defisit pasokan uranium mulai tahun 2020 hingga dekade berikutnya (Gambar 1.1).





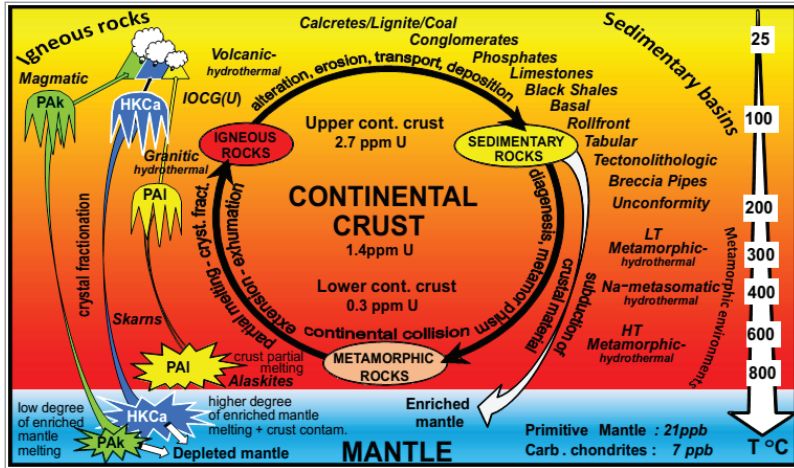
Sumber: Kidd (2016)

Gambar 1.1 Pasokan dan Permintaan Uranium Dunia 2010–2030

C. CEBAKAN URANIUM DUNIA

Uranium merupakan unsur yang secara alamiah terkandung di kerak bumi dan dapat ditemukan di hampir semua jenis batuan. Namun, untuk dapat memiliki nilai ekonomi, uranium harus terkonsentrasi pada suatu wadah. Di kerak benua, rata-rata konsentrasi uranium berkisar 1,7 ppm sampai 2,7 ppm pada kerak benua bagian atas. Uranium umumnya ditemukan terkonsentrasi di batuan beku asam dan di batuan sedimen kaya karbon organik atau fosforus. Pada air laut, konsentrasi uranium berkisar 0,003 ppm, sedangkan pada air tawar hanya mencapai 0,1 ppb (Bruneton & Cuney, 2016). Cebakan uranium dapat terbentuk di berbagai lingkungan geologi, dari lingkungan metamorfisme dengan suhu dan tekanan tinggi sampai lingkungan sedimentasi di permukaan. Uranium di batuan dapat ditemukan sebagai mineral kelompok uranium, seperti uraninit dan *pitchblende*;

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: IAEA (2018a)

Gambar 1.2 Tipe Cebakan Uranium terhadap Proses-Proses pada Siklus Geologi

elemen substitusi pada mineral ikutan, seperti di monasit; teradsorpsi di hidroksida Fe-Ti; di mineral lempung yang diadsorpsi oleh material organik; pada *crystal defect* dari mineral utama pembentuk batuan; terlarut dalam fluida; dan pada inklusi fluida (Bruneton & Cuney, 2016).

Menurut IAEA (2018a), cebakan uranium dikelompokkan menjadi 15 tipe sebagai berikut (Gambar 1.2).

- 1) Cebakan *intrusive* adalah cebakan uranium yang terdapat dalam batuan terobosan, seperti granit, pegmatit, monzonit, syenit peralkalin, dan karbonatit.
- 2) Cebakan *granite-related* adalah cebakan uranium yang terkait dengan granit meliputi: (a) urat-urat yang terdiri atas mineral bijih dan *pengotor* di granit atau pada kontak dengan batuan metasedimen; (b) mineralisasi tersebar pada granit sebagai tubuh *episyenite*. Mineralisasi uranium terjadi di dalam, pada kontak, atau di sekeliling batuan terobosan.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



- 3) Cebakan *polymetallic iron oxide breccia complex* adalah cebakan uranium yang merupakan hasil samping dari cebakan *iron oxide-copper-gold*. Sebagai contoh adalah uranium yang terdapat pada cebakan *iron oxide-copper-gold* di Olympic Dam, Australia. Kadar uraniumnya relatif rendah, yaitu 230 ppm.
- 4) Cebakan *volcanic-related* adalah cebakan uranium yang terletak di dalam dan di dekat kaldera vulkanik yang terisi lava vulkanik mafik hingga felsik atau umumnya batuan piroklastik dan perselingan sedimen klastik. Mineralisasi uranium dikontrol oleh struktur berbentuk urat-urat atau *stockworks*. Mineralisasi terjadi pada beberapa urutan stratigrafi, yaitu pada lapisan batuan gunung api dan batuan sedimen dan dapat meluas ke retakan-retakan pada batuan dasar granit dan batuan malihan. Mineral uranium yang terbentuk umumnya *pitchblende*, kofinit, dan branerit.
- 5) Cebakan *metasomatite* adalah cebakan yang terbentuk terbatas pada lapisan batuan Pra-Kambrium (kecuali cebakan Coles Hill, Amerika Serikat) pada sabuk orogenik yang dipengaruhi oleh metasomatisme Na atau K yang intens, yang menghasilkan albitisasi atau batuan yang mengalami albitisasi dan ilitisasi di sepanjang sistem sesar dalam.
- 6) Cebakan *metamorphite* adalah cebakan yang terdiri atas urat-urat, *stockwork*, dan zona rekahan di dalam batuan malihan dari berbagai umur yang tidak berkaitan dengan intrusi granit. Cebakan ini sangat bervariasi dalam ukuran, kadar, dan sumber daya.
- 7) Cebakan *proterozoic unconformity* adalah cebakan ketidakselarasan yang berhubungan dengan ketidakselarasan antara batuan dasar kristalin *Archaean-Palaeoproterozoic* dengan batuan penutupnya sedimen klastik merah berumur Proterozoikum. Dalam kebanyakan kasus, batuan dasar di bawah ketidakselarasan ini

adalah batuan yang mengalami proses hematisasi lanjut dan lempung yang sangat teralterasi, diperkirakan sebagai akibat dari cuaca purba dan/atau alterasi diagenetik/hidrotermal. Cebakannya terdiri atas urat dan *replacement* dari *pitchblende* yang umumnya terkait dengan peleburan kuarsa.

- 8) Cebakan *collapse breccia pipe* adalah cebakan yang terbentuk di cekungan sedimen. Cebakan ini berbentuk silindris seperti pipa vertikal yang berasal dari rongga pada karst (rongga hasil pelarutan karbonat) yang kemudian terisi oleh fragmen dari satuan litologi penutupnya dan mengurangi ketebalan lapisan karbonat yang mendasarinya. Uranium terkonsentrasi sebagai mineral uranium primer tetraavalen, terutama *pitchblende*, dalam matriks breksi yang permeabel dan zona retakan di sekitar pipa. Keterdapatan *pitchblende* dikaitkan dengan banyaknya mineral sulfida dan oksida yang mengandung Cu (tembaga), Fe (besi), V (vanadium), Zn (seng), Pb (timbal), Ag (perak), Mo (molibdenum), Ni (nikel), Co (kobalt), As (arsenik), dan Se (selenium). Contohnya adalah cebakan uranium dari Arizona Strip di utara Grand Canyon, Amerika Serikat.
- 9) Cebakan *sandstone* adalah cebakan yang terbentuk pada batu pasir berbutir sedang hingga kasar yang diendapkan pada lingkungan sedimen *continental fluvial* atau *marginal marine*. Abu vulkanik merupakan sumber uranium utama di dalam batu pasir. Uranium diendapkan oleh proses reduksi yang disebabkan oleh adanya berbagai agen pereduksi dalam batu pasir, yaitu material karbon, sulfida (pirit), mineral ferro-magnesian (klorit), aktivitas bakteri, cairan yang dimigrasi dari batuan dasar reservoir hidrokarbon, dan sebagainya.



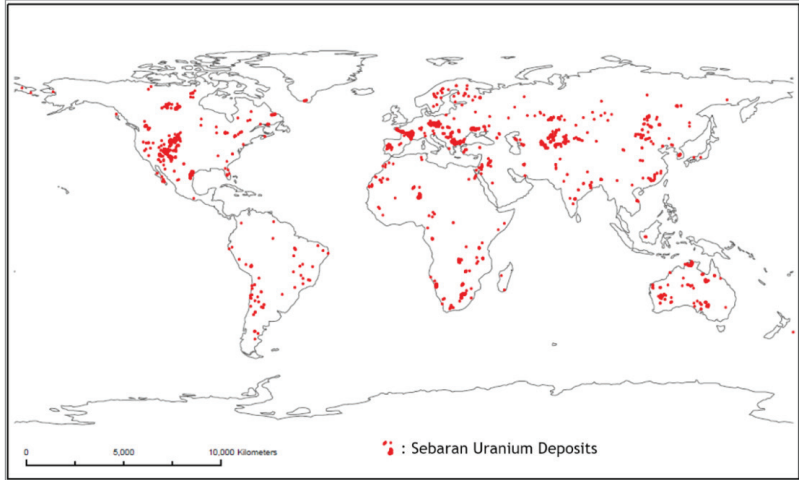
- 10) Cebakan *palaeo quartz-pebble conglomerate* adalah cebakan di mana bijih uranium oksida *detrital* ditemukan dalam *quartz-pebble conglomerates* yang diendapkan sebagai unit basal di sistem sungai teranyam *fluviolacustrine* yang berumur lebih tua dari 2400–2300 juta tahun lalu. Matriks konglomerat terdiri atas mineral *detrital* piritik, emas, serta oksida tambahan dan sulfida lainnya dalam jumlah kecil. Contoh cebakan ini adalah endapan Cekungan Witwatersrand, Afrika Selatan, di mana uranium ditambang sebagai produk sampingan dari emas, serta endapan di daerah Sungai Blind/Danau Elliot daerah Kanada.
- 11) Cebakan *surficial* secara luas didefinisikan sebagai endapan berumur muda (*Tersier-Recent*), konsentrasi uranium dekat permukaan tertampung dalam sedimen dan tanah. Endapan uranium *surficial* terbesar ditemukan di dalam semen kalsium dan magnesium karbonat di Australia (Yeelirrie) dan Namibia (Langer Heinrich). Endapan yang ditampung oleh semen ini terutama terjadi di lembah yang terisi sedimen sepanjang saluran drainase Tersier dan sedimen danau di daerah granit kaya uranium yang sangat lapuk. Karnotit adalah mineral uranium utama. Endapan *surficial* jarang terjadi di gambut rawa, gua karst, dan tanah.
- 12) Cebakan *lignite-coal* adalah cebakan dengan kandungan uranium yang tinggi pada lignit atau batu bara yang tercampur dengan mineral detritus (lanau, lempung) dan memiliki kontak langsung dengan lumpur berkarbon dan lapisan batu pasir. Terdapat kandungan pirit dan abu yang tinggi pada tipe cebakan ini. Lapisan lignit-batu bara sering diselingi atau ditindih oleh batuan piroklastik felsik. Contohnya deposit di Cekungan Williston, barat daya Amerika Serikat, dan Cekungan Serres, Yunani.

- 13) Cebakan *carbonate* adalah cebakan uranium yang tersimpan di batuan karbonat (batugamping, *dolostone*). Mineralisasi dapat bersifat singenetik dan *stratabound* atau, lebih umum, struktur yang terkait dalam karst, retakan, patahan, dan lipatan.
- 14) Cebakan *phosphate*. Cebakan ini umumnya berasal dari fosforit di laut yang berasal dari *continental shelf* yang mengandung uranium yang terdiseminasi dalam apatit berbutir halus di dalam lapisan *syndimentary stratiform*. Sumber daya uranium dari cebakan fosforit sangat besar (jutaan ton), tetapi kadarnya sangat rendah (0,005–0,015% U). Uranium dihasilkan sebagai produk sampingan dari produksi fosfat, contohnya pada cebakan fosfat di Gantour, Maroko, dan Al-Abiad, Yordania. Tipe lain dari cebakan fosforit adalah fosfat organik, seperti sedimen laut berbutir halus yang terkayakan oleh sisa-sisa ikan yang kaya uranium seperti cebakan di Kazakhstan dan fosforit metamorfisme di Swedia.
- 15) Cebakan *black shale*. Serpih hitam yang terkait mineralisasi uranium, terdiri atas serpih-laut kaya material organik atau serpih-laut piritik kaya batu bara, yang mengandung uranium *syndimentary* terdiseminasi yang diserap ke dalam material organik. Mineralisasi terkontrol oleh fraktur yang terdapat di dalam atau berdekatan dengan lapisan serpih hitam. Contohnya ialah serpih kaya uranium di Swedia dan Cebakan Chanziping, Tiongkok.

Sebaran cebakan uranium di dunia seperti terlihat pada Gambar 1.3. Cebakan uranium di Indonesia terlihat ada di Pulau Kalimantan, tepatnya terdapat di Cekungan Kalan, Kabupaten Melawi, Kalimantan Barat.

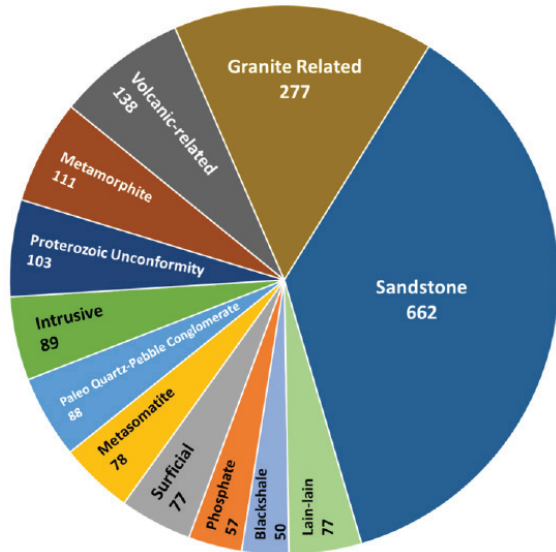
Pada akhir tahun 2015, tercatat sebanyak 1.807 cebakan uranium tersebar di seluruh dunia (Gambar 1.4).





Sumber: IAEA (2018b)

Gambar 1.3 Sebaran Cebakan Uranium di Dunia



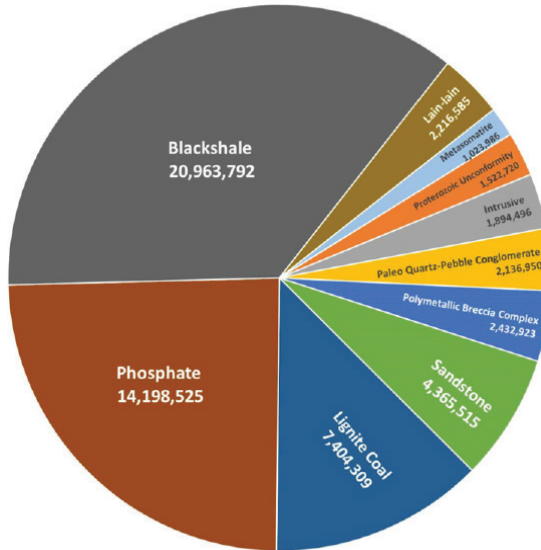
Sumber: IAEA (2018b)

Gambar 1.4 Jumlah Cebakan Uranium Dunia

Buku ini tidak diperjualbelikan.

D. SUMBER DAYA URANIUM DUNIA

Dari sejumlah 1.807 cebakan uranium, tercatat total sumber daya uranium sebesar 58 juta ton (Gambar 1.5) yang dihitung dari 1.782 cebakan, sedangkan 25 cebakan lainnya belum diketahui jumlah sumber dayanya (IAEA, 2018b).



Sumber: IAEA (2018b)

Gambar 1.5 Jumlah Sumber Daya Uranium Dunia Berdasarkan Tipe Cebakan Uranium

E. PRODUKSI URANIUM DUNIA

Lebih dari dua pertiga produksi tambang uranium dunia berasal dari Kazakhstan, Kanada, dan Australia. Kazakhstan menghasilkan uranium terbesar dari tambang, yaitu sebesar 39% pasokan dunia (2017), diikuti oleh Kanada (22%), dan Australia (10%). Produksi uranium dari tambang tahun 2008–2017 seperti terlihat pada Tabel 1.1.

Tabel 1.1 Produksi Uranium dari Tambang 2013–2017 (dalam ton uranium)

Negara	2013	2014	2015	2016	2017
Kazakhstan	22.451	23.127	23.607	24.586	23.321
Kanada	9.331	9.134	13.325	14.039	13.116
Australia	6.350	5.001	5.654	6.315	5.882
Nigeria	4.518	4.057	4.116	3.479	3.449
Namibia	4.223	3.255	2.993	3.654	4.224
Rusia	3.135	2.990	3.055	3.004	2.917
Uzbekistan	2.400	2.400	2.385	2.404	2.404
Tiongkok	1.500	1.500	1.616	1.616	1.885
Amerika Serikat	1.792	1.919	1.256	1.125	940
Ukraina	922	926	1.200	1.005	550
Afrika Selatan	531	573	393	490	308
India	385	385	385	385	421
Republik Ceko	215	193	155	138	0
Rumania	77	77	77	50	0
Pakistan	45	45	45	45	45
Brasil	192	55	40	44	0
Prancis	5	3	2	0	0
Jerman	27	33	0	0	0
Malawi	1.132	369	0	0	0
Total Dunia	59.331	56.041	60.034	62.379	59.462
Tonase U3O8	69.966	66.087	71.113	73.560	70.120
% Permintaan Dunia	91%	85%	98%	96%	93%

Sumber: (World Nuclear Association (2019c))

Produksi uranium dunia sempat turun pada periode 1980-an sampai 1990-an awal. Pada tahun 1993, produksi uranium dunia mulai meningkat kembali dan sekarang dapat memenuhi hampir semua permintaan sebagai bahan reaktor pembangkit listrik. Peningkatan jumlah produksi uranium saat ini 50% diproduksi dari penambangan dengan cara *in situ leaching* (ISL).

Metode penambangan uranium telah berubah mengikuti perkembangan teknologi yang makin maju. Pada tahun 1990, 55% dari produksi uranium dunia berasal dari tambang bawah tanah, tetapi kemudian menyusut secara dramatis sampai dengan 33% pada 1999. Di lain pihak penambangan dengan metode *in situ leaching* (ISL) terus meningkatkan total produksi uranium dunia, terutama yang berasal dari tambang di Kazakhstan. Pada tahun 2017, Kazakhstan menyumbang setengah dari produksi uranium dunia. Produksi uranium dunia berdasarkan metode penambangannya pada tahun 2017 ditunjukkan pada Tabel 1.2.

Tabel 1.2 Produksi Uranium Dunia Berdasarkan Metode Penambangan

Metode Penambangan	Tonase U	% Dunia
<i>In situ leach</i> (ISL)	29.518	50
Tambang bawah tanah dan tambang terbuka (kecuali Olympic Dam)	27.328	46
Tambang <i>by-product</i>	2.686	4

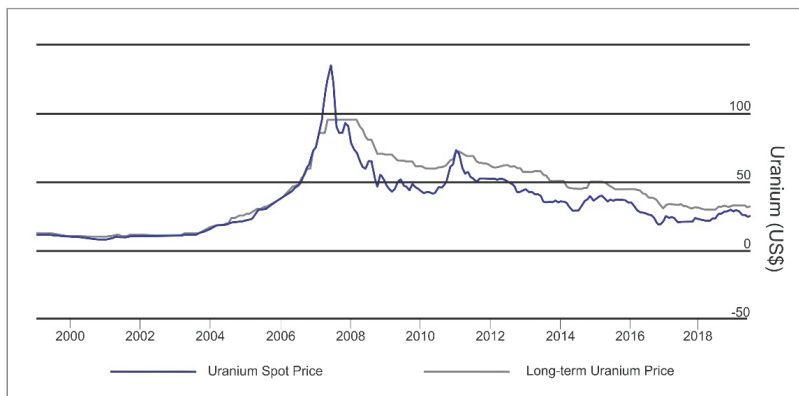
Sumber: World Nuclear Association (2019c)

F. HARGA URANIUM DUNIA

Uranium tidak diperjualbelikan di pasar bebas seperti komoditas-komoditas yang lain. Uranium umumnya akan diperjualbelikan antara penjual dan pembeli melalui pembicaraan kontrak yang sifatnya tertutup. Harga uranium dunia biasanya dipublikasikan oleh konsultan pasar yang independen seperti TradeTech, LLC, dan UxC (Cameco, 2019). Uranium yang diperjualbelikan dapat berupa uranium alam

(U_3O_8) dan uranium yang sudah diperkaya. Harga uranium sendiri terdiri atas *uranium spot price* dan *long term uranium price*. Pada subbab ini, yang akan lebih banyak digunakan adalah *uranium spot price* untuk uranium alam atau uranium yang belum diperkaya.

Dalam dua puluh tahun terakhir, harga uranium sangat berfluktuasi mengikuti permintaan pasar. Pada awal tahun 2000-an, harga uranium berada pada 9,45 USD/pon. Seiring dengan permintaan uranium yang makin banyak, harga uranium makin naik. Puncaknya, pada Juni 2007, harga uranium mencapai 136 USD/pon. Harga uranium mulai turun pada Oktober 2007 menjadi 85 USD/pon dan pada Mei 2010 turun lagi menjadi 40,75 USD/pon. Kemudian, pada awal 2011, harga uranium kembali naik menjadi 72,63 USD/pon. Pada Maret 2011, kecelakaan nuklir yang terjadi di Reaktor Fukushima Daiichi, Jepang, menyebabkan penurunan harga uranium dan pada November 2016 harga uranium menjadi 18 USD/pon. Pada akhir 2018, harga uranium kembali naik menjadi 22,32 USD/pon (Gambar 1.6) (Cameco, 2019). Terjadinya penurunan harga uranium dunia menyebabkan kegiatan eksplorasi uranium berkurang sehingga pada periode 2013–2015 tidak banyak cebakan uranium baru yang ditemukan.



Sumber: Cameco (2019)

Gambar 1.6 Harga Uranium (U_3O_8) 20 Tahun Terakhir dalam USD/pon

G. DI MANA POSISI INDONESIA DALAM PEMANFATAN ENERGI NUKLIR?

Pengembangan energi nuklir di Indonesia dimulai pada tahun 1954 saat Presiden Soekarno membentuk Panitia Negara untuk Penyelidikan Radioaktivitet yang dipimpin oleh G.A. Siwabessy. Panitia Negara ini bertugas untuk menyelidiki kemungkinan adanya jatuhnya radioaktif akibat uji coba senjata nuklir Amerika Serikat di Samudra Pasifik. Pada tahun 1958, Panitia Negara untuk Penyelidikan Radioaktivitet berubah menjadi Dewan Tenaga Atom dan setahun kemudian, Lembaga Tenaga Atom resmi didirikan. Pada tahun 1961, Indonesia mendapatkan dana sebesar 350.000 USD dari *Atoms for Peace Program* untuk membangun reaktor pertama di Bandung. Kemudian pada tahun 1965, reaktor ini diresmikan dan Lembaga Tenaga Atom berganti nama menjadi Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN).

Program nuklir Indonesia sempat terbawa ke ranah politik. Khawatir akan kekuatan negara Barat, Presiden Soekarno menyatakan rencana untuk membuat senjata nuklir sebelum akhir tahun 1965. Hal ini diinspirasi oleh keberhasilan Tiongkok dalam meledakkan senjata atom pada akhir 1964. Melalui poros Beijing-Jakarta, Presiden Soekarno dengan dibantu oleh Tiongkok berencana melakukan peledakan bom atom di wilayah timur Indonesia dan akan diklaim sebagai uji coba senjata nuklir Indonesia. Namun, rencana ini tidak pernah dilaksanakan akibat peristiwa politik tahun 1965 yang menyebabkan Presiden Soekarno turun dari jabatannya (Amir, 2010).

Pada era Presiden Soeharto, program nuklir Indonesia berubah seutuhnya menjadi program nuklir untuk sipil. Era Soeharto yang lebih cenderung terbuka ke Blok Barat membuka banyak kesempatan kerja sama dengan negara Barat dalam pengembangan sumber daya manusia dan teknologi di Indonesia, terutama tenaga dan teknologi dalam bidang eksplorasi uranium. Di tahun 1969, negara Prancis membantu dalam eksplorasi uranium di Kalimantan. Beberapa tahun kemudian, Jerman membantu dalam prospeksi sumber daya uranium di Sumatra Barat. Selanjutnya, BATAN juga melakukan eksplorasi



Foto: Dokumentasi PTBGN (2019)

Gambar 1.7 Reaktor G.A. Siwabessy di Serpong

uranium di Irian Jaya. Namun, dari ketiga eksplorasi tersebut belum didapatkan hasil yang memuaskan (Amir, 2010).

Pada tahun 1979, BATAN membangun reaktor kedua di Yogyakarta yang bernama Reaktor Kartini. Kemudian pada tahun 1987, reaktor ketiga, yaitu Reaktor G.A. Siwabessy (Gambar 1.7) dibangun di Serpong. BATAN juga melaksanakan penelitian di bidang isotop dan radiasi untuk kepentingan pertanian semenjak tahun 1966.

BATAN bisa dikatakan telah sukses menjalankan penelitian di bidang isotop dan radiasi untuk kepentingan pertanian dan kesehatan. Namun, harapan BATAN dalam pemanfaatan tenaga nuklir untuk pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) masih belum tercapai. Pada tahun 1972, BATAN dan PLN sempat membentuk Komisi Persiapan Pembangunan PLTN, yang berfungsi melakukan studi kelayakan pembangunan PLTN. Walau terjadi banyak pertentangan dari masyarakat, terutama akibat kecelakaan di Three Mile Island, Pennsylvania, komisi ini tetap melaksanakan tugasnya. Pada tahun 1980, komisi ini menyampaikan laporan finalnya kepada Presiden Soeharto, tetapi laporan ini ditolak oleh Presiden Soeharto

Buku ini tidak diperjualbelikan.

dengan alasan energi nuklir masih belum ekonomis pada saat itu (Amir, 2010).

Pada akhir tahun 1980-an, pemerintah akhirnya melihat pentingnya energi nuklir untuk pembangkit listrik sehingga pada tahun 1990 pemerintahan Presiden Soeharto mengumumkan rencana pembangunan PLTN pertama di Muria. Studi kelayakan dilakukan oleh New Japan Engineering Consultant (NEWJEC) pada tahun 1991 sampai 1996. Namun, mimpi tersebut belum terwujud sampai Presiden Soeharto lengser pada tahun 1998 (Amir, 2010).

Pada tahun 1999, Direktur Jenderal International Atomic Energy Agency (IAEA), Mohamed El Baradei mengunjungi Indonesia, yang dilakukan atas undangan dari Menteri Negara Riset dan Teknologi. El Baradei menemui Presiden Abdurrahman Wahid untuk meyakinkan membuka kemungkinan energi nuklir menjadi energi alternatif di Indonesia. Tanggapan positif Presiden Abdurrahman Wahid pada saat itu cukup mengagetkan karena Presiden Abdurrahman Wahid sebelumnya merupakan salah satu penentang keras energi nuklir ketika PLTN direncanakan akan dibangun di Muria pada era Presiden Soeharto. Pertemuan ini melahirkan kesepakatan di mana IAEA akan membantu Indonesia dalam mengembangkan rencana pengenalan tenaga nuklir. IAEA setuju membantu dana penelitian. Proyek tersebut diberi nama *Comprehensive Assessment of Different Energy Sources for Electricity Generation in Indonesia* atau disingkat CADES (Amir, 2010).

Pada tahun 2004, melalui Kebijakan Energi Nasional (KEN) yang dibuat oleh Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, muncul kembali opsi pembangunan PLTN di Jawa. Di dalam KEN, energi nuklir direkomendasikan sebagai salah satu sumber energi yang secara ekonomi kompetitif dan ramah lingkungan walaupun energi nuklir belum menjadi pilihan utama. Kebijakan dalam KEN sendiri mengadopsi kebijakan-kebijakan yang direkomendasikan dari CADES. Sebagai tindak lanjut dari penetapan Peraturan Presiden Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional yang ditandatangani Presiden Susilo Bambang Yudhoyono, ditetapkan *energy mix* Indonesia

yang diharapkan dapat tercapai pada tahun 2025 dengan energi baru terbarukan memiliki proporsi 5%, yang di dalamnya termasuk energi nuklir.

BATAN telah mempersiapkan peta rencana program pengembangan tenaga nuklir. Berdasarkan rencana tersebut, pembangunan PLTN pertama akan dimulai pada tahun 2010 dan PLTN kedua setahun setelahnya. Pada tahun 2016, PLTN pertama akan mulai beroperasi secara komersial, diikuti oleh PLTN yang kedua, dan seterusnya sampai PLTN ke-4 dengan kapasitas total 4000 MWe. Namun, pada tahun 2007, terjadi protes dan demonstrasi oleh penentang nuklir terhadap rencana pembangunan PLTN Muria ini yang menyebabkan penundaan pembangunan PLTN di Muria. Studi tapak pembangunan PLTN juga pernah dilakukan di sepanjang pantai utara Pulau Jawa bagian barat dan di Pulau Bangka. Studi tapak di sepanjang pantai utara Pulau Jawa bagian barat tidak memperoleh tapak yang sesuai, sedangkan studi tapak di Pulau Bangka memperoleh dua calon tapak yang sesuai, yaitu di Kabupaten Bangka Barat dan di Kabupaten Bangka Selatan. Oleh karena situasi politik dan pro-kontra di masyarakat, pembangunan PLTN di Pulau Bangka belum dilaksanakan.

Berdasarkan *Outlook Energi Indonesia 2018* yang diterbitkan oleh BPPT (Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi [PPIPE], 2018), kebutuhan listrik diproyeksikan meningkat sebesar tujuh kali lipat pada tahun 2050 menjadi 1.611 TWh, sedangkan produksi listrik diprediksi naik sekitar 6% per tahun dari 250 TWh menjadi 1.767 TWh. Kapasitas pembangkit listrik nasional pada tahun 2016 mencapai 57,1 GW dan sampai saat ini masih didominasi oleh PLTU batu bara sebesar 54% (30,8 GW), pembangkit listrik tenaga gas dan BBM 34% (19,4 GW), dan pembangkit listrik berbasis energi baru dan terbarukan (EBT) hanya sekitar 12% (6,9 GW). Sampai pada tahun 2050, kontribusi pembangkit listrik EBT diprediksi terus meningkat menjadi 50 GW, tetapi diperkirakan pembangkit listrik tenaga fosil masih mendominasi dengan batu bara 52% (162 GW), gas 31% (95 GW), dan minyak 1% (3,6 GW). Tambahan pasokan listrik dari PLTN

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Tabel 1.3 Emisi Gas Rumah Kaca dari Produksi Listrik

Negara	2013	2014
	Langsung dari pembakaran	Tidak Langsung (<i>life cycle</i>)
Batu bara	790–1017	176–289
Gas	362–575	77–113
Air		4–236
Solar PV		100–280
Angin		10–48
Nuklir		9–21

Sumber: Dimodifikasi dari IAEA (2001)

diprediksi baru dimulai tahun 2030 dan pada tahun 2050 mencapai 8 GW (3%) (PPIPE, 2018).

Jika dihubungkan dengan masalah lingkungan, penggunaan pembangkit listrik berbahan bakar fosil akan menimbulkan emisi gas rumah kaca ke atmosfer yang berkontribusi pada pemanasan global (Tabel 1.3). Pada tahun 2005, berdasarkan hasil laporan kepada *United Nations Framework Convention on Climate Change* (UNFCCC), total emisi gas rumah kaca yang dihasilkan Indonesia mencapai 1,1 Gton dan sektor energi menyumbang 0,4 Gton atau sekitar 36% dari total emisi gas rumah kaca tersebut (Sugiyono, 2010). Indonesia sendiri berkomitmen melalui COP-21 akan mengurangi emisi gas rumah kaca sebesar 26% pada tahun 2030 (Pusat Kajian Desentralisasi dan Otonomi Daerah, 2018).

Salah satu opsi untuk menurunkan emisi gas rumah kaca ini adalah dengan mengembangkan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Dengan mengurangi produksi listrik berbahan bakar fosil dan menaikkan kemampuan produksi listrik dengan EBT, termasuk tenaga nuklir, tentu akan membantu pemenuhan komitmen Indonesia dalam mengurangi emisi gas rumah kaca tersebut. Kelebihan lain dari bahan bakar nuklir seperti uranium ialah memiliki densitas energi yang besar sehingga tidak membutuhkan ruang penyimpanan bahan

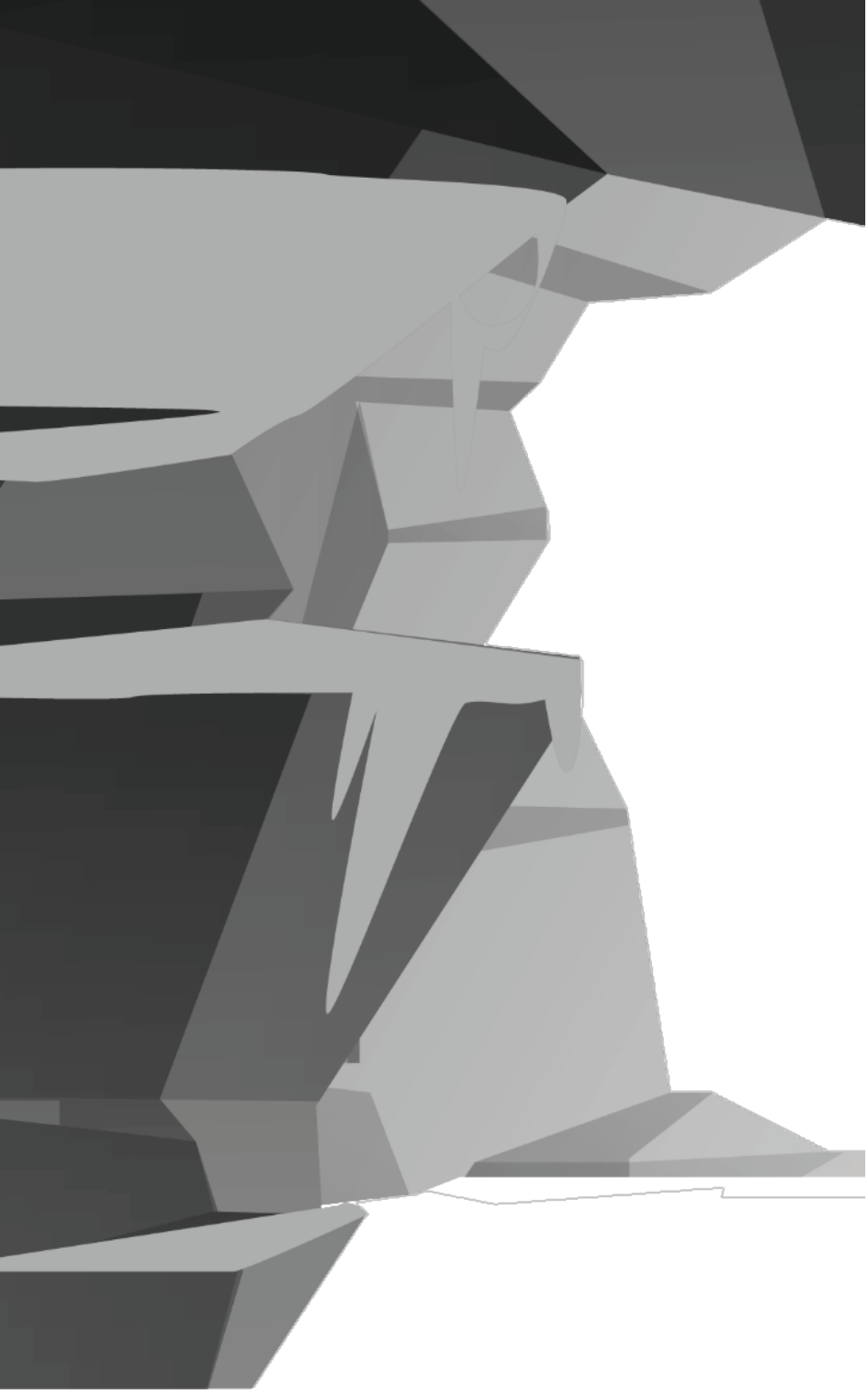
Buku ini tidak diperjualbelikan.



bakar seperti bahan bakar fosil dan transportasinya juga akan menjadi lebih mudah. Hal yang perlu kita perhatikan adalah sampai saat ini Indonesia masih sangat bergantung kepada sumber energi fosil seperti batu bara, gas, dan minyak bumi yang merupakan sumber daya yang tidak terbarukan dan suatu saat akan habis. Ketergantungan tersebut akan berdampak pada masalah ketahanan energi Indonesia.

Buku ini tidak diperjualbelikan.





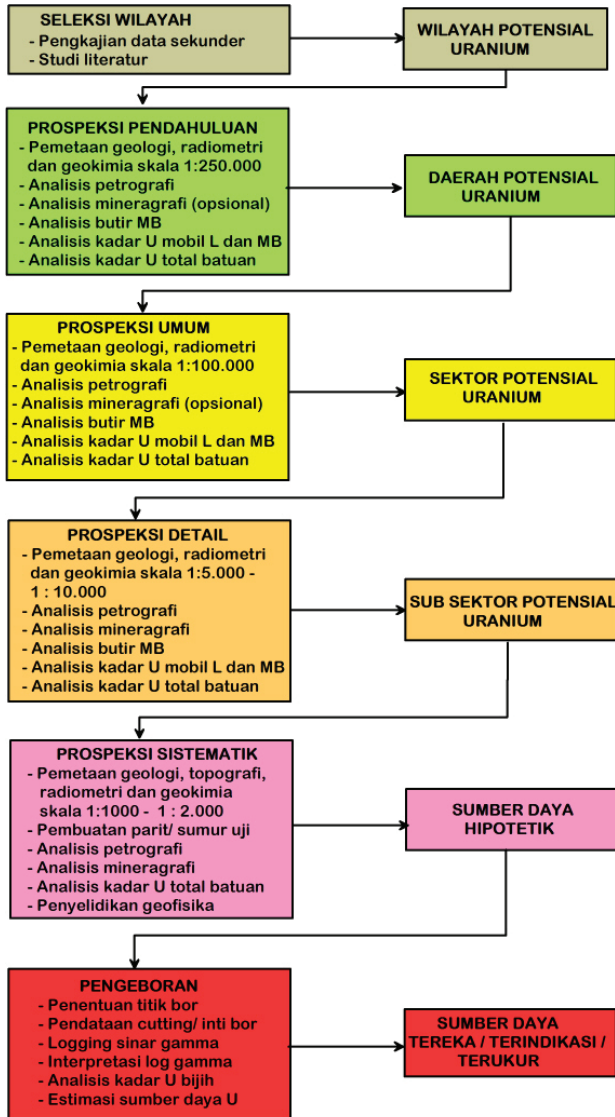
Buku ini tidak diperjualbelikan.

BAB 2

BAGAIMANA MELAKUKAN EKSPLORASI URANIUM?

Untuk mengetahui potensi ketersediaan uranium di alam tentunya memerlukan suatu kegiatan eksplorasi. Eksplorasi adalah penyelidikan geologi yang dilakukan untuk mengidentifikasi, menentukan lokasi, ukuran, bentuk, letak, sebaran, kuantitas, dan kualitas suatu endapan bahan galian untuk kemudian dapat dilakukan kajian kemungkinan dilakukan penambangan (Badan Standardisasi Nasional [BSN], 1998). Eksplorasi merupakan tahap awal dari suatu kegiatan pertambangan. Eksplorasi uranium telah dilakukan di seluruh Indonesia mulai tahun 1969 hingga saat ini. Tahapan eksplorasi yang dilakukan terdiri atas enam tahap, yaitu seleksi wilayah, prospeksi pendahuluan, prospeksi umum, prospeksi detail, prospeksi sistematis, dan pengeboran (Gambar 2.1).

Buku ini tidak diperjualbelikan.



U : uranium L : lumpur sungai MB : mineral berat

Sumber: Ngadenin (2018)

Gambar 2.1 Tahapan Eksplorasi Uranium

Buku ini tidak diperjualbelikan.

A. TAHAPAN EKSPLORASI URANIUM

1. SELEKSI WILAYAH

Seleksi wilayah dilakukan dengan cara menyeleksi wilayah berdasarkan peta geologi dan data geokimia yang ada. Daerah yang dipilih adalah daerah yang secara geologi berpotensi terbentuk cebakan uranium.

2. PROSPEKSI PENDAHULUAN

Tahapan ini dilakukan pada daerah dengan tataan geologi yang berpotensi terbentuk cebakan uranium hasil dari kegiatan seleksi wilayah. Tujuannya adalah mendapatkan daerah potensial uranium, yaitu daerah yang ditandai adanya anomali radioaktivitas batuan dan/atau anomali kadar uranium endapan sungai. Kegiatan pada tahapan ini terdiri atas pemetaan geologi, pemetaan radioaktivitas batuan, serta pengambilan sampel batuan, lumpur sungai, dan konsentrat dulang dengan kerapatan 2–5 kilometer. Peta dasar yang digunakan adalah peta topografi berskala 1 : 250.000. Luas daerah prospeksi adalah ribuan kilometer persegi.

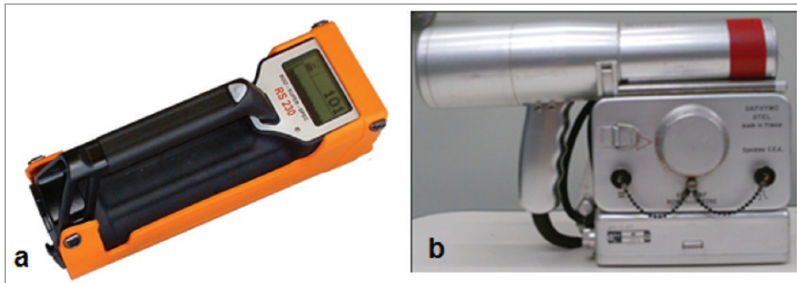
3. PROSPEKSI UMUM

Tahapan ini dilakukan pada daerah potensial uranium hasil dari prospeksi pendahuluan. Tujuannya adalah mendapatkan sektor potensial uranium yang ditandai dengan adanya anomali radioaktivitas batuan dan/atau anomali kadar uranium endapan sungai. Kegiatan pada tahapan ini terdiri atas pemetaan geologi, pemetaan radioaktivitas batuan, serta pengambilan sampel batuan, lumpur sungai, dan konsentrat dulang dengan kerapatan 0,5–2 kilometer. Peta dasar yang

digunakan adalah peta topografi berskala 1 : 100.000. Luas daerah prospeksi adalah ratusan kilometer persegi.

4. PROSPEKSI DETAIL

Tahapan ini dilakukan pada sektor potensial uranium hasil dari kegiatan prospeksi umum. Tujuan dari tahapan ini adalah mendapatkan subsektor potensial uranium yang ditandai dengan adanya mineralisasi uranium, anomali radioaktivitas batuan, dan/atau anomali kadar uranium endapan sungai. Kegiatannya terdiri atas pemetaan geologi dan pemetaan radioaktivitas batuan berskala 1 : 5.000 sampai 1 : 10.000 menggunakan spektrometer sinar gamma (Gambar 2.2). Pengambilan lumpur sungai dilakukan dengan kerapatan 50–100 meter, sedangkan pengambilan batuan dan konsentrat dulang dilakukan pada lokasi-lokasi yang dianggap mewakili. Peta dasar yang digunakan adalah peta topografi berskala 1 : 12.500. Luas daerah prospeksi adalah puluhan kilometer persegi.



Keterangan: (a) Spektrometer sinar gamma RS-125; (b) SPP2-NF

Sumber: Ngadenin (2018)

Gambar 2.2 Alat Pemetaan Radioaktivitas Batuan

5. PROSPEKSI SISTEMATIK

Tahapan ini dilakukan pada subsektor potensial uranium hasil dari prospeksi detail. Tujuannya adalah mendapatkan sumber daya uranium kategori hipotetik yang ditandai dengan adanya mineralisasi uranium dan pelamperannya secara lateral di permukaan. Kegiatannya terdiri atas pemetaan geologi, pemetaan radioaktivitas batuan,



Foto: Dokumentasi PTBGN (2015)

Gambar 2.3 Pembuatan Parit Uji

pembuatan sumur uji atau parit uji (Gambar 2.3), dan penyelidikan geofisika.

Pemetaan geologi dan radioaktivitas dilakukan dengan cara pengukuran secara jaring-jaring saling tegak lurus (*grid*) berjarak 1 m x 1 m sampai dengan 25 m x 25 m. Peta geologi dan peta radioaktivitas batuan dibuat dengan skala 1 : 1.000 sampai dengan 1 : 2.000. Parit uji atau sumur uji dibuat pada lokasi-lokasi yang ditemukan adanya mineralisasi uranium. Tujuan pembuatan sumur atau parit uji adalah untuk mengetahui dimensi dan kontrol mineralisasi uranium.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Pada tahap ini dilakukan *channel sampling* pada sumur atau parit uji untuk dianalisis kadar uraniumnya guna mengestimasi sumber daya uranium. Penyelidikan geofisika yang dilakukan adalah penyelidikan geolistrik, polarisasi terimbas, *very low frequency* (VLF), dan pengukuran intensitas gas radon. Penyelidikan geofisika dilakukan untuk membantu mengetahui kondisi mineralisasi uranium bawah permukaan sampai kedalaman tertentu.

6. PENGEBORAN

Kegiatan pengeboran terdiri atas penentuan titik lokasi lubang bor, pengeboran, *logging*, interpretasi log gamma (ILG), dan estimasi sumber daya uranium (Gambar 2.4). Tujuan dari kegiatan pengeboran adalah untuk mengetahui jumlah sumber daya uranium. Kategori sumber daya tereka apabila jarak antarbor sekitar 100 meter, kategori sumber daya terindikasi jarak antarbor sekitar 50 meter, dan kategori sumber daya terukur apabila jarak antarbor 12,5–25 meter. Jumlah lubang dan kedalaman pengeboran akan sangat menentukan jumlah sumber daya uranium.



Foto: Dokumentasi PTBGN (2013)

Gambar 2.4 Kegiatan Pengeboran

Penentuan lokasi titik pengeboran dilaksanakan dengan menggunakan teodolit atau *global positioning system* (GPS). Setelah titik ditentukan selanjutnya ditentukan kedalaman dan kemiringan pengeboran. Pendataan inti bor atau *cutting* tergantung pengeboran yang dilaksanakan apakah pengeboran inti atau non-inti.

Setelah pengeboran selesai, kegiatan dilanjutkan dengan pengukuran deviasi (kemiringan) lubang bor dan *logging* sinar gamma atau *logging spectra* (Gambar 2.5). Langkah berikutnya adalah melakukan interpretasi log gamma dalam rangka mengetahui tebal dan kadar bijih uranium bawah permukaan. Kadar dan tebal bijih uranium ini merupakan data untuk melakukan estimasi sumber daya uranium. Pada tahun 1979–2012, estimasi sumber daya uranium masih dilakukan secara manual, sedangkan mulai 2013–2018 estimasi sumber daya uranium telah dilakukan menggunakan perangkat lunak SURPAC.

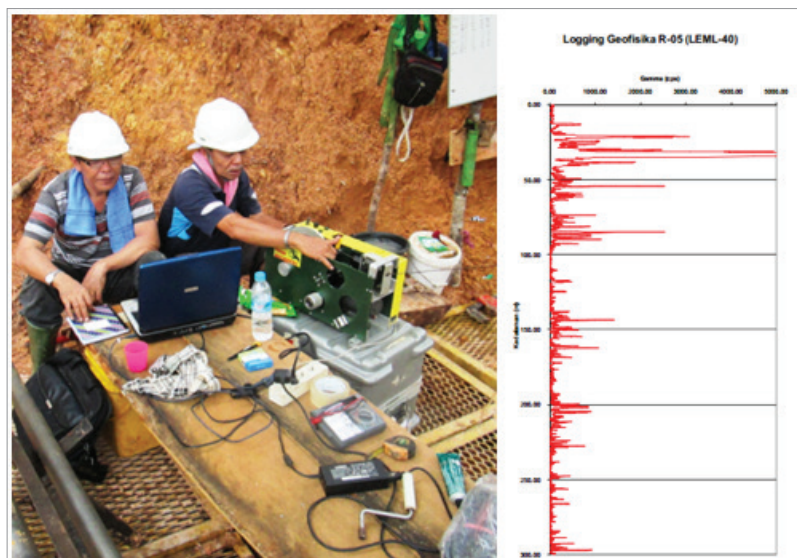


Foto: Dokumentasi PTBGN (2013)

Gambar 2.5 Kegiatan Logging Sinar Gamma

Buku ini tidak diperjualbelikan.

B. KLASIFIKASI SUMBER DAYA DAN CADANGAN URANIUM

Sumber daya uranium adalah suatu konsentrasi uranium pada atau di atas kerak bumi yang memiliki bentuk, kualitas dan kuantitas tertentu, serta memiliki prospek ekonomi untuk diekstrak. Sumber daya uranium dikelompokkan menjadi lima (BSN, 1998) sebagai berikut.

- 1) Sumber daya uranium spekulatif adalah sumber daya uranium yang diperoleh dari estimasi dengan cara membandingkan antara satu daerah yang telah diestimasi dengan daerah yang akan diestimasi berdasarkan kemiripan keterdapatan uranium dalam suatu formasi batuan.
- 2) Sumber daya uranium hipotetik adalah sumber daya uranium yang tonase, densitas, bentuk, dimensi, kimia, kadar, dan kandungannya dapat diestimasi dengan tingkat keyakinan geologi sangat rendah. Sumber daya ini diperoleh dari hasil estimasi kegiatan eksplorasi pada tahapan prospeksi sistematis.
- 3) Sumber daya uranium tereka adalah sumber daya uranium yang tonase, densitas, bentuk, dimensi, kimia, kadar, dan kandungannya dapat diestimasi dengan tingkat keyakinan geologi rendah. Sumber daya ini diperoleh dari hasil estimasi kegiatan eksplorasi pada tahapan pengeboran dengan kerapatan jarak antara lubang bor adalah sekitar 100 meter.
- 4) Sumber daya uranium terindikasi adalah sumber daya uranium yang tonase, densitas, bentuk, dimensi, kimia, kadar, dan kandungannya dapat diestimasi dengan tingkat keyakinan geologi sedang. Sumber daya ini diperoleh dari hasil estimasi kegiatan eksplorasi pada tahapan pengeboran dengan kerapatan jarak antara lubang bor sekitar 50 meter.
- 5) Sumber daya uranium terukur adalah sumber daya uranium yang tonase, densitas, bentuk, dimensi, kimia, kadar, dan kandungannya dapat diestimasi dengan tingkat keyakinan geologi tinggi. Sumber daya ini diperoleh dari hasil estimasi kegiatan eksplorasi

pada tahapan pengeboran dengan kerapatan jarak antara lubang bor 12,5–25 meter.

Keyakinan geologi adalah tingkat keyakinan mengenai cebakan mineral yang meliputi ukuran, bentuk, sebaran, kuantitas, dan kualitasnya sesuai dengan tahap eksplorasinya.

Cadangan uranium adalah cebakan uranium yang telah diketahui ukuran, bentuk, sebaran, kualitas, dan kuantitasnya dan secara ekonomi, teknik, hukum, lingkungan, dan sosial dapat ditambang pada saat perhitungan dilakukan. Cebakan uranium adalah akumulasi mineral kelompok uranium yang terdapat di kerak bumi yang terbentuk oleh proses geologi tertentu dan dapat bernilai ekonomi. Cadangan uranium dikelompokkan menjadi dua (BSN, 1998) sebagai berikut.

- 1) Cadangan terkira adalah bagian sumber daya uranium terindikasi yang ekonomis untuk ditambang dan dalam beberapa kondisi juga merupakan bagian dari pada sumber daya terukur.
- 2) Cadangan terbukti adalah bagian sumber daya uranium terukur yang ekonomis untuk ditambang.





Buku ini tidak diperjualbelikan.

BAB 3

MENYINGKAP URANIUM DI INDONESIA

A. EKSPLORASI URANIUM KERJA SAMA CEA DAN BATAN PADA TAHUN 1969–1977

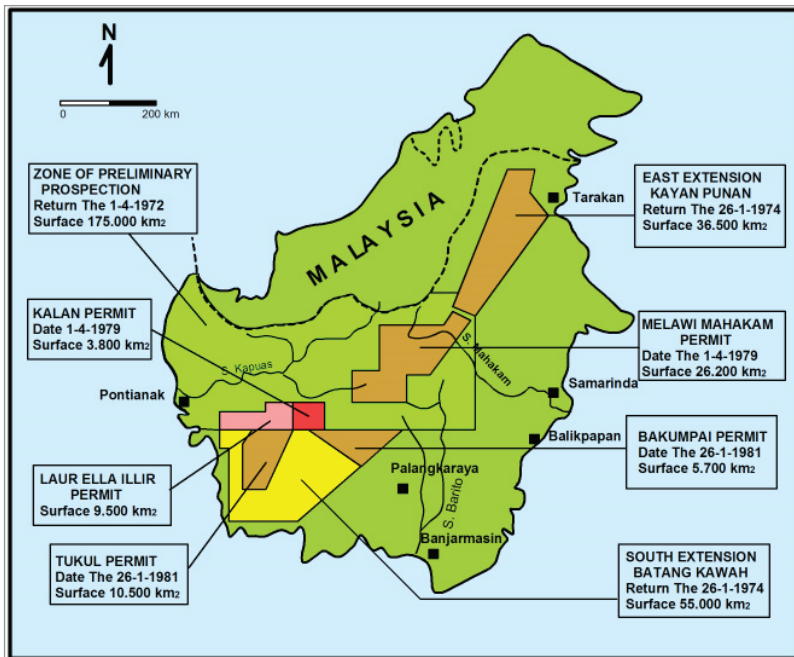
Eksplorasi uranium di Kalimantan pertama kali dilaksanakan berdasarkan kerja sama antara pemerintah Indonesia dan Prancis. Pemerintah Indonesia diwakili oleh Badan Tenaga Atom Nasional (BATAN) dan Pemerintah Prancis diwakili oleh Commissariat a' L' Energie Atomique (CEA), yaitu badan energi atom milik pemerintah Prancis. Perjanjian kerja sama ditandatangani pada tanggal 3 April 1969 (CEA-BATAN, 1997). Kegiatan eksplorasi dilaksanakan secara regional di Kalimantan dan dilanjutkan dengan eksplorasi detail di Cekungan Kalan, Kalimantan Barat.

1. EKSPLORASI REGIONAL KALIMANTAN

Eksplorasi regional berupa kegiatan *Preliminary Propection* di wilayah Kalimantan Barat dengan luas daerah cakupan sekitar 175.000 km². Untuk selanjutnya daerah prospeksi diperluas ke arah timur (*East Extension* Kayan-Punan) dengan luas daerah 36.000 km² dan ke arah selatan (*South Extension* Batang Kawah) dengan luas daerah

55.000 km². Setelah kegiatan *Preliminary Prospection* atau prospeksi tahap awal selesai, pada tanggal 1 April 1972, daerah *Preliminary Prospection* dikembalikan kepada Pemerintah Indonesia, sedangkan daerah Kayan-Punan dan Batang Kawah dikembalikan pada tanggal 26 Januari 1974 (CEA-BATAN, 1997).

Hasil prospeksi di daerah *Preliminary Prospection* mendapatkan daerah prospek uranium di Kalan *Permit* 3.800 km², Laur Ella Ilir *Permit* 9.500 km², dan Mahakam *Permit* 26.200 km². Sementara itu, hasil perluasan di daerah *South Extension* Batang Kawah mendapatkan daerah prospek uranium Tukul *Permit* 10.500 km² dan Bakumpai *Permit* 5.700 km². Perluasan daerah di *East Extension* Kayan-Punan tidak mendapatkan daerah prospek uranium (Gambar 3.1). Pada daerah-daerah prospek uranium tersebut kemudian ditindaklanjuti



Sumber: Modifikasi dari CEA-BATAN (1977)

Gambar 3.1 Lokasi Kegiatan Eksplorasi CEA Prancis

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Foto: Dokumentasi PTBGN (1973)

Gambar 3.2 Bongkah Monasit Kaya Uranium

dengan kegiatan prospeksi lanjutan tahapan detail hingga sistematis bahkan di beberapa lokasi dilakukan pengeboran.

Dalam melaksanakan eksplorasi uranium di Kalimantan Barat, CEA Prancis membuat hipotesis bahwa cebakan uranium di Kalimantan Barat diharapkan akan dijumpai pada batuan sedimen di Cekungan Melawi berumur Tersier yang diendapkan pada lingkungan neritik hingga darat, seperti cebakan uranium pada batuan sedimen yang ditemukan di daerah Colorado, Amerika Serikat. Namun, ternyata pada batuan sedimen di Cekungan Melawi tidak ditemukan adanya indikasi keterdapatannya cebakan uranium.

Indikasi mineralisasi uranium di Cekungan Kalan ditemukan pertama kali pada akhir tahun 1973, yaitu dengan adanya penemuan bongkah monasit kaya uranium berukuran besar di lembah Sungai Rirang (Gambar 3.2) dan penemuan beberapa anomali geokimia *stream sediment* di Sungai Jeronang pada kegiatan prospeksi semidetil periode September–Desember 1973 (CEA-BATAN, 1997).

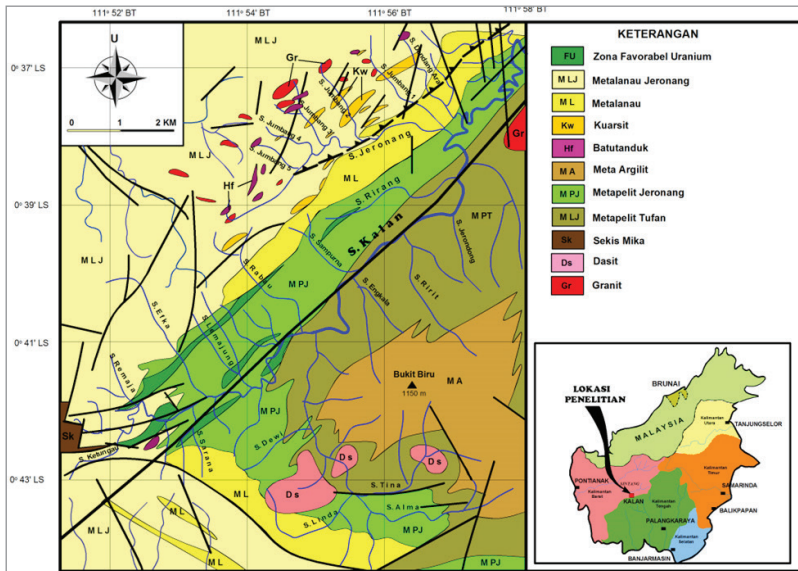
Sejak ditemukan indikasi mineralisasi uranium di lembah Sungai Rirang dan Sungai Jeronang yang merupakan cabang sungai dari Sungai Kalan, kegiatan eksplorasi dipusatkan di daerah hulu Sungai Kalan dan sekitarnya. Daerah-daerah lainnya, yaitu Melawi-Mahakam *Permit* dan Kalan *Permit* dikembalikan kepada Pemerintah Republik Indonesia pada tanggal 1 April 1979 dan daerah Bakumpai serta Tukul *Permit* dikembalikan pada tanggal 26 Januari 1981 (CEA-BATAN, 1997).

Buku ini tidak diperjualbelikan.



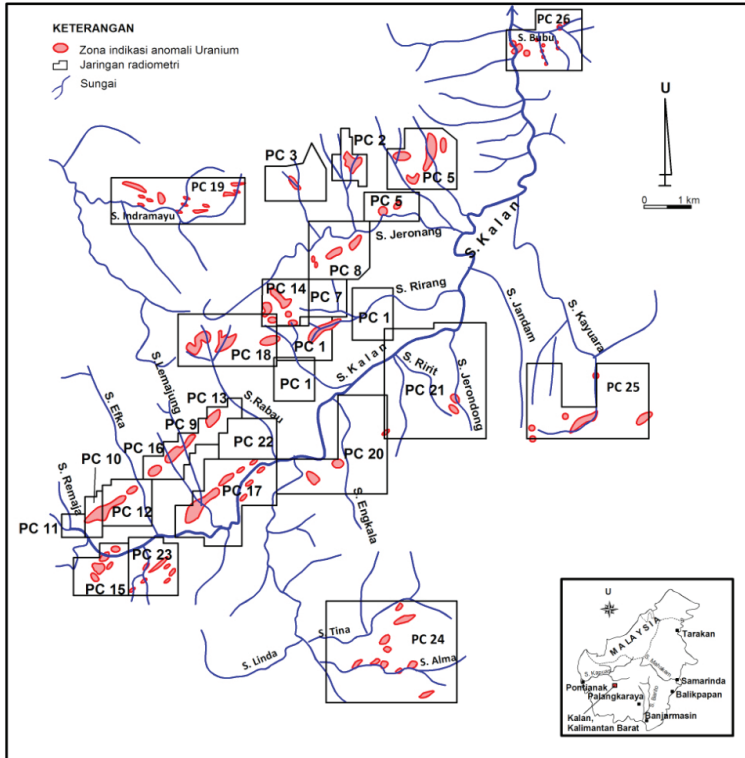
2. EKSPLORASI DETAIL DI CEKUNGAN KALAN, KALIMANTAN BARAT

Tahapan eksplorasi detail yang dilakukan oleh CEA-BATAN di Cekungan Kalan adalah pendataan permukaan dan bawah permukaan. Pendataan permukaan terdiri atas pemetaan geologi, pemetaan radiometri, dan pembuatan kupasan, sedangkan pendataan bawah permukaan terdiri atas pengeboran inti dan non-inti serta logging sinar gamma. Hasil pemetaan geologi dituangkan dalam Peta Geologi Cekungan Kalan. Litologi Cekungan Kalan tersusun oleh batuan malihan dan batuan beku. Batuan malihan berumur Karbon-Trias terdiri atas metalanau Jeronang, metalanau, kuarsit, batutanduk, metaargilit, metapelit Jeronang, metapelit tufan, dan sekis mika. Batuan beku berumur Kapur Atas terdiri atas dasit dan granit. Mineralisasi uranium berbentuk urat-urat berukuran sentimetrik-desimetrik terdapat dalam zona *favourable* yang tersusun oleh perselingan metalanau dan metapelit (Gambar 3.3).



Sumber: Modifikasi dari CEA-BATAN (1977)

Gambar 3.3 Peta Geologi Cekungan Kalan, Kabupaten Melawi, Kalimantan Barat

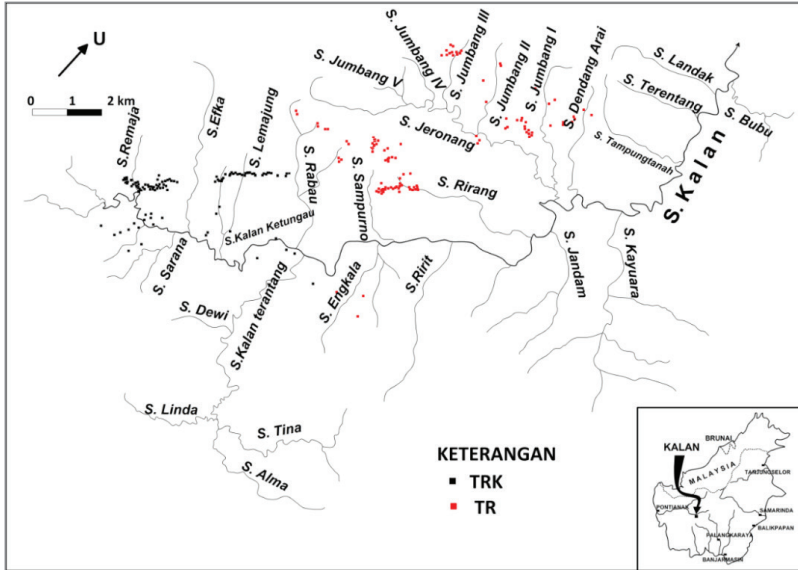


Sumber: Modifikasi dari CEA-BATAN (1977)

Gambar 3.4 Peta Anomali Radiometri Cekungan Kalkan, Kabupaten Melawi, Kalimantan Barat

Pemetaan radiometri yang dilaksanakan adalah pemetaan radiometri permukaan berjaring atau *plank countour* (PC) dengan interval titik pengukuran 20 m x 20 m. Pengukuran radiometri dilakukan menggunakan alat detektor sinar gamma *scintillometer* SPP2NF. Hasil pemetaan radiometri dituangkan dalam peta anomali radiometri batuan (PC 1 sampai PC 26). Secara umum, anomali radiometri batuan membentuk suatu zona berarah barat daya-timur laut (Gambar 3.4). Untuk mengetahui bentuk cebakan uranium, selanjutnya pada lokasi-lokasi anomali radiometri batuan tersebut ditindaklanjuti dengan pembuatan kupasan. Metode kupasan ini digunakan untuk

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Sumber: Modifikasi dari CEA-BATAN (1977)

Gambar 3.5 Penyebaran Parit Uji (TR dan TRK) di Cekungan Kalan, Kabupaten Melawi, Kalimantan Barat

mendapatkan pengetahuan tentang kontrol dari indikasi anomali radiometri pada permukaan tanah. Kupasan-kupasan anomali radiometri di Kalan diberi notasi TR singkatan dari *tranche* (bahasa Prancis) yang berarti parit uji dan TRK merupakan singkatan dari *Tranche Kalan* (Gambar 3.5).

Kegiatan pengeboran di Cekungan Kalan dimulai pada tahun 1976 dan dilakukan menggunakan mesin bor inti Long Year 38 (Gambar 3.6) dan mesin bor non-inti ROC 601 (Gambar 3.7). Tujuan pengeboran adalah untuk mendapatkan data mineralisasi uranium bawah permukaan. Kedalaman pengeboran berkisar antara 150–400 meter. Total kedalaman lubang bor yang dilaksanakan oleh CEA-BATAN tahun 1976 sampai dengan 1977 adalah 26.200 meter dengan rincian seperti terlihat pada Tabel 3.1.



Foto: Dokumentasi PTBGN (1983)

Gambar 3.6 Mesin Bor Inti Long Year 38

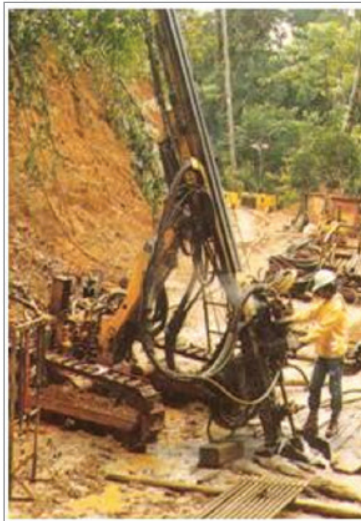


Foto: Dokumentasi PTBGN (1987)

Gambar 3.7 Mesin Bor Non-inti ROC 601



Buku ini tidak diperjualbelikan.



Tabel 3.1 Hasil Pengeboran 1976–1977 di Cekungan Kalan

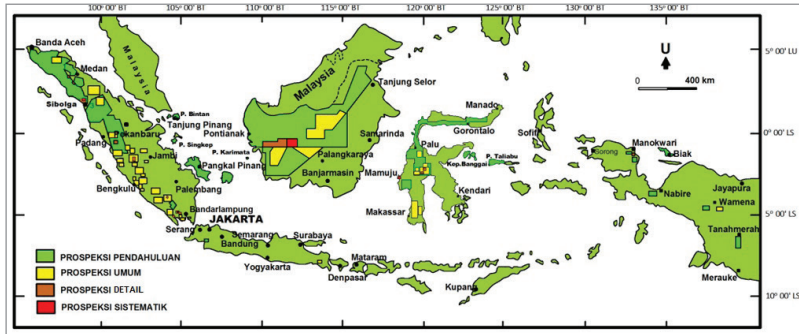
Sektor	Jenis Mesin Bor	Jumlah lubang bor	Kedalaman (m)
Remaja Efka	Long Year 38	29 titik	8.000
	ROC 601	92 titik	6.600
Lemajung	Long Year 38	15 titik (1–15)	4.525
Semut	Long Year 38	5 titik (1–5)	1.900
Amir Engkala	Long Year 38	6 titik (1–6)	1.500
Rirang	Long Year 38	29 titik (20–48)	3.675
Total kedalaman			26.200

Sumber: CEA-BATAN (1977)

B. EKSPLORASI URANIUM DI SELURUH INDONESIA OLEH BATAN

Selain eksplorasi uranium yang dilakukan secara kerja sama CEA dan BATAN pada 1969–1977 di Kalimantan, DSG secara mandiri melakukan eksplorasi uranium di seluruh wilayah Indonesia yang diawali dengan kegiatan survei radiometri di daerah Ciater, Jawa Barat, pada 1971. Kemudian, pada tahun 1972, dilakukan prospeksi umum di daerah Way Samang, Lampung Tengah, dan pada tahun 1975, dilakukan prospeksi umum di daerah Harau, Sumatra Barat. Pada tahun-tahun berikutnya, eksplorasi dilaksanakan di Pulau Jawa, Nusa Tenggara Timur, Sumatra, Kalimantan, Sulawesi, dan Papua (Gambar 3.8).

Di Pulau Jawa, eksplorasi dilaksanakan di Jawa Timur dan Jawa Barat. Di Jawa Timur, pada 1976 dilakukan survei tinjau di daerah Kalibaru, Jember, dan pada tahun 1977 dilanjutkan dengan prospeksi umum. Di Jawa Barat, dilakukan prospeksi pendahuluan di daerah Cibadak, Sukabumi, pada 1997. Kegiatan selanjutnya dilakukan di Nusa Tenggara Timur pada tahun 1980, yaitu peninjauan di daerah Bukit Setan, Flores Tengah, Nusa Tenggara Timur. Di Sumatra, eksplorasi dilaksanakan di beberapa provinsi, yaitu Provinsi Nanggroe Aceh Darussalam tahun 1980–1998, Sumatra Utara tahun 1977–1988,



Sumber: Ngadenin (2019)

Gambar 3.8 Peta Cakupan Wilayah Eksplorasi Uranium di Indonesia

Sumatra Barat tahun 1975–1983, Jambi tahun 1980–1982, Bengkulu tahun 1979, Sumatra Selatan tahun 1980–1983, Lampung tahun 1972–1982, Kepulauan Riau tahun 1985–1986, dan Bangka Belitung tahun 2009–2016 (Gambar 3.8).

Eksplorasi di Kalimantan dilaksanakan tahun 1978 hingga 2018 setelah kerja sama BATAN dengan CEA Prancis berakhir pada 1977. Kegiatan difokuskan di Cekungan Kalan, Kalimantan Barat, dalam rangka melakukan estimasi potensi sumber daya uranium. Tahapan yang digunakan adalah dengan prospeksi sistematis, penyelidikan geofisika, dan pengeboran. Selain di Cekungan Kalan, kegiatan eksplorasi juga dilaksanakan pada daerah-daerah potensial uranium hasil temuan CEA Prancis di wilayah Kalimantan Barat, Kalimantan Tengah, dan Kalimantan Timur. Eksplorasi lanjutan di Kalimantan Barat dilakukan di daerah Ella Ilir dan Nanga Bulit; Kalimantan Tengah di daerah Mentawa dan Darab; dan Kalimantan Timur di daerah Kawat (Gambar 3.9). Tahapan eksplorasi yang dilakukan pada umumnya adalah prospeksi sistematis. Beberapa daerah, yaitu di Darab, Kalimantan Tengah, dan Ella Ilir, Kalimantan Barat, telah dilakukan pengeboran.

Eksplorasi uranium di Sulawesi dilaksanakan di beberapa provinsi yaitu Provinsi Sulawesi Selatan tahun 1979–1984, Sulawesi Tengah tahun 1981–1985, Gorontalo tahun 1984, Sulawesi Utara tahun 1984,

Buku ini tidak diperjualbelikan.



dan Sulawesi Barat tahun 2013–2018. Di Pulau Taliabu yang termasuk wilayah Provinsi Maluku Utara, prospeksi pendahuluan dilaksanakan tahun 1981–1982 (Gambar 3.8). Di Papua, eksplorasi uranium dilakukan di Provinsi Papua Barat dan Provinsi Papua. Prospeksi detail di Papua Barat dilakukan pada tahun 1976 di daerah Siwi Atas, Kabupaten Manokwari. Prospeksi pendahuluan dilaksanakan di daerah Ransiki, Manokwari Selatan, tahun 1978 dan di daerah Pegunungan Arfak tahun 1993. Di Provinsi Papua, prospeksi pendahuluan dilakukan di beberapa wilayah yaitu Tanah Merah, Kabupaten Boven Digoel tahun 2011, beberapa wilayah di Kabupaten Nduga tahun 2012, dan Biak Numfor tahun 2014. Prospeksi umum dilaksanakan di daerah Nalca, Kabupaten Yahukimo, tahun 2011 (Gambar 3.8).

Secara keseluruhan hasil eksplorasi di Indonesia mendapatkan 10 (sepuluh) lokasi mineralisasi uranium di Indonesia, yaitu tiga lokasi mineralisasi di Sumatra, enam lokasi mineralisasi di Kalimantan, dan satu lokasi mineralisasi di Sulawesi (Gambar 3.9 dan Tabel 3.2). Tiga lokasi mineralisasi di Sumatra, yaitu (1) mineralisasi uranium tipe urat pada batuan malihan Formasi Alas berumur Permo-Karbon di daerah Neis Geumpang, Kabupaten Gayo Lues, Provinsi Nanggroe Aceh Darussalam (Widodo, 1998); (2) mineralisasi uranium tipe batu pasir pada batuan sedimen Formasi Barus yang berumur Tersier di daerah Aloban, Kabupaten Tapanuli Tengah, Sumatra Utara (Kusumadinata & Sastrowihardjo, 1988); dan (3) mineralisasi uranium pada urat pegmatit dalam batuan granit berumur Kapur di daerah Way Pubian, Kabupaten Tanggamus, Provinsi Lampung (Soeprapto, 1980).

Di Pulau Kalimantan, eksplorasi yang dilakukan oleh BATAN hanya melanjutkan kegiatan eksplorasi yang pernah dilakukan CEA Prancis. Hasil eksplorasi oleh CEA Prancis memperoleh enam lokasi mineralisasi uranium di Kalimantan, yaitu tiga di Kalimantan Barat, dua di Kalimantan Tengah, dan satu di Kalimantan Timur. Mineralisasi uranium di Kalimantan Barat terdapat di Cekungan Kalan dan daerah Ella Ilir di Kabupaten Melawi, serta daerah Nanga Bulit di Kabupaten Kapuas Hulu (Subiantoro, 1994). Mineralisasi uranium di Kalimantan Tengah terdapat di daerah Mentawa (Ngadenin, 1997) dan Darab (Soeprapto, 1990; Widodo, 1989), Kabupaten Seruyan.



Sumber: Ngadenin (2018)

Gambar 3.9 Peta Sebaran Mineralisasi Uranium di Indonesia Status Tahun 2018

Mineralisasi uranium di Kalimantan Timur terdapat di daerah Kawat, Mahakam Ulu. Mineralisasi uranium di Kalan dan Ella Ilir berupa urat-urat yang terdapat pada batuan malihan Pinoh berumur Permo-Karbon, sedangkan di Nanga Bulit mineralisasi uranium terdapat pada batuan vulkano sedimenter berumur Tersier. Mineralisasi uranium di daerah Mentawa dan Darab sama dengan mineralisasi di Kalan, yaitu berupa urat-urat yang terdapat pada batuan malihan Pinoh berumur Permo-Karbon. Mineralisasi uranium di Kalimantan Timur berupa urat-urat yang terdapat pada batuan riolit bagian dari batuan Gunung Api Nyaan yang berumur Tersier. Hasil eksplorasi di Pulau Sulawesi mendapatkan satu mineralisasi uranium di Kabupaten Mamuju, Sulawesi Barat. Tipe mineralisasinya adalah tipe vulkanik dan terdapat pada batuan Gunung Api Adang berumur Miosen Akhir (Ngadenin, 2014; Widana, 2015). Hasil eksplorasi uranium di Jawa, Nusa Tenggara, dan Papua belum menemukan adanya mineralisasi uranium. Kegiatan eksplorasi di Papua mulai tahun 2013 untuk sementara dihentikan karena keterbatasan anggaran dan di beberapa daerah terdapat kendala keamanan yang belum terjamin.

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Tabel 3.2 Sebaran Mineralisasi Uranium di Indonesia Status Tahun 2018

No.	Lokasi	Tipe Mineralisasi Uranium	Mineral Radioaktif	Radio-aktivitas (c/s SPP 2NF)	Kadar U (ppm)	Tatanan Geologi
1.	Neis Geumpang, Gayo Lues, Nanggroe Aceh Darusalam	Mineralisasi U tipe urat pada batuan malihan	Pitchblende dan branerit	1.100	56	Kompleks batuan malihan Formasi Alas Permo-Karbon dan Granit Permo-Trias
2.	Aloban, Tapanuli Tengah, Sumatra Utara	Mineralisasi U tipe batu pasir	Kofinit	15.000	1.148	Batuan sedimen darat Formasi Barus Tersier tidak selaras di atas granit Sibolga Permo-Karbon
3.	Way Pubian, Tanggamus, Lampung	Mineralisasi U tipe urat pada pegmatit granit	Uraninit	5.000	2.200	Batuan malihan Paleozoikum dan Granit Kapur
4.	Kalan, Melawi, Kalimantan Barat	Mineralisasi U tipe urat pada batuan malihan	Pitchblende, uraninit, branerit, davidit	15.000	1.000–31.000	Batuan malihan Permo-Karbon dalam jalur tonalit Schwaner Kapur
5.	Ella Ilir, Melawi, Kalimantan Barat	Mineralisasi U tipe urat pada batuan malihan	Uraninit, gumit	15.000	2.965	Batuan malihan Permo-Karbon dalam jalur tonalit Schwaner Kapur
6.	Mentawa, Seruyan, Kalimantan Tengah	Mineralisasi U tipe urat pada batuan malihan	Uraninit	15.000	9.750	Batuan malihan Permo-Karbon dalam jalur tonalit Schwaner Kapur
7.	Darab, Seruyan, Kalimantan Tengah	Mineralisasi U tipe urat pada batuan malihan	Uraninit, uranothorit	7.500	1.732	Batuan malihan Permo-Karbon dalam jalur tonalit Schwaner Kapur

Buku ini tidak diperjualbelikan.



No.	Lokasi	Tipe Mineralisasi Uranium	Mineral Radioaktif	Radio-aktivitas (c/s SPP 2NF)	Kadar U (ppm)	Tatanan Geologi
8	Nanga Bulit, Kapuas Hulu, Kalimantan Barat	Mineralisasi U tipe vulkanik	Uraninit	15.000	30.025	Batuan vulkanik asam dan vulkano sedimenter Tersier
9	Kawat, Mahakam Hulu, Kalimantan Timur	Mineralisasi U tipe vulkanik	Pitchblende	15.000	8.425	Kompleks batuan vulkanik asam Tersier
10	Mamuju, Sulawesi Barat	Mineralisasi U tipe vulkanik	Thorianit, thorit, gummit, autonit	15.000	4.360–6.000	Batuan gunungapi leusitik-basaltik berumur Tersier

Sumber: Ngadenin (2018)

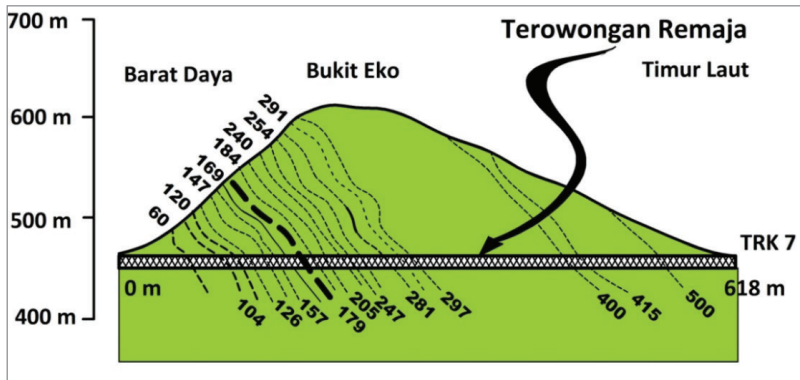
C. TEROWONGAN PERCOBAAN PENAMBANGAN URANIUM DI CEKUNGAN KALAN

Terowongan percobaan penambangan uranium di Cekungan Kalan berlokasi di Eko-Remaja, yaitu daerah di Sungai Remaja dan Bukit Eko, Kabupaten Melawi, Provinsi Kalimantan Barat. Terowongan percobaan penambangan uranium adalah terowongan eksplorasi yang dimanfaatkan untuk melakukan percobaan penambangan uranium dalam rangka penguasaan teknologi penambangan uranium.

1. MODEL CEBAKAN URANIUM EKO-REMAJA

Cebakan uranium di Eko-Remaja berupa urat-urat (jalur-jalur) mineralisasi uranium dengan ketebalan berkisar dari sentimetrik hingga desimetrik, mempunyai jurus berarah relatif barat-timur dan miring sekitar 70° ke utara. Jalur-jalur mineralisasi uranium terdapat dalam

suatu lapisan *favourable* yang tersusun oleh metalanau dan metapelit sekistosan. Lapisan *favourable* berarah N 50° E yang diapit oleh lapisan steril metapelit Jeronang. Mineral-mineral yang terkandung dalam cebakan bijih uranium adalah uraninit, autonit, branerit berasosiasi dengan mineral sulfida, dan oksida besi. Terdapat 19 jalur bijih dengan kadar uranium berkisar 0,03% hingga 0,39% dan tebal 0,2 meter hingga 1,39 meter (Gambar 3.10 dan Tabel 3.3).



Sumber: Modifikasi dari Wirakusumah (1988)

Gambar 3.10 Jalur-Jalur Mineralisasi Uranium di Terowongan Tambang Eko-Remaja

Tabel 3.3 Jalur-Jalur Mineralisasi Uranium di Terowongan Tambang Eko-Remaja

Nomor	Kode Jalur Bijih Uranium	Tebal (m)	Kadar Uranium (%)
1	BM 60	0,29	0,05
2	BM 104	0,31	0,05
3	BM 120	0,45	0,09
4	BM 126	0,37	0,09
5	BM 147	0,20	0,28
6	BM 157	0,82	0,23
7	BM 169	0,35	0,39
8	BM 179	1,39	0,17

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Nomor	Kode Jalur Biji Uranium	Tebal (m)	Kadar Uranium (%)
9	BM 184	0,64	0,26
10	BM 205	0,44	0,08
11	BM 240	0,57	0,09
12	BM 247	0,82	0,05
13	BM 254	0,53	0,04
14	BM 281	0,64	0,03
15	BM 291	0,70	0,05
16	BM 297	0,38	0,04
17	BM 400	0,70	0,04
18	BM 415	0,56	0,10
19	BM 500	0,35	0,08

Sumber: Wirakusumah dan Ngadenin (1997)

2. PEMBUATAN TEROWONGAN PERCOBAAN PENAMBANGAN URANIUM

Kegiatan persiapan penambangan uranium Eko-Remaja telah dimulai sebelum tahun 1977. CEA Prancis telah merencanakan penambangan model kombinasi antara tambang terbuka dan tambang bawah tanah. Kapasitas tambang bawah tanah direncanakan sebesar 50 ton uranium per tahun yang diperoleh dari 45.000 ton bijih. Rencana tersebut tidak terlaksanakan sampai CEA meninggalkan Indonesia. Pembuatan terowongan tambang akhirnya dibuat oleh BATAN. Tujuan utama pembuatan terowongan tambang adalah agar sumber daya manusia BATAN menguasai teknologi penambangan uranium sehingga apabila suatu saat diperoleh cadangan uranium berskala besar di Indonesia, sumber daya manusia BATAN secara mandiri siap dan mampu melakukan penambangan dan tidak tergantung kepada tenaga ahli asing. Teknologi penambangan uranium terdiri atas kegiatan pembongkaran, pemuatan, dan pengangkutan bijih uranium. Selain penguasaan teknologi penambangan, tujuan pembuatan terowongan

Buku ini tidak diperjualbelikan.



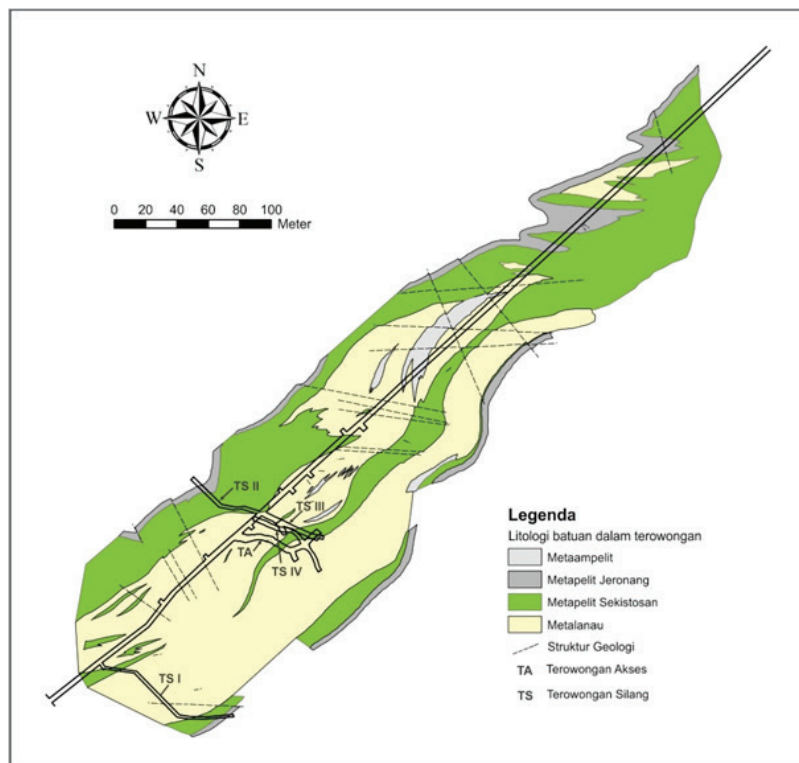
adalah sebagai sarana untuk melakukan pengeboran menggunakan mesin bor Long Year 65 dalam rangka perhitungan sumber daya uranium berkategori terukur.

Pekerjaan fisik pembuatan terowongan dimulai pada bulan Januari 1981 dengan titik awal terowongan adalah lokasi titik pengeboran ROC 601 nomor 64. Koordinat lokasi titik bor ROC 601 nomor 64 adalah $X = 1627,77$; $Y = 17516,815$; ketinggian 450 meter dari permukaan air laut (Sarimin dkk., 1997). Arah terowongan utama adalah $N 50^{\circ} E$ yang relatif tegak lurus terhadap arah jalur-jalur mineralisasi uranium, sedangkan arah terowongan silang dibuat mengikuti arah jalur mineralisasi uranium, yaitu berarah relatif barat-timur. Terowongan Eko-Remaja terdiri atas terowongan utama, terowongan silang I, terowongan silang II, terowongan silang III, terowongan silang IV, terowongan akses, dan sepuluh stasiun untuk pengeboran di dalam terowongan (Gambar 3.11).

Terowongan utama, terowongan silang I, terowongan silang II, terowongan silang III, dan sepuluh stasiun pengeboran dibuat selama kurang lebih enam tahun, dimulai pada Januari 1981 hingga Desember 1986. Terowongan utama menembus Bukit Eko pada ketinggian 450 meter. Panjang terowongan 618 m, lebar 3–4 m, dan tinggi 4–5 meter. Pembuatan terowongan utama dari 0 hingga 550 meter diawali dari depan terowongan, sedangkan 550 hingga 618 meter dibuat dari bagian belakang terowongan, yaitu di lokasi parit uji TRK 7. Pembuatan terowongan mengalami masa jeda selama empat tahun, yaitu pada 1987–1990. Terowongan akses dan terowongan silang IV dibuat selama kurang lebih tiga tahun, yaitu pada Agustus 1991 hingga pertengahan tahun 1994 (Sarimin dkk., 1997; Tim Penelitian Penambangan [TPP], 1993). Terowongan akses dibuat untuk mengambil bijih BM 179 yang terdapat pada ketinggian 460 m. Titik awal terowongan akses dibuat pada jarak 154 meter dari mulut terowongan utama. Panjang terowongan akses adalah 60 meter,

lebar 4–5 meter, dan tinggi 4–8 meter. Biji uranium yang berhasil ditambang selama kegiatan pembuatan terowongan adalah sebanyak 964 ton dengan kadar uranium berkisar antara 500 hingga 1.000 ppm (Roekmantara, 1978).

Metode penambangan yang diterapkan pada pembuatan terowongan Eko-Remaja adalah dengan metode *cut and fill* (Sarimin dkk., 1997; TPP, 1993) dengan tahapan yang terdiri atas pembongkaran, pemuatan, dan pengangkutan.



Sumber: Modifikasi dari Karyono (1989)

Gambar 3.11 Peta Situasi Terowongan Tambang Uranium Eko-Remaja

a. Pembongkaran

Kegiatan pembongkaran terdiri atas penentuan pola lubang tembak, pembuatan lubang tembak, pengisian bahan peledak, dan peledakan. Pola lubang tembak akan menentukan hasil bongkaran. Penentuan pola lubang tembak tergantung pada kondisi bijih uranium yang akan diambil. Terdapat lima pola lubang tembak yaitu tunggal, piramida, paralel, berselang, dan *V-Cut*. Pola yang pernah digunakan pada pembongkaran bijih uranium di terowongan Eko-Remaja adalah pola tunggal, paralel, dan berselang. Untuk bijih tipis (20 cm) digunakan pola tunggal, untuk bijih tebal (> 1 m) digunakan pola paralel, dan pada batuan steril atau batuan tidak terdapat bijih uranium digunakan pola berselang. Setelah pola lubang tembak ditentukan tahap selanjutnya adalah pembuatan lubang tembak yang akan diisi dengan bahan peledak (Gambar 3.12).

Pembuatan lubang tembak dilakukan dengan cara melakukan pengeboran pada bijih uranium yang akan dibongkar. Alat bor yang pernah digunakan untuk pembuatan lubang tembak adalah alat bor Cobra, Jack Hammer RH 656, Toyo TY-2YLD, Furukawa, dan Mounthabert (Sarimin dkk., 1997; TPP, 1993). Sebagai penggerak mesin bor adalah udara yang diperoleh dari mesin kompresor. Mesin kompresor yang digunakan adalah merek Atlas Copco tipe XA 160 D d/112 HP (82 KW) lengkap dengan *air reservoir*. Setelah lubang tembak dibuat sesuai dengan pola yang dikehendaki, kemudian dilakukan pengisian bahan peledak, yang terdiri atas dinamit yang diisi detonator dan ANFO (94,5% amonium nitrat + 5,5% solar/*fuel oil*), berikutnya ditutup dengan *stemming* dan selanjutnya detonator dirangkai (Gambar 3.13). Cara lain untuk pengisian bahan peledak adalah menggunakan bahan peledak yang terdiri atas dinamit saja yang ditutupi dengan *stemming*. Setelah pengisian bahan peledak selesai, tahap selanjutnya adalah peledakan.

Peledakan di tambang uranium Eko-Remaja dilakukan pada batuan atau bijih yang keras dan kompak, sedangkan pada batuan atau bijih yang lapuk tidak dilakukan peledakan. Sebelum melakukan peledakan, terlebih dahulu rangkaian bahan peledak dicek dengan



Foto: Dokumentasi PTBGN (1984)

Gambar 3.12 Pembuatan Lubang Tembak



Foto: Dokumentasi PTBGN (1984)

Gambar 3.13 Pengisian Bahan Peledak pada Lubang Tembak

galvanometer. Setelah kondisinya bagus kemudian diledakkan dengan bantuan alat *blasting machine (exploder)*. Untuk pengambilan bijih pada batuan yang lapuk, cukup dilakukan dengan cara manual menggunakan cangkul dan sekop. Pada tahun 1981 hingga tahun 1986 pada saat pembuatan terowongan utama dan terowongan silang, peledakan yang dilakukan menggunakan bahan peledak dinamit yang diisi detonator. Setiap lubang ledak diisi tiga dinamit dan satu detonator. Mulai pertengahan 1991, pada saat pembuatan terowongan akses peledakan, yang digunakan adalah peledakan yang menggunakan ANFO dengan dinamit yang diisi detonator (Sarimin dkk., 1997; TPP, 1993).

Peralatan yang digunakan dalam melaksanakan peledakan terdiri atas mesin peledak tipe CI-15 VA buatan Swedia, pengukur arus peledakan (galvanometer) buatan Swedia, kabel peledak (*legwire* dan *mainwire*), dan penyumbat lubang ledak (*stemming*). Bahan peledak yang digunakan terdiri atas dinamit buatan Dahana jenis Damotin yang mempunyai ukuran panjang 200 mm dan diameter 30 mm,

detonator (detonator listrik *millisecond*) mempunyai tahanan 1,5 ohm, dinamit ditambah ANFO (campuran 94,5% amonium nitrat dan 5,5% *fuel oil*) yang mempunyai panjang kantong 80 cm, diameter 3,5 cm, dan berat 0,55 gram.

b. Pemuatan

Pemuatan adalah pekerjaan memuat hasil bongkaran bijih ke dalam alat angkut. Bongkaran hasil peledakan bijih uranium dimasukkan ke lori dengan cara manual menggunakan cangkul, sekop, dan pengki. Bijih dalam lori selanjutnya diangkut ke luar terowongan (Gambar 3.14) dan dituang di depan mulut terowongan kemudian diangkut ke *stock pile* tambang menggunakan *Load Haulage Dump* (LHD) (Gambar 3.15). Pemuatan bijih di *stock pile* tambang ke *dump truck* yang akan diangkut ke lokasi pengolahan menggunakan alat muat LHD.

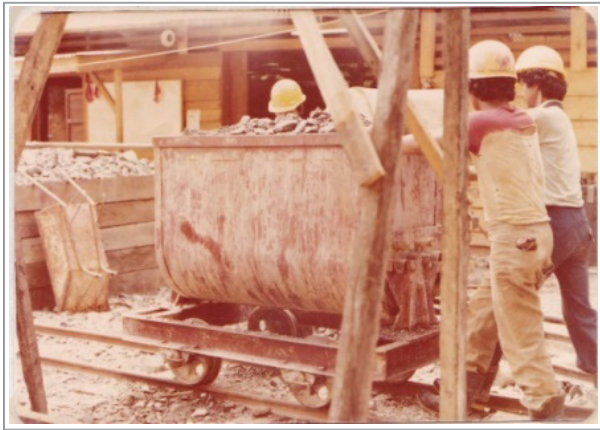


Foto: Dokumentasi PTBGN (1982)

Gambar 3.14 Pengangkutan Bijih Uranium Menggunakan Lori



Foto: Dokumentasi PTBGN (1983)

Gambar 3.15 Alat Muat Bijih Load Haulage Dump (LHD)

c. Pengangkutan

Pekerjaan pengangkutan yang dilakukan adalah mengangkut hasil bongkaran bijih uranium dari dalam terowongan ke *stock pile* tambang dan dari *stock pile* tambang di Remaja (Gambar 3.16) ke *stock pile* pengolahan di Lemajung. Batuan dan/atau bijih hasil bongkaran di dalam terowongan diangkut ke luar terowongan menggunakan lori, kemudian dilanjutkan diangkut ke *stock pile* tambang menggunakan LHD. Dari *stock pile* tambang ke lokasi *stock pile* pengolahan diangkut menggunakan *dump truck*.



Foto: Dokumentasi PTBGN (1983)

Gambar 3.16 *Stock Pile* Bijih Uranium di Lokasi Tambang Remaja

Pelaksanaan pengangkutan yang pernah dilakukan di Eko-Remaja adalah sebagai berikut: Januari–April 1981, semua kegiatan pengangkutan dilakukan dengan tenaga manusia; Mei 1981 sampai Maret 1982, pengangkutan menggunakan lori dengan rel terbuat dari kayu; dan mulai bulan April 1982, pengangkutan menggunakan lori dengan rel yang terbuat dari besi. Pada tahun 1983, semua kegiatan pengangkutan dilakukan menggunakan LHD. Pengangkutan dari *stock pile* di Remaja ke lokasi pengolahan Lemajung menggunakan *dump truck*. Pada saat pembuatan terowongan Eko-Remaja, selain kegiatan utama, terdapat beberapa kegiatan penunjang, yaitu pembuatan ventilasi, penyanggaan terowongan, dan drainase (penirisan). Ventilasi di terowongan Eko-Remaja ditujukan untuk mengurangi konsentrasi gas radon dan gas beracun, menyuplai udara bersih, menyingkirkan debu-debu, menurunkan atau menormalkan suhu dan kelembaban udara di dalam terowongan, serta untuk mengencerkan konsentrasi gas CO_2 , NO_2 , SO_2 , dan AS_2O_3 . Sistem ventilasi yang digunakan adalah dengan menggunakan *blower* dan *exhaust fan* yang disalurkan lewat *plastic blower* (Gambar 3.17).



Foto: Dokumentasi PTBGN (1986)

Gambar 3.17 Sistem Ventilasi Terowongan Eko-Remaja



Foto: Dokumentasi PTBGN (1985)

Gambar 3.18 Terowongan tanpa penyangga



Foto: Dokumentasi PTBGN (1992)

Gambar 3.19 Terowongan dengan penyangga

Kegiatan penyanggaan meliputi kegiatan pengadaan kayu penyangga, pembuatan kayu penyangga, dan pemasangan kayu penyangga. Pembuatan kayu penyangga dilakukan di luar terowongan, kemudian dipasang pada lokasi yang telah ditentukan di dalam terowongan. Kondisi batuan di terowongan Eko-Remaja ada yang masih segar dan ada yang lapuk. Pada batuan yang masih segar tidak diperlukan penyangga (Gambar 3.18), sedangkan pada batuan yang lapuk diperlukan penyangga yang terbuat dari kayu (Gambar 3.19).



Foto: Dokumentasi PTBGN (2008)

Gambar 3.20 Drainase Terowongan Eko-Remaja

Penirisan atau drainase adalah kegiatan untuk mengatasi masalah air yang timbul di dalam terowongan dengan cara membuat saluran air dari dalam terowongan keluar terowongan dengan kemiringan drainase menurun $\pm 3^\circ$ ke arah luar terowongan sehingga air di dalam terowongan dapat mengalir dengan lancar ke arah luar terowongan (Gambar 3.20).

d. Proteksi Radiasi

Proteksi radiasi pada kegiatan percobaan penambangan uranium di Eko-Remaja, Kalan, Kalimantan Barat, dilakukan dengan cara pengukuran konsentrasi gas radon dan dosis radiasi di dalam terowongan tambang. Pengukuran dilakukan oleh petugas proteksi radiasi. Pengukuran dilaksanakan sebelum pekerja tambang masuk ke dalam terowongan untuk melakukan kegiatan penambangan. Setelah konsentrasi gas radon dan dosis radiasi di dalam terowongan dalam kondisi normal, yaitu sesuai dengan peraturan yang ada di mana konsentrasi gas radon <300 pCi/liter dan dosis radiasi <50

$\mu\text{Sv}/\text{jam}$ (Roekmantara, 1978; Santosadjaja, 1987), para pekerja tambang diperbolehkan masuk terowongan untuk melakukan kegiatan penambangan. Apabila konsentrasi gas radon di dalam terowongan masih tinggi, disuplai udara bersih dari luar terowongan menggunakan blower udara sampai konsentrasi gas radon dalam terowongan menjadi normal. Alat yang digunakan untuk mengukur dosis radiasi adalah SPP 2NF, sedangkan untuk mengukur konsentrasi gas radon menggunakan alat detektor SAC R 5 Eberline. Para pekerja tambang dilengkapi dengan alat proteksi diri yang terdiri atas *TLD badge*, *safety shoes*, *safety helmet*, baju kerja (*wearpack*), sarung tangan, *safety lamp* (senter), dan masker.

D. PERCOBAAN PENGOLAHAN BIJIH URANIUM EKO-REMAJA

Percobaan pengolahan bijih uranium Eko-Remaja diawali dengan pengolahan skala laboratorium kemudian ditingkatkan ke skala teknik (pilot). Skala laboratorium dilaksanakan di Laboratorium Teknologi Pengolahan Bahan Galian Nuklir Jakarta, sedangkan skala pilot dilakukan di Lemajung, Kalan, Kalimantan Barat.

1. PENGOLAHAN SKALA LABORATORIUM

Pengolahan bijih uranium Eko-Remaja sudah direncanakan pada saat CEA Prancis melakukan eksplorasi uranium di Kalimantan. Oleh karena CEA Prancis tidak jadi melaksanakan penambangan dan pengolahan uranium, kegiatan penambangan dan pengolahan dilakukan oleh BATAN. CEA mengelompokkan bijih uranium Kalan menjadi 5 tipe bijih (CEA-BATAN, 1977) sebagai berikut.

- 1) Bijih tipe I (kadar $U = 2,69\%$), mengandung uraninit, pirit, molibdenit, arsenik Fe, Ni, dan Co, sebagai contoh bijih *Filon Varlet* di Jeronang Hulu.
- 2) Bijih tipe II (kadar $U = 0,138\%$), mengandung uraninit, magnetit, sedikit pirit, molibdenit, sebagai contoh bijih pada parit uji TR4 (*stock work*) di Lemajung Barat.



- 3) Bijih tipe III (kadar U = 2,28%), mengandung uraninit, monasit, molibdenit, ilmenorutil, sebagai contoh bijih Rirang.
- 4) Bijih IV (kadar U = 0,6 %) mengandung uraninit, pirit, dan pirhotit
- 5) Bijih tipe V (kadar U = 0,648%), mengandung uraninit dan prihotit (Fe dan S tinggi), sebagai contoh bijih pada parit uji TRK 12 di Eko-Remaja.

Berdasarkan kelima tipe bijih tersebut, CEA telah berhasil melakukan separasi bijih secara fisik dengan metode *gravity*, *magnetic*, dan flotasi di laboratorium dengan *recovery* total lebih dari 97%.

Di awal kegiatan pada tahun 1972, penelitian pengolahan bijih uranium skala laboratorium menggunakan bijih uranium yang berasal dari Prancis. Penelitian dilaksanakan di Laboratorium Pengolahan Bahan-Bahan dan Geologi yang secara struktural di bawah unit eselon dua Pusat Penelitian Pasar Jumat yang saat ini bernama Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi (PAIR). Pada restrukturisasi akhir tahun 1974, Laboratorium Bahan-Bahan dan Geologi berpisah dari Pusat Penelitian Pasar Jumat dan bergabung dengan Direktorat Survey Geologi (DSG), BATAN. Mulai tahun 1975, pengolahan bijih uranium dilakukan oleh DSG. Bijih uranium Kalan, yang oleh CEA dikelompokkan menjadi lima tipe, oleh DSG disederhanakan menjadi dua tipe, yaitu bijih uranium tipe monasit yang terdapat di Rirang dan Tanah Merah, dan bijih uranium tipe turmalin yang terdapat di Eko-Remaja dan daerah lain di luar Rirang dan Tanah Merah. Kedua jenis bijih dibedakan karena perbedaan komposisi mineralnya yang cukup mencolok sehingga memerlukan proses pengolahan yang berbeda.

Percobaan pengolahan bijih uranium Eko-Remaja menjadi konsentrat uranium meliputi dua tahap utama, yaitu preparasi bijih uranium secara fisik dan hidrologi bijih uranium.

1) Preparasi bijih uranium secara fisik (Gambar 3.21)



Keterangan: (a) Penggilingan bijih dengan alat ball/rod mill; (b) Peningkatan kadar bijih uranium dengan alat magnetic separator (kanan) dan flotasi (kiri)

Foto: Dokumentasi PTBGN (1984)

Gambar 3.21 Preparasi Bijih Uranium

2) Hidrometalurgi Bijih Uranium (Gambar 3.22)



Keterangan: (a) Pencuplikan sampel dengan alat *sample divider*; (b) Pelindian bijih uranium; (c) Pengendapan uranium; dan (d) Pemisahan padat cair dengan *vacuum filter*

Foto: Dokumentasi PTBGN (1984)

Gambar 3.22 Hidrometalurgi Bijih Uranium Skala Laboratorium

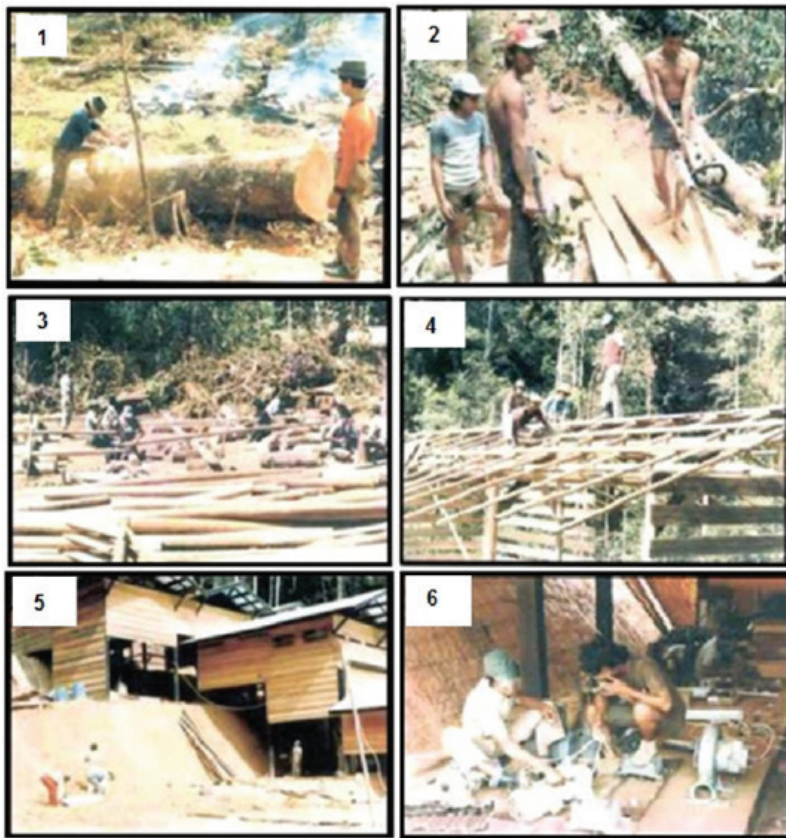
Hidrometalurgi bijih uranium merupakan proses kimia yang meliputi pelindian, pemisahan padat-cair, pemurnian, dan pengendapan. Uranium dipisahkan dari bijihnya menggunakan metode asam, kemudian dilanjutkan dengan proses pemisahan padat-cair. Larutan hasil pelindian banyak mengandung ion-ion dengan kadar uranium rendah dan volume yang besar sehingga perlu dimurnikan dan dipekatkan untuk mendapatkan konsentrat uranium dengan kualitas tinggi. Metode pemurnian yang digunakan adalah resin penukar ion. Larutan kaya uranium yang dihasilkan diendapkan dengan reagen pengendap basa. Pengendapan dilakukan dua tingkat, pertama untuk mengendapkan besi dan kedua untuk mengendapkan uranium. Dari proses pengolahan skala laboratorium ini diperoleh *recovery* pelindian 90%, pemurnian 98%, pengendapan 99%, dan *recovery* total sebesar 86,44% dengan kadar uranium 70%.

2. PERCOBAAN PENGOLAHAN SKALA PILOT

Kegiatan persiapan pengolahan uranium skala pilot atau lebih dikenal sebagai pengolahan uranium skala teknik telah dimulai pada tahun anggaran 1979/1980 ditandai dengan pembangunan Gedung *Pilot Plant* (Gedung No. 54) di dalam kompleks Pusat Eksplorasi dan Pengolahan Bahan Nuklir (PEPBN) yang sebelumnya bernama DSG di Pasar Jumat, Jakarta. Peralatan yang digunakan selain *jaw crusher* adalah rakitan lokal staf PEPBN seperti tangki pelindian, dekantasi, kolom resin, dan tangki pengendapan. Pengadaan sarana pengolahan uranium skala pilot dirancang dengan kapasitas olah sebesar 25 kg bijih uranium per jam.

Mengingat kesulitan transportasi bijih dari Kalan, Kalimantan Barat, ke Pasar Jumat, Jakarta, dan sebagai persiapan peningkatan kapasitas serta mengurangi pencemaran lingkungan di Pusat Penelitian Tenaga Atom (PPTA) Pasar Jumat, pada tahun anggaran 1980/1981 dilakukan pemindahan pengolahan bijih uranium skala teknik (pilot) dari Jakarta ke Kalan, Kalimantan Barat, guna mendekati lokasi penambangan bijih. Lokasi yang dipilih adalah di daerah sekitar Sungai Lemajung karena lokasi ini tidak jauh dari lokasi penambang-

an bijih sehingga memudahkan pengangkutan bijih dan tersedia air untuk proses pengolahan (Gambar 3.23). Fasilitas pengolahan berada pada lahan seluas 3.000 m² dengan kemiringan lereng agak terjal guna mempermudah transportasi larutan secara gravitasi (Gambar 3.24).



Keterangan: (1-6) Urutan proses pembangunan

Foto: Dokumentasi PTBGN (1982)

Gambar 3.23 Pembangunan Pilot Plant Pengolahan Uranium di Lemajung

Buku ini tidak diperjualbelikan.





Foto: Dokumentasi PTBGN (1984)

Gambar 3.24 Kompleks Laboratorium Percobaan Pengolahan Uranium Skala Pilot di Lemajung

Pembangunan *pilot plant* dimulai pada 19 Agustus 1981, diawali dengan pembukaan jalan dan pengecoran lantai. *Pilot plant* pengolahan ini beratapkan seng dan ber dinding kayu. Air untuk proses dan kebutuhan sehari-hari dipenuhi dari sumber air yang terletak di sebelah selatan *pilot plant*. Posisi sumber air lebih tinggi 40 meter dengan bangunan *pilot plant*. Sistem instalasi air dirancang dan disesuaikan dengan beberapa kemungkinan yang dapat terjadi, antara lain musim kemarau panjang dan penghujan. Instalasi pipa dipasang dengan kombinasi beberapa ukuran pipa galvanis. Debit air sampai ruang pelindian dalam keadaan normal adalah 15 liter/menit, dengan kualitas air jernih dan tidak berbau. Kesadahan air rendah dan pH sekitar 6. Kebutuhan energi listrik untuk daya dan penerangan dipenuhi oleh dua buah generator Deutz dengan kapasitas masing-masing 100 kVA yang beroperasi secara bergiliran masing-masing selama 12 jam (Affandi dkk., 2000).

Rencana kapasitas olah sebesar 30 kg bijih per jam atau 720 ton bijih per tahun atau setara dengan sekitar 517 kg *yellow cake* per tahun. Proses pengolahan dijalankan secara semikontinu dengan diagram alir proses (*flowsheet*) pada Gambar 3.25.



Sumber: Affandi dkk. (2000)

Gambar 3.25 Diagram Alir Proses Pengolahan Bijih Uranium Eko-Remaja

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Kegiatan percobaan pengolahan uranium skala pilot di Lemajung (Gambar 3.26) dilaksanakan selama 10 tahun (1980–1985, 1990, 1992–1993, dan 1996) menghasilkan *yellow cake* sebanyak 740,5 kg terdiri atas MgU_2O_7 sebanyak 200,8 kg dan $(NH_4)_2U_2O_7$ (ADU/amonium diuranat) sebanyak 539,7 kg (Tabel 3.4) (Affandi dkk., 2000). Peralatan analisis kontrol yang terdiri atas alat pembakar contoh untuk analisis uranium dan alat analisis kadar uranium (*fluorimetri*) ditunjukkan oleh Gambar 3.27.



Keterangan: (a) Tumpukan bijih uranium Eko-Remaja sebelum diproses; (b) Proses pelindian; (c) Tangki pelindian; (d) Proses pemurnian dengan resin penukar ion

Foto: Dokumentasi PTBGN (1986)

Gambar 3.26 Proses Pengolahan Bijih Uranium Eko-Remaja di Lemajung, Kalan, Kalimantan Barat

Tabel 3.4 Kegiatan Proses Percobaan Pengolahan Bijih Uranium di Pilot Plant Lemajung

Tahun Anggaran	Target Olah (ton)	Realisasi (ton)	Asal bijih	Kadar U bijih (ppm)	Konsentrat Dihasilkan (kg)	Kadar U Yellow Cake (%)	Recovery
1980/1981	25	25	TRK 7, 13, Eko Remaja	600–800	31	45	60
1981/1982	175	175	TRK 7, 13, Eko Remaja	600–800	169,8	58	60
1982/1983	350	150	TRK 7, 13, Eko Remaja	600–800	233	60	65
1983/1984	100	100	TRK 7, 13, Eko Remaja	500–800	57,5	60	65
1984/1985	50	50	Eko-Remaja	800–900	47	60	70
1985/1986	50	50	Eko-Remaja	800–900	44	68	72
1990/1991	100	60	BM 179, TS II dan IV	1.000	46	65	72
1992/1993	100	25	BM 179, TS II dan IV	1.000	24,5	72	75
1993/1994	100	65	BM 179, TS II dan IV	1.000	68	66	75
1996/1997	24	24	BM 179, TS II dan IV	1.000	20	65	85
Jumlah	1.074	964			740,5		

Keterangan: BM: Bidang Mineralisasi (Jalur Mineralisasi)

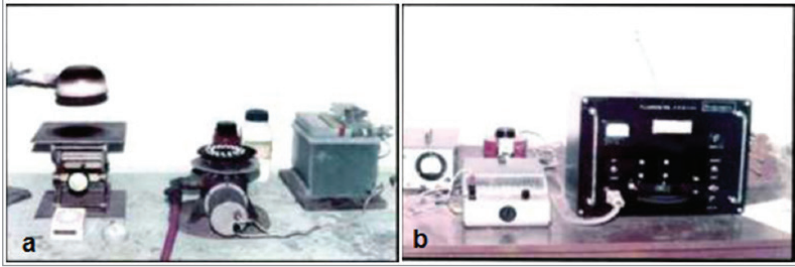
TS: Terowongan Silang

Produk konsentrat U tahun 1981 dan 1982 berbentuk MgU_2O_7

Produk konsentrat U tahun 1983–1997 berbentuk $(NH_4)_2U_2O_7$

Sumber: Affandi dkk. (2000)





Keterangan: (a) Alat pembakar contoh untuk analisis uranium; (b) Alat analisis kadar uranium (fluorimetri)

Foto: Dokumentasi PTBGN (1992)

Gambar 3.27 Peralatan Analisis Kontrol

Dengan telah selesainya percobaan pengolahan bijih uranium Eko-Remaja skala pilot, sejak tahun anggaran 1994/1995, pengolahan bijih uranium dialihkan pada proses pengolahan bijih uranium tipe monasit yang berasal dari Rirang dan Tanah Merah, Kalan, Kalimantan Barat. Bijih uranium Rirang mengandung unsur logam tanah jarang (LTJ) dan fosfat cukup besar, yaitu 80–90% dalam bentuk mineral monasit dan xenotim. Pengolahan bijih uranium tipe monasit asal Rirang skala laboratorium dilaksanakan pada tahun 2000 (Arief dkk., 2000). Pada tahun 2001, teknologi pengolahan monasit asal Rirang skala laboratorium dimodifikasi dan diaplikasikan untuk pengolahan bijih monasit asal Bangka (Hafni dkk., 2000) dan pada 2014 ditingkatkan ke skala pilot.

E. MENANGANI LIMBAH EKSTRAKSI URANIUM

Proses ekstraksi uranium akan menghasilkan limbah cair yang memungkinkan masih mengandung uranium tergantung dari persentase *recovery* dari proses ekstraksi. Apabila *recovery* dari proses ekstraksi memiliki persentase yang kecil, kandungan uranium yang tertinggal pada limbah cair akan memiliki jumlah yang besar dan begitu juga sebaliknya. Terdapatnya unsur uranium pada limbah cair dapat mengakibatkan limbah cair yang dihasilkan memiliki sifat radioaktif akibat paparan radiasi yang dipancarkan oleh unsur tersebut. Dengan demikian, limbah cair dari hasil proses ekstraksi perlu dilakukan

pengolahan guna menyisahkan unsur uranium pada limbah cair sehingga diharapkan limbah cair tidak bersifat radioaktif dan aman untuk lingkungan.

Proses pengolahan limbah cair dari proses ekstraksi uranium terdiri atas beberapa tahap pengolahan. Tahap pengolahan pertama ialah proses pengendapan/sedimentasi di mana limbah cair yang dihasilkan dari proses ekstraksi uranium ditampung pada kolam pengendapan. Pada proses ini, padatan yang tersuspensi, koloid, ataupun partikel lainnya yang memiliki massa jenis besar akan mengendap dengan adanya gravitasi (waktu mengendap berbeda-beda tergantung dari massa jenis partikel dalam limbah cair) sehingga memungkinkan unsur uranium yang dalam bentuk partikel tersuspensi ataupun koloid dapat disisahkan pada tahap ini.

Tahap pengolahan selanjutnya atau tahap kedua ialah proses pengaturan pH (tingkat keasaman) dari limbah cair. Pengaturan pH yang dilakukan sesuai dengan pH optimal dalam proses koagulasi-flokulasi, yaitu pH 6,5 (diperoleh dari hasil penelitian di laboratorium). Pengaturan pH menggunakan asam klorida (HCl) untuk menurunkan pH dan natrium hidroksida (NaOH) untuk meningkatkan pH. Tahap pengolahan ketiga ialah proses koagulasi-flokulasi di mana pada tahap ini pengolahan limbah cair menggunakan bahan kimia berupa koagulan dan flokulan serta pengadukan yang cepat. Jenis dan dosis optimal pada koagulan serta flokulan yang digunakan diperoleh dari hasil penelitian di laboratorium. Aluminium sulfat atau alum menjadi jenis koagulan optimal dalam pengolahan limbah cair ini. Pada proses koagulasi terjadi proses destabilisasi partikel di mana kestabilan dari partikel yang terdapat pada limbah cair dihilangkan dan kemudian terjadi gaya *brownian motion* atau gaya tarik-menarik antarpartikel sehingga membentuk mikroflok atau agregat atau partikulat. Proses selanjutnya ialah flokulasi dengan penambahan flokulan di mana menggunakan bahan polimer non-ionik sehingga saling terjadi penggabungan antarmikroflok membentuk makroflok atau partikel yang berukuran besar dan memiliki massa jenis yang besar.



Setelah proses koagulasi, limbah cair masuk ke tahap pengolahan selanjutnya, yaitu proses pengendapan pada tangki pengendapan (*settling tank*). Pada tahap ini, gumpalan atau flok-flok yang terbentuk kemudian mengendap pada dasar tangki secara gravitasi dan pada tahap ini terjadi penyisihan yang besar pada unsur uranium dalam limbah cair. Filtrat dari proses koagulasi-flokulasi kemudian masuk ke tahap selanjutnya, yaitu proses filtrasi menggunakan kertas filter dengan bantuan pompa vakum untuk memisahkan dan menyaring flok yang memiliki massa jenis ringan atau masih melayang di permukaan limbah cair. Tahap pengolahan akhir atau keenam menggunakan resin penukar ion (*ion exchanger*) yang terdiri atas resin penukar kation dan resin penukar anion. Pada proses penukar ion ini, unsur uranium yang masih terlarut di dalam limbah cair ditukar dengan ion-ion yang terdapat pada resin sehingga limbah cair proses ekstraksi uranium telah bebas dari radioaktif dan aman dilepas ke lingkungan.

BAB 4

RISET EKSTRAKSI MONASIT DI INDONESIA

A. MENGENAL MONASIT

Monasit adalah salah satu mineral radioaktif dengan rumus kimiawi (Ce, La, Nd, Th) (PO₄, SiO₄). Warnanya bervariasi, yaitu coklat kemerahan, coklat, kuning muda, merah muda, hijau, dan abu-abu. Bentuk kristalnya monoklin dengan kekerasan 5–5,5 skala mohs. Kandungan logam tanah jarang (LTJ) dan thorium dalam monasit cukup tinggi sehingga monasit merupakan mineral yang bernilai ekonomis dan strategis. LTJ digunakan sebagai komponen dalam perangkat teknologi tinggi, termasuk ponsel pintar, kamera digital, *hard disk* komputer, lampu neon, *light-emitting-diode* (LED), televisi layar datar, dan monitor komputer (Duta dkk., 2016). Dalam jumlah besar, beberapa LTJ digunakan dalam energi bersih dan teknologi pertahanan. Thorium merupakan bahan bakar nuklir masa depan sebagai pengganti uranium. Secara geologi, monasit terbentuk pada batuan beku asam–menengah, seperti granit dan pegmatit, atau batuan malihan derajat sedang–tinggi, seperti sekis dan genes. Secara umum, monasit yang ekonomis ditemukan dalam kumpulan mineral berat sebagai cebakan plaser sungai, delta, atau pantai.

Di Indonesia, jalur prospek monasit terdapat pada zona granit jalur timah yang membentang dari Kepulauan Riau–Bangka Belitung–Kalimantan Barat–Kalimantan Tengah (Tjokrokardono dkk., 2002) (Gambar 4.1). Monasit di jalur timah terkenal dengan nama monasit Bangka merupakan mineral ikutan dari tambang timah. Di dalam cebakan timah sekunder, monasit terdapat bersama-sama kasiterit, zirkon, ilmenit, rutil, dan magnetit sebagai pasir timah. Batuan sumber dari monasit Bangka adalah batuan granitik yang berumur Permo-Karbon. Kadar uraniumnya sekitar 3.000 ppm dan thorium 30.000 ppm. Berbeda dengan di Bangka, monasit Rirang berukuran bongkah-bongkah merupakan cebakan kolumial dengan kadar uranium 5.225–20.596 ppm dan kadar thorium 240 ppm (Busch dkk., 1986). Kadar thorium yang rendah mengindikasikan bahwa monasit Rirang terbentuk oleh proses epitermal yang diperkirakan berhubungan dengan magmatisme granitik berumur Kapur.



Sumber: Tjokrokardono dkk. (2002)

Gambar 4.1 Peta Jalur Prospek Monasit di Indonesia

Buku ini tidak diperjualbelikan.

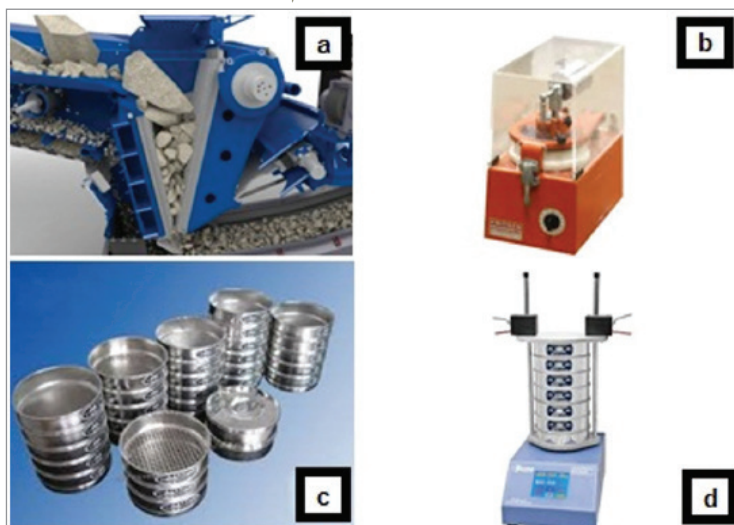
B. EKSTRAKSI MONASIT RIRANG

Proses pengolahan monasit Rirang bertujuan terutama untuk mendapatkan uranium yang terkandung di dalamnya. Pengolahan dilakukan melalui proses pemisahan dan pemurnian secara bertahap. Proses pemisahan dilakukan dengan beberapa cara, di antaranya secara asam dan secara basa, sedangkan metode pemurnian yang dapat digunakan, yaitu pengendapan bertingkat, dan ekstraksi pelarut (Arief dkk., 1998). Pengolahan monasit Rirang dilakukan di laboratorium melalui beberapa tahap proses, yaitu preparasi bijih, dekomposisi, pemisahan, dan pemurnian (Affandi dkk., 2002).

1. PREPARASI BIJIH

Preparasi bijih merupakan tahap awal dari proses pengolahan monasit Rirang. Tahapan preparasi bijih meliputi:

- 1) Pemilihan sampel (*sorting*) yang bertujuan untuk memisahkan bagian-bagian yang tidak diinginkan.
- 2) Pemecahan dan penggerusan (*crushing* dan *grinding*) bertujuan untuk memperkecil ukuran bahan sehingga diperoleh ukuran yang sesuai dengan maksud dan tujuan pengolahan. *Crushing* dilakukan secara bertahap menggunakan *jaw crusher* (Gambar 4.2a) dan *dish mill*, sedangkan *grinding* dilakukan dengan *mortar grinder* (Gambar 4.2b), dan *ball mill/rod mill*.
- 3) Pengayakan (*sizing*) bertujuan untuk memperoleh ukuran butir yang sesuai. Sampel butiran dimasukkan ke ayakan (Gambar 4.2c) dengan berbagai ukuran yang kemudian disusun pada *shaker* (Gambar 4.2d) untuk mengayak. Bahan yang lolos ayakan pada ukuran tertentu, misal lolos 325 mesh berarti memiliki ukuran butir lolos 325 mesh. Makin besar skala ukuran mesh maka makin kecil/halus ukuran butir suatu bahan.



Keterangan: (a) *Jaw crusher*; (b) *Mortar grinder*; (c) Ayakan; (d) *Shaker*

Foto: Dokumentasi PTBGN (1996)

Gambar 4.2 Peralatan Preparasi Bijih

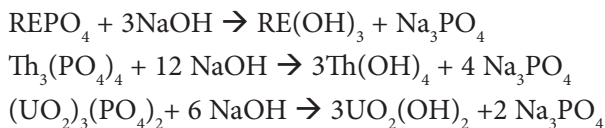
- 4) Pencampuran (*mixing*) merupakan suatu kegiatan yang bertujuan untuk mendapatkan kehomogenan dari bahan yang telah digerus.
- 5) Pengambilan contoh (*sampling*) adalah proses pengambilan sebagian kecil bahan dari suatu massa yang besar dan cukup representatif secara merata.

Proses preparasi monasit Rirang bertujuan untuk memperoleh monasit dengan ukuran butir lolos 325, 200, dan 100 mesh. Ukuran butir monasit Rirang adalah 4–8 mesh akan digerus sampai ukuran lolos 325, 200, dan 100 mesh.

2. DEKOMPOSISI/DIGESTI

Reaksi dekomposisi adalah jenis reaksi kimia di mana senyawa tunggal terurai menjadi dua atau lebih unsur atau senyawa baru. Reaksi ini memerlukan energi seperti panas, cahaya, atau listrik untuk memecah ikatan senyawa. Dekomposisi pada proses pengolahan monasit Rirang adalah proses pemisahan unsur fosfat dari monasit. Monasit Rirang

mengandung 24,55% fosfat yang harus dipisahkan dari unsur-unsur lain dalam monasit (Arief dkk., 1998). Dekomposisi pada pengolahan monasit Rirang dilakukan secara basa menggunakan NaOH. Reaksi yang terjadi adalah (Affandi dkk., 2002):



Pada proses ini, fosfat yang terikat pada monasit Rirang akan terpisah dari unsur-unsur lainnya membentuk larutan fosfat yang akan mengkristal pada suhu kamar. Fosfat yang telah terpisah ini dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku industri pupuk. Endapan yang dihasilkan pada proses dekomposisi mengandung uranium, thorium, dan logam tanah jarang (LTJ) yang bebas fosfat. Proses dekomposisi telah dilakukan di laboratorium sejak tahun 1980-an, baik dengan skala laboratorium maupun skala 3 kg monasit. Setelah fosfat terpisah dari monasit Rirang, perlu dilanjutkan tahap berikutnya untuk memisahkan uranium, thorium, dan logam tanah jarang.

3. PEMISAHAN UNSUR RADIOAKTIF DAN UNSUR LOGAM TANAH JARANG

Tahapan selanjutnya dari proses pengolahan monasit Rirang adalah proses pemisahan unsur radioaktif (uranium dan thorium) dari unsur logam tanah jarang. Proses pemisahan dilakukan melalui dua tahap proses, yaitu pelarutan total secara asam dan pengendapan secara basa (Arief dkk., 2000). Endapan hasil dekomposisi yang mengandung uranium, thorium, dan LTJ dilarutkan secara asam menggunakan asam klorida (HCl). Pada proses ini dihasilkan larutan klorida yang kaya akan logam tanah jarang, uranium, dan thorium.

Larutan klorida yang dihasilkan selanjutnya diendapkan secara basa dengan ammonia (NH_4OH). Tujuan proses ini adalah untuk memisahkan uranium, thorium, dan LTJ. Pada kondisi tertentu, uranium dan thorium akan mengendap, sedangkan LTJ terlarut (Arief

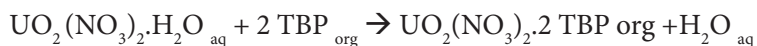
dkk., 2000) sehingga pada proses ini, unsur radioaktif (uranium dan thorium) dan unsur logam tanah jarang (LTJ) akan terpisah. Akan tetapi, dalam endapan yang mengandung uranium dan thorium, masih terdapat LTJ yang tidak terlarut. Oleh sebab itu, diperlukan tahap selanjutnya agar diperoleh uranium murni.

4. PEMURNIAN

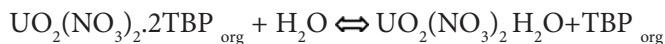
Pemurnian dilakukan melalui metode ekstraksi menggunakan pelarut (*solvent extraction*). Metode ekstraksi pelarut adalah proses pemisahan suatu zat yang berdasarkan pertukaran antara dua zat pelarut yang tidak saling campur. Proses pemisahan meliputi tahap ekstraksi dan *stripping*.

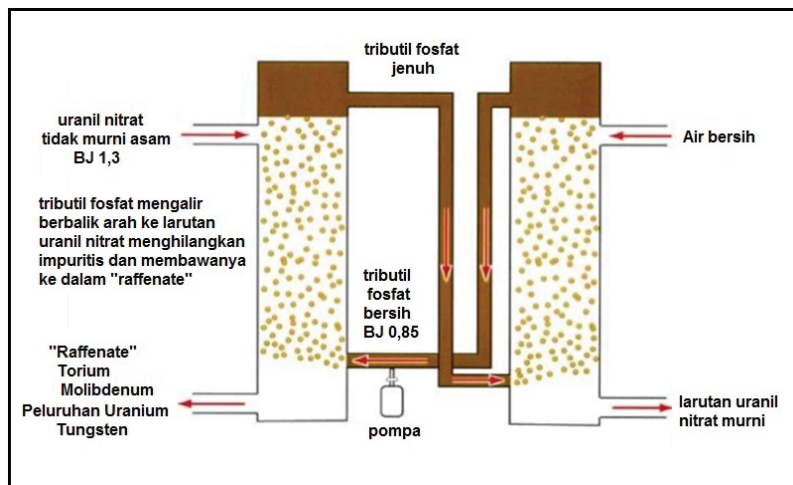
Endapan hasil pengendapan basa dilarutkan melalui metode digesti asam menggunakan asam nitrat (Riza dkk., 2000). Uranium yang terkandung dalam larutan hasil digesti asam dipisahkan dari unsur-unsur lainnya, terutama logam tanah jarang. Metode yang digunakan untuk pemisahan kedua unsur tersebut adalah ekstraksi menggunakan pelarut tributil fosfat (TBP) dengan reduktor hidrogen peroksida (H_2O_2) (Soeprapto, 1990). Tujuan penggunaan H_2O_2 adalah untuk mereduksi LTJ^{4+} menjadi LTJ^{3+} yang tidak ikut terekstraksi oleh TBP.

Pada proses ekstraksi terjadi transfer uranium yang terdapat di dalam larutan umpan ke dalam fasa organik (TBP) akibat kontak langsung dalam waktu tertentu (Gambar 4.3). TBP dan kerosin dapat mengekstraksi uranium nitrat dalam keadaan ion fosfat. Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut (Riza dkk., 2000).



Pada tahap *stripping*, terjadi perpindahan uranium dari fasa organik ke fasa anorganik sehingga uranium terkonsentrasi. Reaksi *stripping* yang terjadi adalah sebagai berikut (Riza dkk., 2000).





Sumber: Riza dkk. (2000)

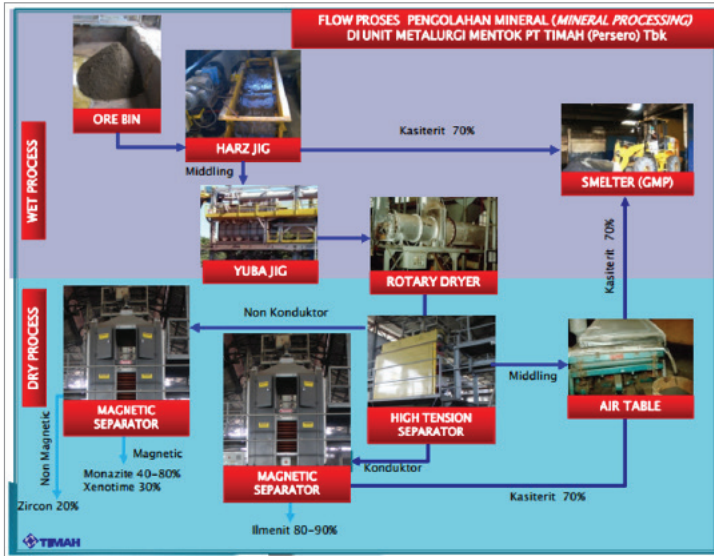
Gambar 4.3 Ekstraksi Pelarut Uranium dengan TBP

Uranium yang terkonsentrasi tersebut kemudian diendapkan sehingga dihasilkan garam amonium diuranat (ADU). Reaksi yang terjadi adalah sebagai berikut (Riza dkk., 2000).



C. EKSTRAKSI MONASIT BANGKA

Ekstraksi monasit Bangka merupakan pengembangan dari ekstraksi monasit Rirang. Seperti disebutkan di depan, ekstraksi monasit Rirang ditujukan terutama untuk memisahkan uranium dari unsur lainnya yang ada di dalam bijih uranium tipe monasit. Dalam perkembangannya, karena di dalam monasit terdapat LTJ dan di Bangka Belitung monasit merupakan mineral ikutan pada tambang timah, dalam lima tahun terakhir ini PT Timah (Persero) Tbk tertarik bekerja sama dengan BRIN untuk melakukan penelitian LTJ yang terkandung dalam monasit Bangka. Monasit merupakan salah satu sumber utama LTJ yang hingga kini pemanfaatannya belum optimal. Di samping mengandung unsur tanah jarang, mineral ini juga mengandung



Sumber: PT Timah (2019)

Gambar 4.4 Proses Benefisiasi Mineral Kasiterit di PT Timah (Persero) Tbk

unsur-unsur radioaktif. Saat ini, monasit Bangka belum diolah dan hanya disimpan pada gudang penyimpanan khusus untuk mencegah penyebaran radiasi. Selain monasit, mineral ikutan pada tambang timah antara lain adalah ilmenit, xenotim, dan zirkon. Untuk meningkatkan kadar timah, mineral ikutan (mineral pengotor) tersebut harus dipisahkan dari kasiterit dengan cara benefisiasi. Proses benefisiasi mineral kasiterit pada PT Timah (Persero) Tbk dapat dilihat pada Gambar 4.4.

Penelitian yang pernah dilakukan dalam pengolahan monasit untuk pemisahan uranium, thorium, dan logam tanah jarang (LTJ) adalah menggunakan dua metode, yaitu metode asam dan basa. Penelitian pengolahan monasit dengan metode asam adalah menggunakan metode metatesis dengan asam sulfat (H_2SO_4). Namun, metode ini tidak dilanjutkan karena fosfat tidak terdekomposisi dengan sempurna yang mengakibatkan sulitnya proses pemisahan uranium, thorium, dan logam tanah jarang. Selain itu, metode ini

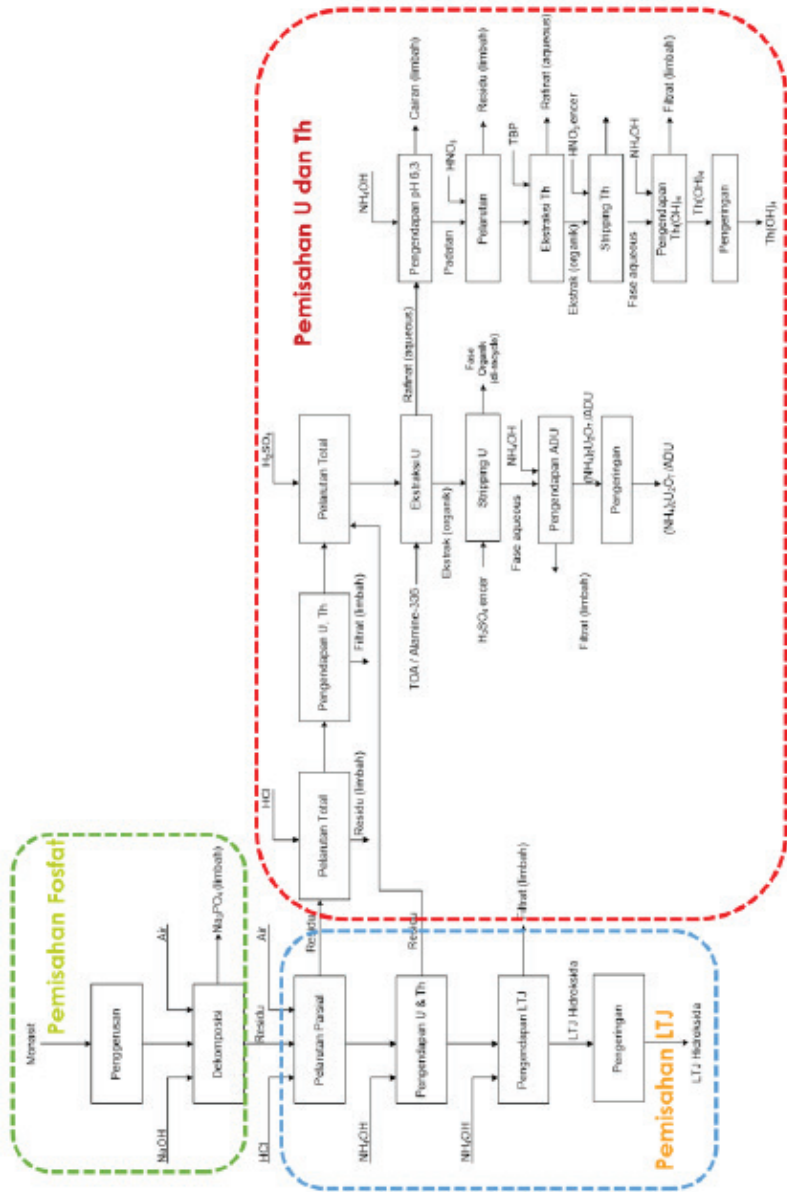
Buku ini tidak diperjualbelikan.

memiliki tahapan yang lebih rumit dibandingkan metode basa. Penelitian pengolahan monasit metode basa menggunakan natrium hidroksida (NaOH). Pada metode ini, fosfat dapat terpisah relatif sempurna. Secara garis besar, pengolahan monasit dengan metode basa ini terdiri atas 3 proses utama, yaitu pemisahan fosfat, pemisahan LTJ, dan pemisahan unsur radioaktif (U dan Th).

Pemisahan fosfat dari monasit melalui proses dekomposisi menggunakan NaOH untuk melarutkan fosfat sebagai natrium fosfat (Na_3PO_4). Na_3PO_4 yang berada pada filtrat hasil dekomposisi dapat dimanfaatkan sebagai bahan baku pembuatan pupuk, sementara residu hasil dekomposisi yang mengandung U, Th, dan LTJ akan dilarutkan dengan asam klorida (HCl) untuk memisahkan U, Th, dari LTJ. Sebagian besar U dan Th berada pada residu hasil pelarutan yang akan diproses lebih lanjut untuk memisahkan U dan Th. (LTJ) Cl_3 yang berada pada filtrat masih mengandung sebagian kecil U dan Th. Pada tahap selanjutnya, U dan Th yang berada dalam filtrat ini diendapkan menggunakan senyawa amonium hidroksida (NH_4OH). Proses ini bertujuan untuk mengendapkan U dan Th yang masih terikat di dalam filtrat sehingga didapatkan filtrat yang mengandung (LTJ) Cl_3 bebas U dan Th. Selanjutnya, dilakukan pengambilan LTJ dari filtrat yang telah bebas radioaktif dengan cara pengendapan menggunakan amonium hidroksida hingga diperoleh endapan LTJ hidroksida ($\text{LTJ}(\text{OH})_3$).

Residu pelarutan dan endapan yang diperoleh dari proses pengendapan U dan Th diolah lebih lanjut untuk dapat memperoleh produk U dan Th. Metode pemisahan U dan Th yang digunakan adalah ekstraksi pelarut. Proses ekstraksi pelarut dilakukan secara bertahap, di mana pada tahap pertama menggunakan pelarut *tri-octyl amine* untuk mengekstrak U. Rafinat yang mengandung Th kemudian dipreparasi untuk selanjutnya dilakukan ekstraksi menggunakan ekstrak *tri-butyl phosphate*. Larutan kaya U dan Th yang diperoleh dari kedua tahapan proses ekstraksi pelarut kemudian diendapkan masing-masing menggunakan amonium hidroksida untuk memperoleh endapan U dan Th hidroksida. Blok diagram proses pengolahan monasit dengan metode basa ditunjukkan pada Gambar 4.5.





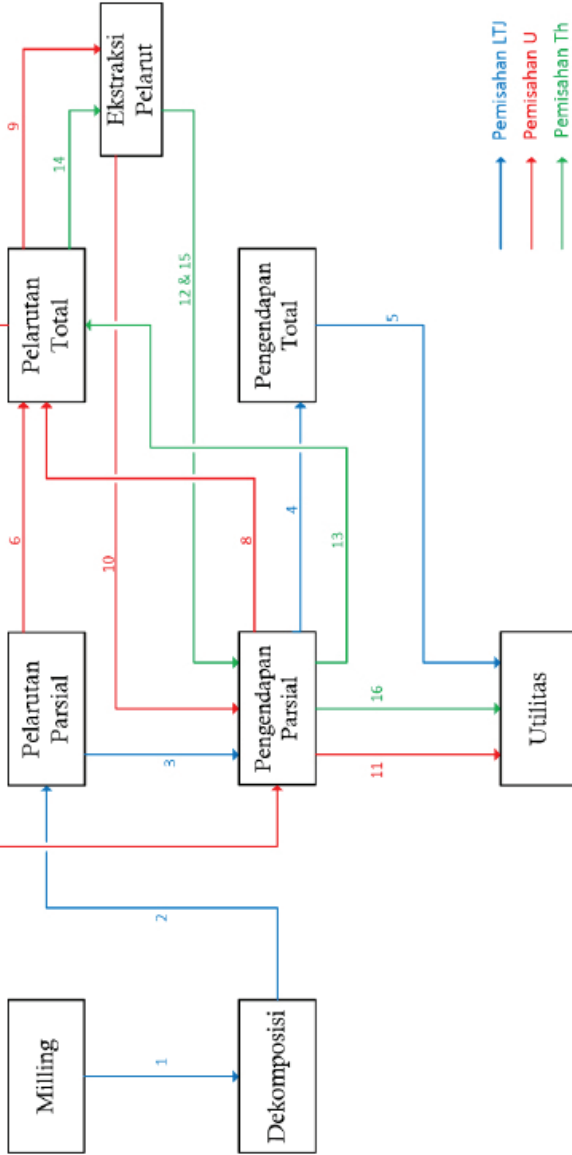
Sumber: Hafni dkk. (2000)

Gambar 4.5 Blok Diagram Pengolahan Monasit Bangka Metode Basa

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Teknologi pengolahan monasit dengan metode basa ini telah dikembangkan hingga skala *pilot plant*. Pembangunan *pilot plant* pengolahan monasit telah direncanakan sejak tahun 2015 yang dimulai dengan desain peralatan dan sistem proses *pilot plant* berdasarkan pada kondisi operasi yang telah teruji di laboratorium. Kegiatan pada tahun 2015 tersebut menghasilkan dua dokumen rancangan, yaitu *Basic Engineering Design* dan *Detail Engineering Design* untuk *pilot plant* pengolahan monasit dengan kapasitas 50 kg monasit/*batch*. *Pilot plant* dirancang menggunakan sistem modul proses agar urutan tahapan proses dapat lebih fleksibel. Sistem modul ini bertujuan untuk memberi kemampuan *pilot plant* dalam mengolah mineral lain, tidak hanya monasit. Konstruksi *pilot plant* dimulai pada awal tahun 2016 yang berlokasi di Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir (sekarang Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif [PRTDBBNLR], BRIN), Kawasan Nuklir Pasar Jumat. Sejumlah delapan sistem modul dibangun, terdiri atas modul milling, modul dekomposisi, modul pelarutan parsial, modul pelarutan total, modul pengendapan parsial, modul pengendapan total, modul ekstraksi pelarut, dan modul utilitas (Gambar 4.6).

Pilot plant dengan nama *Pilot Plant* Pemisahan Logam Tanah Jarang, Uranium, dan Thorium atau disingkat *Pilot Plant* PLUTHO, diresmikan pada tanggal 17 Agustus 2016 oleh Prof. Dr. Djarot Sulistio Wisnubroto, selaku Kepala Badan Tenaga Nuklir Nasional. *Pilot plant* PLUTHO mulai dioperasikan pada tahun 2017 dengan tujuan komisioning dan uji fungsi (Gambar 4.7). Sejak tahun 2017, telah dilakukan 14 *batch* proses pengolahan monasit Bangka dan telah menghasilkan produk LTJ hidroksida dengan kemurnian lebih dari 80%. Namun, kandungan unsur radioaktif masih belum sesuai yang ditargetkan, yaitu kandungan U dan Th masing-masing tidak lebih dari 50 ppm. Modifikasi peralatan dan teknik proses dilakukan sebagai upaya peningkatan kualitas produk. Pada pengoperasian *pilot plant* PLUTHO di sepanjang tahun 2018 sebanyak 12 *batch*, terlihat hasil peningkatan kualitas dengan diperolehnya produk LTJ hidroksida yang dapat dinyatakan bebas radioaktif (kadar U dan Th di bawah 50 ppm).



Sumber: Modifikasi dari Trinopiawan dan Sumiarti (2012)

Gambar 4.6 Konfigurasi Modul pada Pilot Plant Pengolahan Monasit

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Foto: Dokumentasi PTBGN (2018)

Gambar 4.7 Pilot Plant PLUTHO

Produk LTJ hidroksida dari pilot plant PLUTHO telah dimanfaatkan oleh anggota Konsorsium Logam Tanah Jarang untuk diolah lebih lanjut. Dengan berkontribusinya *pilot plant* PLUTHO, diharapkan impian menuju industrialisasi LTJ di Indonesia dapat segera terwujud.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Buku ini tidak diperjualbelikan.

BAB 5

MENAKAR KELAYAKAN TAMBANG URANIUM DI INDONESIA

A. POTENSI SUMBER DAYA URANIUM DI INDONESIA

Estimasi sumber daya uranium di Indonesia dimulai tahun 1978 setelah kerja sama eksplorasi uranium dengan CEA Prancis di Kalimantan berakhir pada tahun 1977. Estimasi pertama kali dilakukan pada cebakan uranium Remaja, Kalan, Kalimantan Barat. Perhitungan sumber daya dilakukan secara manual dan masih banyak asumsi yang digunakan sehingga hasilnya dianggap tidak akurat. Pada tahun-tahun berikutnya, estimasi sumber daya mengaplikasikan metode statistik dengan pendekatan *general outline*. Karena tuntutan ketelitian yang makin tinggi, mulai tahun 1993 estimasi sumber daya dilakukan dengan pendekatan semigeostatistik menggunakan metode *kriging* mengaplikasikan perangkat lunak Surfer 8. Karena dianggap masih belum akurat, mulai 2013 estimasi sumber daya uranium dilakukan menggunakan perangkat lunak Surpac. Estimasi sumber daya uranium di seluruh Indonesia yang dimulai tahun 1978 hingga 2018 telah diterapkan pada beberapa wilayah, yaitu Kalimantan Barat, Kalimantan Timur, Kalimantan Tengah, Sumatra Utara, Sulawesi Barat, dan jalur timah.

Hasil estimasi potensi sumber daya uranium di seluruh Indonesia sampai dengan tahun 2018 mendapatkan potensi sebesar 81.090 ton U_3O_8 dengan berbagai kategori dari kategori terukur hingga spekulatif (Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir [PTBGN], 2019) (Tabel 5.1).

Tabel 5.1 Jumlah Sumber Daya Uranium di Indonesia Status Tahun 2018 (dalam ton U_3O_8)

Sektor Potensial		Kategori					Jumlah
		Terukur	Terindikasi	Tereka	Hipote-tik	Speku-latif	
Kalimantan Barat	Kalan	2.394,2	5.903	2.374	5.058	-	15.729,2
	Ella Ilir	-	-	540	-	-	540
	Ketapang	-	-	-	736	-	736
Kalimantan Timur	Kawat, Mahakam Hulu	-	-	-	17.861	-	17.861
Kalimantan Tengah	Mentawa, Seruyan Hulu	-	-	-	9.669	-	9.669
	Darab, Seruyan Hulu	-	-	623	-	-	623
	Katingan	-	-	-	572	-	572
Sumatra Utara	Aloban, Sibolga	-	-	490	-	-	490
Sulawesi Barat	Mamuju	-	-	769	3.023	-	3.792
Jalur Timah	Bangka	2.840,8	-	-	656	-	3.496,8
	Belitung	-	-	-	568	-	568
	Singkep	-	-	-	1.298	-	1.298
	Bangka Belitung	-	-	-	-	25.715	25.715
Jumlah		5.235	5.903	4.796	39.441	25.715	-
						Jumlah Total	81.090

Sumber: PTBGN (2019)

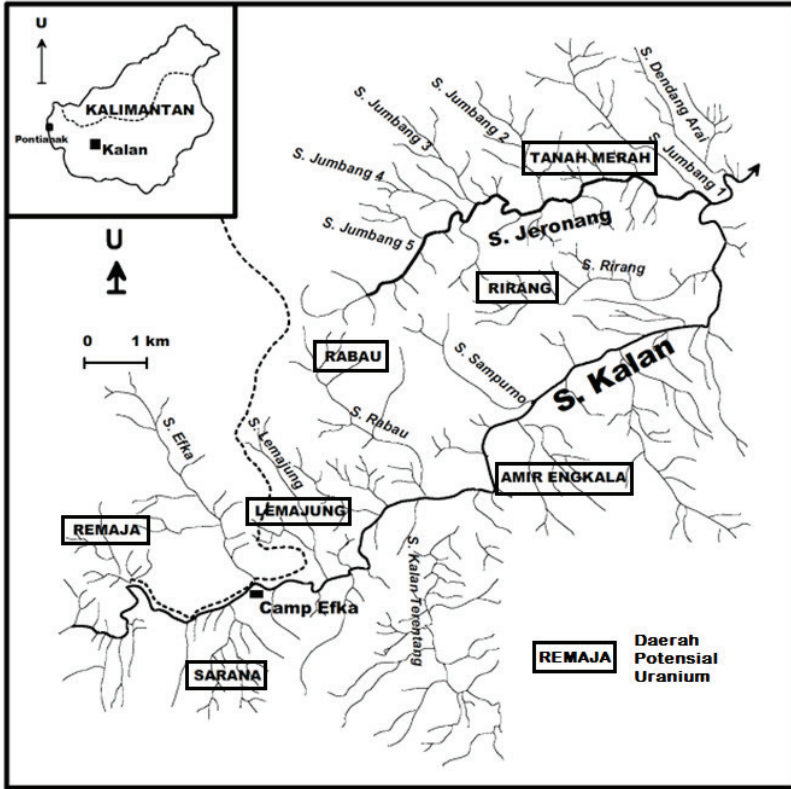
Buku ini tidak diperjualbelikan.

B. PRASTUDI KELAYAKAN TAMBANG URANIUM KALAN, KALIMANTAN BARAT

Hasil eksplorasi uranium di Kalan, Kalimantan Barat, yang dilakukan oleh CEA bersama BATAN pada 1973–1976 mendapatkan beberapa daerah potensial uranium, antara lain Remaja, Lemajung, Sarana, Rabau, Amir Engkala, Rirang, dan Tanah Merah (Gambar 5.1). Prastudi kelayakan pertambangan uranium pernah dilakukan pada tahun 1991 untuk cebakan bijih uranium Remaja (Pusat Pengembangan Bahan Galian Nuklir [PPBGN], 1991) dengan data yang digunakan adalah sebagai berikut.

- 1) Cebakan uranium berupa jalur-jalur mineralisasi berarah barat-timur miring $60\text{--}70^\circ$ ke utara. Terdapat 17 jalur mineralisasi berupa jalur sesar dan sekistositas, tebal bijih mineralisasi sentimetrik hingga desimetrik (Tabel 5.2).
- 2) Jalur-jalur mineralisasi uranium terdapat dalam suatu zona *favourable* dengan jurus N 50° E miring 60° ke tenggara. Lebar zona 80–200 meter dengan penyebaran vertikal 600 meter, tersusun oleh batuan metalanau dan metapelit sekistosan yang diapit oleh lapisan steril metapelit Jeronang di kedua sisinya.
- 3) Jumlah sumber daya 1.300 ton U_3O_8 .
- 4) Bijih yang akan ditambang terdapat di sekitar Bukit Eko dihitung dari permukaan topografi hingga level 350 meter.
- 5) Sistem penambangan adalah tambang bawah tanah dengan metode *cut and fill*.
- 6) Pengolahan bijih melalui beberapa tahapan, yaitu preparasi bijih, pelindian, pemisahan padat cair, pemurnian, dan pengendapan bertingkat.
- 7) Limbah pengolahan ditampung dalam kolam limbah dan dilepas ke lingkungan setelah pH netral sekitar 5–6.





Sumber: Modifikasi dari CEA-BATAN (1977)

Gambar 5.1 Peta Daerah Potensial Uranium di Cekungan Kalan

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Tabel 5.2 Jalur-Jalur Mineralisasi dan Jumlah Sumber Daya Uranium di Eko-Remaja Hasil Estimasi Tahun 1991

Nomor	Jalur Mineralisasi	Luas (m ²)	Kadar (%)	Tebal (m)	Ton Bijih	Ton U ₃ O ₈
1	104	25.196	0,047	0,600	40.817	19,184
2	120	25.653	0,087	0,600	41.557	36,155
3	125	21.377	0,095	0,630	36.362	34,544
4	146	26.264	0,050	0,460	32.619	16,309
5	169	32.419	0,0158	0,920	80.528	127,235
6	179	28.566	0,0177	1,040	80.213	141,977
7	184	21.566	0,212	0,880	51.240	108,630
8	205	29.318	0,136	0,569	45.041	61,256
9	240	30.822	0,068	1,196	99.530	67,680
10	247	31.574	0,040	1,160	98.889	39,550
11	254	35.356	0,074	1,560	148.919	110,200
12	281	33.500	0,061	1,061	95.967	62,378
13	291	33.879	0,074	0,789	72.065	53,328
14	297	35.238	0,030	0,905	86.104	25,831
15	400	43.461	0,138	1,000	117.344	161,93
16	415	34.228	0,078	1,004	92.785	72,372
17	420	31.574	0,130	0,949	80.902	105,172
Jumlah					1.300.882	1.243,731

Sumber: PPBGN (1991)

Buku ini tidak diperjualbelikan.

Secara garis besar, kesimpulan prastudi kelayakan tahun 1991 (PPBGN, 1991) adalah: berdasarkan potensi sumber daya uranium yang relatif kecil (sumber daya terukur Eko-Remaja 1.300 ton U_3O_8) dengan kapasitas tambang 400 ton bijih per hari serta dengan jumlah hari kerja 300 hari per tahun, produk yang akan dihasilkan adalah 113.160 ton U_3O_8 . Umur tambang diperkirakan 11 tahun. *Recovery* diasumsikan sekitar 80–90%. Dengan mempertimbangkan kecenderungan harga uranium internasional yang makin menurun sejak tahun 1980 (dari 40 USD per pon menjadi 7,0 USD per pon pada 1991) dan berdasarkan asumsi IAEA/NENF dalam *Uranium Situation 1989–1999* oleh Muller-Kahle (1991) bahwa pada beberapa tahun mendatang harga uranium diperkirakan naik sebesar 2% per tahun, pada tahun 2013/2014, harga uranium akan mencapai 23,40 USD per kg (asumsi rate dolar Amerika Serikat tahun 2012/2013 Rp3.014,80). Dengan kenaikan nilai tukar saat itu sebesar 1,7%, harga diperhitungan menjadi Rp70.546,76 (1 USD = Rp3.014,80) dan nilai tersebut belum dapat menutup biaya operasional penambangan dan pengolahan sebesar Rp148.812,0 (1 USD = Rp3.014,80) untuk setiap kilogram U_3O_8 .

Untuk perusahaan pertambangan uranium Kalan, disarankan menggunakan strategi jangka panjang sebagai berikut (Arief dkk., 1998):

- 1) pemutakhiran data prastudi kelayakan guna mendapatkan akurasi data yang lebih baik;
- 2) diharapkan dalam jangka 10–15 tahun terdapat terobosan teknologi penambangan dan pengolahan yang lebih efisien sehingga akan menurunkan ongkos produksi penambangan maupun pengolahan;
- 3) mendapatkan tambahan sumber daya (cadangan) baru yang lebih besar dan mempunyai tingkat kesulitan pengolahan yang lebih kecil; dan
- 4) perlu memberi peluang untuk memanfaatkan mineral ikutan yang berharga, misalnya logam tanah jarang dari cebakan uranium Rirang guna menurunkan/menutup sebagian ongkos produksi.

Di samping itu, secara terpisah kegiatan prastudi kelayakan pengolahan uranium telah dilakukan oleh *expert* IAEA, G.C. Lyaudet, dalam program INS-011-1901 tahun 1999 dengan judul *Pre Feasibility Study on Kalan Uranium Ore Processing, Kalan Project, West Kalimantan* (Lyaudet, 1999). Kegiatan tersebut menyimpulkan bahwa apabila kapasitas penambangan 700.000 ton batuan per tahun dengan kadar bijih tambang sekitar 321 ppm, diperoleh biaya capital 2,71 juta dolar Amerika Serikat dan biaya operasional sebesar 1,8 juta dolar US atau 3,61 USD per pon U_3O_8 dengan metode *upgrading hand sorting*, *radiometric ore sorting* (ROS), dan *Knelson Concentrator*.

C. PROSPEK TAMBANG URANIUM DI INDONESIA

Membahas prospek tambang uranium di Indonesia maka tidak terlepas dari ketersediaan cadangan uranium. Pada saat ini, Indonesia belum mempunyai cadangan uranium. Yang dipunyai adalah sumber daya. Total sumber daya uranium di Indonesia adalah 81.090 ton U_3O_8 terdiri atas 5.234,60 ton kategori terukur 5.903 ton kategori terindikasi, 4.796 ton kategori tereka, 39.441 ton kategori hipotetik, dan 25.715 ton kategori spekulatif (Tabel 5.1). Dari rincian jumlah dan kategori sumber daya tersebut tersebar berasal dari berbagai daerah di Kalimantan Barat, Kalimantan Timur, Kalimantan Tengah, Sumatra Utara, Sulawesi Barat, dan jalur timah. Syarat untuk penambangan mineral atau bahan galian adalah mengetahui dengan pasti berapa jumlah cadangan yang layak untuk ditambang (*mineable*) dan letak mineral atau bahan galian yang akan ditambang harus terkonsentrasi pada suatu daerah. Dengan melihat kondisi saat ini, di Indonesia belum ada cebakan uranium yang layak untuk ditambang karena belum mempunyai cadangan dan letak cebakan uranium tersebar di beberapa pulau. Cebakan uranium yang berpotensi untuk ditambang adalah cebakan yang ada di Kalan, Kalimantan Barat, karena telah ada sumber daya yang berpotensi dinaikkan klasifikasinya menjadi cadangan, yaitu sumber daya terukur sebesar 2.394,20 ton U_3O_8 dan 5.903 ton U_3O_8 sumber daya terindikasi. Di Bangka, terdapat 2.840,80 ton sumber daya kategori terukur, tetapi berasal dari monasit yang

Buku ini tidak diperjualbelikan.



merupakan mineral ikutan dari tambang timah sehingga tidak termasuk dalam perencanaan tambang uranium. Sumber daya di daerah lain belum ada yang memenuhi syarat untuk dinaikkan klasifikasinya menjadi cadangan.

Teknologi penambangan dan pengolahan uranium pernah dikuasai, yaitu dengan dilaksanakannya percobaan penambangan dan pengolahan uranium Eko-Remaja, Kalan, Kalimantan Barat pada tahun 1981–1994. Permasalahannya, pada saat ini sumber daya manusia yang menguasai penambangan dan pengolahan tersebut sudah menjalani masa purnabakti, bahkan beberapa orang sudah meninggal dunia dan belum sempat mentransfer ilmunya kepada juniornya karena pada waktu itu ada kebijakan *zero growth* dan moratorium perekrutan PNS. Di samping itu, peralatan untuk penambangan dan pengolahan sebagian besar sudah berusia tua dan bahkan beberapa peralatan sudah rusak dan tidak dapat digunakan lagi.

Bagaimana prospek tambang uranium ke depan? Ya, sampai saat ini belum ada daerah yang prospektif untuk tambang uranium, tetapi mungkin di masa depan, daerah Mamuju, Sulawesi Barat, dapat menjadi pilihan. Cebakan uranium di Mamuju ditemukan belum lama, yaitu tahun 2013, sehingga data yang ada saat ini sangat minim, tetapi secara regional, daerah yang berpotensi terdapat cebakan uranium cukup luas, yaitu sekitar 800 km². Yang lebih menarik lagi selain uranium, di Mamuju juga kaya logam tanah jarang dan thorium. Dengan keterdapatan logam tanah jarang, Mamuju menjadi daerah menarik untuk para investor yang bergerak dalam pertambangan mineral.

Untuk daerah Kalan, hasil dari prastudi kelayakan yang pernah dilakukan pada tahun 1991 memperkirakan harga uranium pada tahun 2013/2014 akan berada pada Rp70.546,76 (1 USD = Rp3.014,80) dan nilai tersebut belum dapat menutup biaya operasional penambangan dan pengolahan sebesar Rp148.812,0 (1 USD = Rp 3.014,80) per kilogram U₃O₈. Dengan melihat perkembangan harga uranium dari tahun 2014–2019 yang tidak mengalami perubahan signifikan, secara umum hasil studi kelayakan pada tahun 1991 dapat memberikan gambaran bahwa hingga saat ini cebakan uranium Kalan belum layak

untuk ditambang. Berdasarkan hal tersebut, perlu diberikan peluang untuk mengusahakan penambangan mineral ikutan yang berharga, misalnya logam tanah jarang di Rirang, sehingga diharapkan dapat menutupi ongkos produksi yang tinggi.

Buku ini tidak diperjualbelikan.





Buku ini tidak diperjualbelikan.

BAB 6

PENUTUP

Dalam 50 tahun sejak dibentuk tahun 1969, kegiatan penelitian dan pengembangan yang dilakukan oleh Direktorat Survey Geologi (DSG, 1969) hingga saat ini sebagai Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR), Badan Riset dan Inovasi Nasional (BRIN), sebagai unit kerja yang mempunyai tugas dan fungsi melaksanakan eksplorasi di seluruh Indonesia telah menemukan mineralisasi uranium dari Aceh hingga Papua. Cebakan uranium yang telah dilakukan estimasi sumber dayanya terdapat di Kalimantan Barat (Kalan-Melawi, Ella Ilir-Melawi, Ketapang), Kalimantan Timur (Kawat-Mahakam Hulu), Kalimantan Tengah (Mentawa-Seruyan Hulu, Darab-Seruyan Hulu, Katingan), Sumatra Utara (Aloban-Sibolga), Sulawesi Barat (Mamuju), dan jalur timah (Bangka, Belitung, Singkep). Jumlah sumber daya uranium di Indonesia adalah 81.090 ton U_3O_8 , terdiri atas 5.234,60 ton kategori terukur, 5.903 ton kategori terindikasi, 4.796 ton kategori tereka, 39.441 ton kategori hipotetik, dan 25.715 ton kategori spekulatif.

Selain hasil penelitian di bidang eksplorasi, kegiatan penelitian dan pengembangan juga dilakukan di bidang penambangan, hingga dikuasainya teknologi penambangan uranium dengan terwujudnya

Buku ini tidak diperjualbelikan.

pembuatan terowongan tambang uranium Eko-Remaja sepanjang 618 meter pada elevasi 450 meter mdpl yang masih terawat hingga saat ini.

Hasil penelitian yang tidak kalah pentingnya di sektor hilir adalah hasil penelitian dan pengembangan pengolahan uranium, yaitu

- 1) penguasaan teknologi pengolahan bijih uranium yang berasal dari Eko-Remaja skala pilot, pengolahan dilakukan selama 10 tahun (1980–1985, 1990, 1992–1993, dan 1996) dan menghasilkan *yellow cake* sebanyak 740,5 kg terdiri atas MgU_2O_7 , sebanyak 200,8 kg dan $(NH_4)_2U_2O_7$ (ADU, amonium diuranat) sebanyak 539,7 kg;
- 2) penguasaan teknologi pengolahan monasit Rirang skala laboratorium; dan
- 3) dibangunnya *Pilot Plant* Pemisahan Logam Tanah Jarang, Uranium, Thorium (PLUTHO).

Sebagai bentuk pengendalian lingkungan, dilakukan juga penelitian mengenai pengelolaan limbah, yaitu penguasaan teknologi pengelolaan limbah radioaktif hasil pengolahan bijih uranium. Menjawab berbagai pertanyaan tentang “Bagaimana prospek tambang uranium di Indonesia di masa depan?,” hasil Prastudi Kelayakan Pertambangan Uranium Eko-Remaja pada tahun 1991 menyimpulkan bahwa hasil perhitungan untuk biaya operasional penambangan dan pengolahan adalah sebesar Rp148.812 (1 USD = Rp3.014,80) per kg U_3O_8 . Sementara itu, harga uranium hanya Rp70.546 (1 USD = Rp3.014,80) sehingga cebakan bijih uranium Eko-Remaja dianggap belum layak untuk ditambang dan diolah. Hingga saat ini, Kalan, Kalimantan Barat, merupakan satu-satunya lokasi eksplorasi uranium dengan sumber daya hingga tingkat terukur. Kalan adalah salah satu kawasan dengan kandungan uranium yang cukup potensial untuk dikembangkan menjadi kawasan pertambangan uranium. Namun, mengingat jumlah sumber daya uranium di Kalan yang berpotensi menjadi cadangan masih relatif sedikit, yaitu 8.927,20 ton (2.394,20 kategori terukur dan 5.903 kategori terindikasi) dan harga uranium dunia dewasa ini masih relatif rendah maka masih diperlukan usaha-usaha tertentu agar kawasan Kalan dapat dikembangkan menjadi kawasan pertambangan yang ekonomis.

Untuk pengusahaan pertambangan uranium Kalan disarankan menggunakan strategi jangka panjang. Pertama, pemutakhiran data prastudi kelayakan guna mendapatkan akurasi data yang lebih baik. Kedua, melakukan terobosan teknologi penambangan dan pengolahan yang lebih efisien sehingga akan menurunkan biaya produksi penambangan maupun pengolahan. Ketiga, mendapatkan tambahan sumber daya baru yang lebih besar dan mempunyai tingkat kesulitan penambangan dan pengolahan yang lebih kecil. Keempat, peluang untuk memanfaatkan mineral ikutan yang berharga, misalnya logam tanah jarang dari cebakan uranium Rirang, guna menurunkan/menutup sebagian ongkos produksi.

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Buku ini tidak diperjualbelikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Affandi, K., Susilaningtyas, & Suprpto. (2000). *Status pengolahan bijih uranium Eko-Remaja—Kalan Kalimantan Barat* [Laporan internal tidak dipublikasikan]. Pusat Pengembangan Bahan Galian Nuklir.
- Affandi, K., Waluyo, S., Saron, B., Sujono, & Muhammad. (2002). Penentuan kondisi optimal penggerusan bijih Rirang dengan ball mill pada bijih uranium Rirang. Dalam *Prosiding Seminar Geologi Nuklir dan Sumber Daya Tambang Tahun 2012* (160–170).
- Amir, S. (2010). The state and the reactor: Nuclear politics in post-Suharto Indonesia. *Indonesia*, 89, 101-147.
- Arief, E. R., Pudjianto, R., Zahardi, & Susilaningtyas. (2000). Pengolahan bijih uranium asal Rirang: Pemisahan LTJ dari hasil digesti basa. Dalam *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir V*.
- Arief, E. R., Zahardi, & Susilaningtyas. (1998). Pengolahan bijih uranium asal Rirang: Ekstraksi uranium dari larutan hasil digesti bijih uranium Rirang dengan tributil fosfat. Dalam *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir III* (83–91).
- Badan Standardisasi Nasional. (1998). *Klasifikasi sumber daya dan cadangan* (Standar Nasional Indonesia SNI 13-4726-1998).

- Bruneton, P., & Cuney, M. (2016). Geology of uranium deposits. Dalam Hore-Lacy, I. (Ed.), *Uranium for nuclear power, resources, mining and transformation to fuel* (11–48). Wodhead Publishing.
- Busch, K., Suprpto, & Djawadi. (1986). *Investigation of the uranium mineralization in the Rirang Valley, West Kalimantan, Indonesia*. [Laporan internal tidak dipublikasikan]. Pusat Pengembangan Bahan Galian Nuklir.
- Cameco. (2019). *Uranium price*. Diakses pada 1 Juni, 2019, dari <https://www.cameco.com/invest/markets/uranium-price>
- CEA-BATAN. (1977). *Prospect to develop uranium deposits in Kalimantan* (Volume I, II, III) [Laporan internal tidak dipublikasikan]. Direktorat Survey Geologi, BATAN.
- Duta, T., Kim, K. H., Uchimiya, M., Kwon, E. E., Jeon, B. H., Deep, A., & Yun, S. T. (2016). Global demand for rare earth resources and strategies for green mining. *Environmental Research*, 150, 182–190.
- Hafni, L. N., Faizal, R., Sugeng, W., Budi, S., Arif, S., & Susilaningtyas. (2000). Pengolahan monasit dari limbah penambangan timah: Pemisahan logam tanah jarang dari U dan Th. Dalam *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir V*.
- Hore-Lacy, I. (2016). Uranium for nuclear power: An Introduction. Dalam Hore-Lacy, I. (Ed.). *Uranium for nuclear power, resources, mining and transformation to fuel* (3-10). Wodhead Publishing.
- International Atomic Energy Agency. (2001). *Annual report 2000*. https://www.iaea.org/sites/default/files/anrep2000_full.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2018a). *Geological classification of uranium deposits and description of selected examples* (IAEA-TECDOC-1842). https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1842_web.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2018b). *World distribution of uranium deposits (UDEPO)* (2016 Edition, IAEA-TECDOC-1843). https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE1843_web.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2019a). *In-operation & long-term shutdown*. Diakses pada 23 Mei, 2019, dari <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>

- International Atomic Energy Agency. (2019b). *Under construction*. Diakses pada 23 Mei, 2019, dari <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/UnderConstructionReactorsByCountry.aspx>
- Karyono, H. S. (1989). *Typologie des structures mineralises du basin de la Kalan Kalimantan de l'ouest Indonesia* [Disertasi, ULP Strasbourg].
- Keputusan Direktur Jenderal Badan Tenaga Atom Nasional Nomor PN.03/160/DJ/1989 tentang Ketentuan Keselamatan Kerja Terhadap Radiasi. (1989).
- Kidd, S. (2016). The uranium market, supply adjustment from secondary sources, and enrichment underfeeding. Dalam Hore-Lacy, I. (Ed.), *Uranium for nuclear power, resources, mining and transformation to fuel* (99-121). Wodhead Publishing.
- Kusumadinata, R. P., & Sastrowihardjo, S. (1988). Uranium prospect in tertiary sediments in the Sibolga area, North Sumatera. *Uranium Deposits in Asia and the Pacific: Geology and Exploration*, 121-140.
- Lyaudet, G. C. (1999). *Pre feasibility study on Kalan uranium ore processing, Kalan Project West Kalimantan* [Expert report tidak dipublikasikan].
- Muller-Kahle, E. (1991). *The uranium situation 1989-1990*. IAEA/NENE.
- Ngadenin. (1997). *Prospeksi sistematis sektor Mentawa Kalimantan Tengah* [Laporan internal tidak dipublikasikan]. Pusat Pengembangan Bahan Galian Nuklir.
- Ngadenin. (2014). *Inventarisasi potensi sumber daya uranium di Mamuju* [Laporan internal tidak dipublikasikan]. Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir.
- Ngadenin. (2018). *Pengenalan bidang eksplorasi PTBGN* [Bahan paparan PPT]. Disampaikan dalam acara Tour of Duty CPNS BATAN 2018. Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir.
- Ngadenin. (2019). *Pengenalan bidang eksplorasi PTBGN* [Bahan paparan PPT]. Disampaikan dalam acara Tour of Duty CPNS BATAN 2019. Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir.
- Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 5 Tahun 2006 tentang Kebijakan Energi Nasional. (2006). <https://jdih.esdm.go.id/storage/document/Perpres%20No.%2005%20Thn%202006.pdf>



- PT Timah. (2019). *Peningkatan nilai tambah mineral di PT Timah* [Bahan paparan PPT]. Disampaikan dalam acara kunjungan BATAN ke kawasan PT Timah, Pangkal Pinang.
- Pusat Kajian Desentralisasi dan Otonomi Daerah. (2018). *Kajian strategi pemerintah daerah dalam menghadapi agenda perubahan iklim*. Pusat Kajian Desentralisasi dan Otonomi Daerah, Lembaga Administrasi Negara.
- Pusat Pengembangan Bahan Galian Nuklir. (1991). *Prastudi kelayakan pertambangan uranium bukit Eko-Remaja Kalan, Kalimantan Barat* [Laporan Internal tidak dipublikasikan].
- Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi. (2018). *Outlook Energi Indonesia 2018*. Pusat Pengkajian Industri Proses dan Energi, Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi.
- Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir. (2019). *Sumber daya uranium dan thorium di Indonesia tahun 2018* [Laporan internal tidak dipublikasikan].
- Riza, F., Nuri, H. L., Saron, B., Waluyo, S., & Susilaningtyas. (2000). Pengolahan bijih uranium asal Rirang secara basa pemurnian uranium hidroksida dari LTJ. Dalam *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir V* (102–108).
- Roekmantara, R. (1978). *Proteksi radiasi*. BATAN.
- Santosadjaja, B. (1987). *Diklat prospektor II: Keselamatan kerja radiasi pada penambangan dan pengolahan uranium*. PUSDIKLAT BATAN.
- Sarimin, Bambang, S., & Zainal, A. (1997). *Pembuatan terowongan dari dua arah untuk eksplorasi uranium* [Laporan internal tidak dipublikasikan]. Pusat Pengembangan Bahan Galian Nuklir.
- Soeprapto. (1980). *Mineralisasi uranium di Way Pubian Lampung* [Laporan internal tidak dipublikasikan]. Pusat Eksplorasi dan Pengolahan Bahan Nuklir.
- Soeprapto. (1990). *Studi mikroskopik contoh batuan zona mineralisasi uranium sektor Darab Kalimantan* [Laporan internal tidak dipublikasikan]. Pusat Pengembangan Bahan Galian Nuklir.
- Subiantoro, L. (1994). *Identifikasi potensi uranium di sektor I Bulit Kalimantan Barat tahapan prospeksi detil* [Laporan internal tidak dipublikasikan]. Pusat Pengembangan Bahan Galian Nuklir.

- Sugiyono, A. (2010). Peran PLTN dalam mendukung komitmen pemerintah untuk mengurangi emisi CO₂. Dalam *Prosiding Seminar Nasional Pengembangan Energi Nuklir III* (199–206).
- Tim Penelitian Penambangan. (1993). *Laporan kegiatan di terowongan eksplorasi Eko-Remaja bulan April–Desember 1993* [Laporan internal tidak dipublikasikan]. Pusat Pengembangan Bahan Galian Nuklir.
- Tjokrokardono, S., Soetopo, B., & Ngadenin. (2002). Tinjauan sumberdaya monasit di Indonesia sebagai pendukung litbang/ industri superkonduktor. Dalam *Prosiding Seminar IPTEK Nuklir dan Pengelolaan Sumberdaya Tambang* (206–212).
- Trinopiawan, K., & Sumiarti. (2012). Pemisahan thorium dari uranium pada monasit dengan metode pengendapan. *Eksplorium*, 33(1), 55-62.
- Widana, K. S. (2015). *Eksplorasi uranium di Hulu Mamuju tahapan prospeksi sistematis* [Laporan internal tidak dipublikasikan]. Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir.
- Widodo, M. (1989). *Prospeksi sistematis sektor Darab Kalimantan* [Laporan Internal tidak dipublikasikan]. Pusat Pengembangan Bahan Galian Nuklir.
- Widodo, M. (1998). *Kajian petrografis contoh batuan dari Neis Gumpang Aceh Tenggara* [Laporan internal tidak dipublikasikan]. Pusat Pengembangan Bahan Galian Nuklir.
- Wirakusumah, W. (1988). *Evaluasi potensi sumber daya uranium di Kalan, Kalimantan Barat* [Laporan internal tidak dipublikasikan]. Pusat Pengembangan Bahan Galian Nuklir.
- Wirakusumah, W., & Ngadenin. (1997). Reevaluasi cebakan uranium Eko-Remaja, Kalan, Kalimantan Barat. Dalam *Prosiding Presentasi Ilmiah Daur Bahan Nuklir III*.
- World Nuclear Association. (2019a). *Nuclear power in the world today*. Diakses pada 23 Mei, 2019, dari <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>
- World Nuclear Association. (2019b). *Outline history of nuclear energy*. Diakses pada 23 Mei, 2019, dari <http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/outline-history-of-nuclear-energy.aspx>

World Nuclear Association. (2019c). *World uranium mining production*. Diakses pada 3 Juni, 2019, dari <http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>

Buku ini tidak diperjualbelikan.



GLOSARIUM

- Alterasi, *n, Geo*, perubahan fisika atau kimia komposisi mineralogi batuan
- Anomali, *adj, Geo*, penyimpangan dari keseragaman sifat fisik, sering menjadi perhatian eksplorasi (misalnya anomali waktu-lintas, anomali magnetik)
- Adsorpsi, *n, Kim*, proses atau kemampuan suatu bahan untuk memegang atau mengonsentrasikan gas, cairan, atau zat terlarut pada permukaannya secara adhesif; penyerapan
- Batuan beku, *n, Geo*, batuan yang terbentuk dari proses pembekuan lava atau magma
- Batuan malihan, *n, Geo*, batuan yang terbentuk dari proses metamorfisme
- Batuan sedimen, *n, Geo*, batuan yang terbentuk dari proses pengendapan atau sedimentasi
- Benefisasi, *n*, proses meningkatkan nilai ekonomi bijih yang ditambang, dengan cara menghilangkan material yang kurang bernilai, sehingga terjadi peningkatan *grade* bijih
- Bijih, *n, Geo*, material padat yang terbentuk secara alami di mana metal atau mineral yang memiliki nilai ekonomi dapat di ekstraksi

- Cebakan, *n, Geo*, lapisan mineral, metal, dan sebagainya yang terbentuk di bawah tanah melalui proses alamiah dengan periode pembentukan yang lama
- Channel sampling, n*, metode pengambilan sampel dengan cara pembuatan saluran kemudian sampel diambil dengan interval tertentu
- Crystal defect, n*, ketidaksempurnaan pada susunan geometri reguler atom pada suatu kristal yang solid
- Cut and fill, n*, metode penambangan bawah tanah di mana proses penambangan dilakukan secara horizontal dan berlevel. Penambangan dilakukan dari level terbawah kemudian material sisa tambang diletakkan kembali dan digunakan sebagai dasar dari penambangan level selanjutnya
- Dekantasi, *n, Kim*, proses mengendapkan semua endapan, kemudian menuang cairan di atas endapan dengan hati-hati sehingga endapan tetap tinggal dalam wadah semula
- Diagenetik, *n, Geo*, perubahan fisika dan kimia yang terjadi pada sedimen pada rentang waktu antara deposisi dan solidifikasi
- Diseminasi, *n*, penyebarluasan
- Eksplorasi, *n, Geo*, penyelidikan dan penjajakan daerah yang diperkirakan mengandung mineral berharga dengan jalan survei geologi, survei geofisika, atau pengeboran untuk menemukan deposit dan mengetahui luas wilayahnya
- Ekstrasi, *n, Kim*, pemisahan suatu bahan dari campurannya, biasanya dengan menggunakan pelarut
- Emisi, *n*, kandungan gas mesin yang dibuang ke udara
- Epitermal, *adj, Geo*, berhubungan dengan mineralisasi yang terbentuk pada kedalaman dangkal (kurang lebih 1 km), pada rentang suhu 50–200° C
- Felsik, *adj, Geo*, berkaitan dengan mineral berwarna cerah atau batuan beku yang kandungan silika tinggi dan umumnya kaya akan aluminium, sodium, oksigen, dan kalium
- Flokulasi, *n, Kim*, penggabungan partikel-partikel koloidal dalam suspensi yang terjadi karena gaya tolak antarpartikel
- Hidrotermal, *adj*, berhubungan dengan pemanasan air di dalam kerak bumi
- In situ leaching, n*, hidrometalurgi proses di mana bijih di larutkan di tempat asalnya dengan penginjeksian suatu larutan kedalam cebakan untuk memperoleh kandungan ekonomisnya

- Inklusi fluida, *n*, gelembung gas dan/atau likuid berukuran mikroskopik yang terperangkap pada kristal yang solid
- Intrusi, *n*, *Geo*, penerobosan magma ke dalam batuan atau di antara batuan lain
- Isotop, *n*, *Fis*, unsur yang atomnya mempunyai jumlah proton yang sama, tetapi berbeda jumlah neutron dalam intinya
- Kaldera, *n*, *Geo*, kawah gunung berapi yang sangat luas, terjadi karena peledakan atau runtuhnya bagian puncak gunung berapi
- Karst, *n*, *Geo*, daerah yang terdiri atas batuan kapur yang berpori sehingga air di permukaan tanah selalu merembes dan menghilang ke dalam tanah
- Kerak bumi, *n*, *Geo*, kulit bumi terluar yang keras; lapisan terluar bumi yang padat
- Koagulasi, *n*, *Kim*, perihal menjadi keras atau padat, baik seluruh maupun sebagian cairan sebagai akibat perubahan kimiawi
- Lignit, *n*, *Min* jenis batu bara yang merupakan tingkat pertama hasil proses pembatubaraan gambut
- Lipatan, *n*, *Geo*, struktur lapisan batuan yang melengkung atau bergelombang seperti ombak akibat deformasi batuan
- Long term uranium price*, *n*, harga uranium dengan mempertimbangkan harga pada saat pengiriman uranium. Umumnya uranium diperjualbelikan dengan kontrak waktu yang panjang (4–10 tahun), sehingga dibutuhkan *long term price* pada saat pengiriman uranium tersebut
- Mafik, *adj*, *Geo*, berkaitan dengan mineral berwarna gelap atau batuan beku yang kandungan silika rendah dan magnesium dan besinya tinggi
- Metamorfisme, *n*, *Geo* perubahan struktur dan/atau komposisi batuan oleh pengaruh luar (seperti tekanan dan suhu tinggi)
- Metasedimen, *n*, *Geo*, sedimen atau batuan sedimen yang menunjukkan tanda telah mengalami proses metamorfisme
- Metasomatisme, *v*, *Geo*, proses merubah komposisi batuan yang terjadi dibawah tanah, baik dengan penambahan atau pengurangan unsur kimia
- Metatesis, *n*, *Kim*, reaksi pertukaran ion antara dua senyawa, atau disebut juga reaksi dekomposisi ganda
- Mineral bijih, *n*, mineral yang mengandung logam berharga

- Mineralisasi, *n, Geo*, proses deposisi mineral dan/atau metal yang memiliki nilai ekonomi pada pembentukan tubuh bijih dalam batuan melalui berbagai macam proses
- Patahan, *n, Geo*, retakan pada batuan di kerak bumi yang mengalami pergerakan akibat gaya kompresional atau gaya tensional
- Pelindian, *n, Kim*, pemisahan bahan terlarut dari suatu zat
- Piroklastik, *adj, Geo*, berhubungan, terdiri, atau menunjukkan fragmen batuan yang terbentuk dari letusan gunung api
- Pitchblende*, *n, Geo*, mineral bijih uranium dengan rumus senyawa kimia umumnya UO_2 . Nama lain dari uraninit.
- Prospeksi, *n, Geo*, kegiatan penyelidikan awal di suatu daerah dalam upaya mendapatkan berbagai mineral berharga
- Radiasi, *n, Fis*, pemancaran dan perambatan gelombang yang membawa tenaga melalui ruang atau zantara
- Radioaktivitas, *n, Fis* sifat beberapa unsur yang dapat secara spontan memancarkan zarah sinaran radiasi atau sinar gama melalui penghancuran inti atom
- Radiometrik, *adj*, berhubungan dengan pengukuran radioaktivitas
- Sedimentasi, *n*, pengendapan atau hal mengenakan benda padat karena pengaruh gaya berat
- Sesar, *lihat patahan*
- Singenetik, *n, Geo*, cebakan yang terbentuk bersamaan dengan terbentuknya batuan yang menjadi *host*
- Stemming*, *n*, proses meletakkan material agregat (pasir, kerikil, dan lempung) diatas lubang yang berisi bahan eksplosive untuk menahan produk ledakan (gas) dan energi di dalam lubang peledakan.
- Stock pile*, *n*, tumpukan material sisa pertambangan
- Stockworks*, *n, Geo*, sistem atau kumpulan urat-urat kecil yang arahnya dikontrol struktur atau tidak memiliki arah yang acak
- Stratabound*, *n, Geo*, cebakan yang terperangkap hanya pada satu unit stratigrafi
- Stratigrafi, *n, Geo*, susunan lapisan batu-batuan dalam kulit bumi
- Substitusi, *n, Kim*, penggantian atom atau gugus atom dalam suatu molekul oleh atom atau gugus atom lain
- Uraninit, *n, Geo*, lihat *Pitchblende*

Uranium spot price, n, harga uranium untuk pembelian dan pembayaran pada saat itu juga

Yellow cake, n, hasil pengolahan bijih uranium yang berupa padatan uranium oksida

Buku ini tidak diperjualbelikan.



Buku ini tidak diperjualbelikan.

INDEKS

- Albitisasi, 5
Alterasi, 6, 101
Anomali, 23, 24, 33, 35, 36, 101
Apatit, 8
Autonit, 43, 44,
Bangka, 17, 39, 64, 68, 73, 74, 76,
77, 82, 87, 91
batuan beku, 3, 34, 67, 101, 102,
103
Batuan karbonat, 8
Batuan malihan, 5, 34, 40, 41, 42,
43, 67, 101
Batuan sedimen, 3, 5, 33, 40, 42,
101, 103
Batu bara, 2, 7, 8, 17, 19
Benefisiasi, 74, 101
Bijih uranium, 7, 27, 44, 45, 47, 48,
50, 51, 55, 56, 57, 58, 62, 63, 64,
73, 83, 92, 95, 98, 104, 105
Black shale, 8
Branerit, 5, 42, 44
Carbonate, 8
Carnotite, 2
Cebakan, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 13,
23, 29, 33, 35, 43, 44, 67, 68, 81,
83, 86, 87, 88, 91, 92, 93, 99, 102,
104
Channel sampling, 26, 102
Collapse breccia pipe, 6
Cut and fill, 47, 83, 102
Dekomposisi, 69, 70, 71, 75, 77, 103
Diagenetik, 6, 102
Diseminasi, 8, 102
Eko-Remaja, 43, 44, 45, 46, 47, 48,
52, 53, 54, 55, 56, 61, 62, 63, 64,
85, 86, 88, 92, 95, 98, 99
eksplorasi, 13, 14, 15, 21, 22, 23, 28,

29, 31, 32, 33, 34, 38, 39, 40, 41, 43, 55, 58, 81, 83, 91, 92, 97, 98, 99, 101, 102, 107, 111, 112, 113

Ekstraksi, 64, 65, 66, 69, 72, 73, 75, 77, 95, 101

Emisi, 2, 18, 99, 102

Episyenite, 4

Epitermal, 68, 102

Felsik, 5, 7, 102

Flokulasi, 65, 66, 102

Genes, 67

Geokimia, 23, 33

Geolistrik, 26

Granit, 4, 5, 7, 34, 40, 42, 67, 68

Granite-related, 4

Gumit, 42

Hidrotermal, 6, 102

Ilitisasi, 5

Ilmenit, 68, 74

Ilmenorutil, 56

In situ leaching, 12, 102

Intrusi, 5, 103

Intrusive, 4

Iron oxide-copper-gold, 5

Isotop, 1, 15, 56, 103

Jalur timah, 68, 81, 82, 87, 91

Kalan, 8, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 54, 55, 56, 58, 62, 64, 81, 82, 83, 84, 86, 87, 88, 91, 92, 93, 95, 97, 98, 99

kaldera, 5, 103

Karbonatit, 4

Karbon dioksida, 2

Karnotit, 7

Kasiterit, 68, 74

Klorit, 6

Koagulasi, 65, 66, 103

Kofinit, 5, 42

Konglomerat, 7

Kriging, 81

Kuarsa, 6

Lava, 5, 101

Lemajung, 38, 51, 52, 55, 58, 59, 60, 62, 63, 83

Lignit, 7, 103

Lignite-coal, 7

Logam tanah jarang, 64, 67, 71, 72, 74, 77, 79, 86, 88, 89, 92, 93, 96, 114

LTJ hidroksida, 75, 77, 79

Mafik, 5, 103

Magnetit, 55, 68

Metalanau, 34, 44, 83

Metamorfisme, 3, 8, 101, 103

Metamorphite, 5

Metapelit, 34, 44, 83

Metasedimen, 4, 103

Metasomatisme, 5, 103

Metasomatite, 5

Metatesis, 74, 103

Milling, 77

Mineral, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 16, 29, 42, 44, 64, 67, 68, 73, 74, 77, 86, 87, 88, 89, 93, 98, 101, 102, 103, 104, 108, 111, 112, 113, 114

Mineral bijih, 4, 103, 104

Mineralisasi, 4, 5, 8, 24, 25, 26, 33, 34, 36, 40, 41, 42, 43, 44, 46, 63, 83, 85, 91, 98, 102, 104

Mineral radioaktif, 2, 42, 67, 108, 111, 112, 113, 114
 Molibdenit, 55, 56
 Monasit, 4, 33, 56, 64, 67, 68, 69, 70, 71, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 87, 92, 96, 99, 108, 114
 Monzonit, 4
 Orogenik, 5
Palaeo quartz-pebble conglomerate, 7
 Parit uji, 25, 26, 36, 46, 55, 56,
 Pasir timah, 68
 Pegmatit, 4, 40, 42, 67
 Pelet, 2
Phosphate, 8, 75
Picttblende, 2
 Pirhotit, 56
 Pirit, 6, 7, 55, 56
 Piroklastik, 5, 7, 104
 Pitchblende, 2, 3, 5, 6, 42, 104
 Polarisasi terimbas, 26
Polymetallic iron oxide breccia complex, 5
 Prospeksi, 14, 21, 23, 24, 28, 31, 32, 33, 38, 39, 40, 97, 98, 99, 104
Proterozoic unconformity, 5
 Radiasi, 15, 54, 55, 56, 64, 74, 97, 98, 104
 Radioaktif, 2, 14, 42, 64, 65, 66, 67, 71, 72, 74, 75, 77, 91, 92, 111, 112, 113, 114
 Radiometri, 34, 35, 36, 38
 Radon, 26, 52, 54, 55
 Reaktor g.A. Siwabessy, 15
 Reaktor kartini, 15
 Reduksi, 6
 Rirang, 33, 38, 56, 64, 68, 69, 70, 71, 73, 83, 86, 89, 92, 93, 95, 96, 98
 Rutil, 68
Sandstone, 6
 Sedimen, 3, 5, 6, 7, 8, 33, 40, 42, 101, 102, 103
 Sedimentasi, 3, 65, 101
 Sekis, 34, 67
 Sesar, 5, 83, 104
 Singenetik, 8, 104
Stemming, 48, 49, 104
Stock pile, 50, 51, 52, 104
Stockworks, 5, 104
Stratabound, 8, 104
 Stratiform, 8
 Stratigrafi, 5, 104
Stripping, 72
Surficial, 7
 Syenit peralkalin, 4
Synsedimentary, 8
 Tanah merah, 40, 56, 64, 83
 Tangki pengendapan, 58, 66
 Terowongan, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 63, 92, 98, 99
 Turmalin, 56
 Uraninit, 2, 3, 42, 43, 44, 55, 56, 104
 Uranothorit, 43
Very low frequency, 26
Volcanic-related, 5
 Vulkanik, 5, 6, 41, 43
 Xenotim, 64, 74
 Zirkon, 68, 74



Buku ini tidak diperjualbelikan.

BIOGRAFI PENULIS



Ngadenin

Peneliti Ahli Madya di Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR), Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN), BRIN. Memperoleh gelar sarjana di bidang ilmu geologi di Fakultas Teknologi Mineral Universitas Pembangunan Nasional ‘Veteran’ Yogyakarta. Topik penelitian yang digeluti mencakup eksplorasi mineral radioaktif. *e-mail: ngad001@brin.go.id*



Heri Syaeful

Peneliti Ahli Madya di Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR), Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN), BRIN. Memperoleh gelar master di bidang geologi dari Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumihan, Institut Teknologi Bandung. Topik penelitian mencakup eksplorasi mineral radioaktif serta studi geologi teknik dan hidrogeologi untuk fasilitas nuklir. *e-mail: heri021@brin.go.id*



Kurnia Setiawan Widana

Peneliti Ahli Madya di Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR), Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN), BRIN. Memperoleh gelar master di bidang geologi dari Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung. Topik penelitian mencakup eksplorasi, penambangan, dan pengolahan mineral radioaktif. *e-mail*: kurn009@brin.go.id



Adi Gunawan Muhammad

Penyelidik Bumi Ahli Madya di Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR), Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN), BRIN. Memperoleh gelar master di bidang ilmu geologi di Fakultas Ilmu dan Teknologi Kebumian, Institut Teknologi Bandung. Topik penelitian yang digeluti mencakup pengembangan geologi nuklir, penerapan metoda geofisika untuk eksplorasi uranium, geostatistik, dan estimasi sumber daya. *e-mail*: adig001@brin.go.id



I Gde Sukadana

Peneliti Ahli Muda di bidang geologi di Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR), Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN), BRIN. Memperoleh gelar master di bidang ilmu geologi Fakultas Teknik Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta. Topik penelitian radioaktif, penerapan teknik nuklir yang digeluti mencakup pengembangan geologi nuklir yang menekankan pada eksplorasi mineral dalam bidang geologi, dan pemanfaatan ilmu geologi dalam pengembangan teknologi nuklir. *e-mail*: igde001@brin.go.id



Fadiah Pratiwi

Penyelidik Bumi Ahli Pertama di Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR), Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN), BRIN. Memperoleh gelar sarjana bidang geologi dari Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta. Topik penelitian yang dilakukan difokuskan pada eksplorasi mineral radioaktif. *e-mail*: fadi005@brin.go.id



Rachman Fauzi

Penyelidik Bumi Ahli Pertama di Pusat Riset Sumber Daya Geologi (PRSDG), Organisasi Riset Kebumihan dan Maritim (ORKM), BRIN. Memperoleh gelar sarjana di bidang ilmu geologi di Program Studi Teknik Geologi, Institut Teknologi Bandung. Topik penelitian yang digeluti mencakup eksplorasi bahan galian nuklir. *e-mail*: rach021@brin.go.id



Riesna Prassanti

Peneliti Ahli Muda di Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR), Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN), BRIN. Memperoleh gelar master di bidang teknik kimia dari Universitas Indonesia pada tahun 2014. Topik penelitian yang digeluti sampai saat ini terkait pengolahan mineral radioaktif untuk mengekstrak uranium dan thorium. *e-mail*: ries002@brin.go.id



Mutia Anggraini

Pengembang Teknologi Nuklir Ahli Muda di Direktorat Pengelolaan Laboratorium, Fasilitas Riset, dan Kawasan Sains Teknologi BRIN. Memperoleh gelar master di bidang ilmu kimia di Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Sepelas Nopember, Surabaya. Topik penelitian yang digeluti mencakup pengolahan mineral radioaktif (monasit, terak timah) menjadi unsur radioaktif dan unsur logam tanah jarang (LTJ) atau *rare earth elements* (REE). *e-mail*: muti002@brin.go.id



Kurnia Trinopiawan

Pengembang Teknologi Nuklir Ahli Muda di Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR), Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN), BRIN. Memperoleh gelar master di bidang ilmu metalurgi di Fakultas Teknik Pertambangan dan Perminyakan, Institut Teknologi Bandung. Topik penelitian yg digeluti mencakup pengolahan bahan galian nuklir. *e-mail*: kurn015@brin.go.id



Dany Poltak Marisi

Pengembang Teknologi Nuklir Ahli Muda di Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTDBBNLR), Organisasi Riset Tenaga Nuklir (ORTN), BRIN. Memperoleh gelar master di bidang ilmu lingkungan di Program Pascasarjana Ilmu Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Lingkungan, Institut Pertanian Bogor. Penelitian yang dilakukan berfokus pada pengelolaan limbah. *e-mail*: dany006@brin.go.id

50
Tahun

Eksplorasi Uranium di *Indonesia*

Uranium merupakan bahan bakar utama reaktor nuklir yang memiliki energi besar. Uranium dapat dimanfaatkan sebagai bahan bakar reaktor nuklir yang dapat menghasilkan listrik dalam kapasitas yang sangat besar. Nuklir merupakan satu-satunya energi yang terbukti dapat dikembangkan di berbagai kondisi lingkungan dan dapat menghasilkan energi listrik secara terus-menerus tanpa emisi karbon dioksida dan polusi udara sehingga dapat dikatakan ramah lingkungan.

Buku *50 Tahun Eksplorasi Uranium di Indonesia* ini mengulas rangkuman kegiatan serta hasil penelitian dan pengembangan selama 50 tahun Pusat Teknologi Bahan Galian Nuklir (PTBGN) BATAN. Saat ini PTBGN telah berubah menjadi Pusat Riset Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir dan Limbah Radioaktif (PRTBDBNLR) BRIN.

Membaca buku ini akan membawa Anda lebih memahami kegiatan eksplorasi uranium di Indonesia. Buku ini dapat menjadi sarana tepat untuk alih iptek bagi masyarakat dan generasi milenial untuk mendalami eksplorasi, penambangan, dan pengolahan uranium pada masa sekarang dan yang akan datang.

Selamat membaca!



Diterbitkan oleh:
Penerbit BRIN, anggota Ikapi
Direktorat Repositori, Multimedia, dan Penerbitan Ilmiah
Gedung B.J. Habibie, Jln. M.H. Thamrin No. 8,
Kb. Sirih, Kec. Menteng, Kota Jakarta Pusat,
Daerah Khusus Ibukota Jakarta 10340
Whatsapp: 0811-8612-369
E-mail: penerbit@brin.go.id
Website: penerbit.brin.go.id

DOI: 10.55981/brin.581



e-ISBN 978-623-8052-11-0



9 786238 052110