

**LAPORAN TUGAS AKHIR PENELITIAN
PENGARUH TEMPERATUR, PH DAN WAKTU KONTAK
TERHADAP KONVERSI AMMONIUM DIURANAT PADA
PROSES PENGENDAPAN LARUTAN URANIL NITRAT
DI PTBBN BATAN-SERPONG
(1 FEBRUARI - 30 MARET)**



OLEH:

PRILLIA PUTRI BERYA (1512043)

SEPTY MAULYDIA RIZAL (1512066)

**PROGRAM STUDI TEKNIK KIMIA POLIMER
POLITEKNIK STMI JAKARTA
KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN
2016**

POLITEKNIK STMI JAKARTA
KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN REPUBLIK INDONESIA
LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING LAPANGAN PENELITIAN

JUDUL : PENGARUH TEMPERATUR, PH DAN WAKTU
KONTAK TERHADAP KONVERSI
AMMONIUM DIURANAT PADA PROSES
PENGENDAPAN LARUTAN URANIL NITRAT

DISUSUN OLEH :

NAMA/NIM : PRILLIA PUTRI BERYA/1512043
SEPTY MAULYDIA RIZAL/1512066

PROGRAM STUDI : TEKNIK KIMIA POLIMER

Telah diperiksa dan disetujui sebagai salah satu syarat akademik Program Studi
Teknik Kimia Polimer pada Politeknik STMI Jakarta oleh:

Jakarta, 27 Juni 2016

Pembimbing Penelitian

Torowati, ST

LEMBAR PERSETUJUAN DOSEN PEMBIMBING
POLITEKNIK STMI JAKARTA
d.h. SEKOLAH TINGGI MANAJEMEN INDUSTRI
KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN REPUBLIK INDONESIA

JUDUL : PENGARUH TEMPERATUR, PH DAN WAKTU
KONTAK TERHADAP KONVERSI
AMMONIUM DIURANAT PADA PROSES
PENGENDAPAN LARUTAN URANIL NITRAT

DISUSUN OLEH :

NAMA/NIM : PRILLIA PUTRI BERYA/1512043
SEPTY MAULYDIA RIZAL/1512066

PROGRAM STUDI : TEKNIK KIMIA POLIMER

Telah diperiksa dan disetujui untuk diajukan dan dipertahankan
dalam sidang Tugas Akhir Politeknik STMI Jakarta
Kementerian Perindustrian Republik Indonesia

Mengetahui,
Ketua Program Studi
Teknik Kimia Polimer

Menyetujui,
Dosen Pembimbing

Ir. Roosmariharso, MBA
NIP. 195405231980031004

Dr. Erfina Oktariani, ST, MT
NIP.198210012014022001

LEMBAR PENGESAHAN
POLITEKNIK STMI JAKARTA
d.h. SEKOLAH TINGGI MANAJEMEN INDUSTRI
KEMENTERIAN PERINDUSTRIAN REPUBLIK INDONESIA

JUDUL : PENGARUH TEMPERATUR, PH DAN WAKTU
KONTAK TERHADAP KONVERSI
AMMONIUM DIURANAT PADA PROSES
PENGENDAPAN LARUTAN URANIL NITRAT

DISUSUN OLEH :

NAMA/NIM : PRILLIA PUTRI BERYA/1512043
SEPTY MAULYDIA RIZAL/1512066

PROGRAM STUDI : TEKNIK KIMIA POLIMER

Telah Diuji oleh Tim Penguji Sidang Tugas Akhir
Program Studi Teknik Kimia Polimer
Politeknik STMI Jakarta pada hari Jumat, 19 Agustus 2016

Jakarta, 22 Agustus 2016

Pembimbing,

Dr. Erfina Oktariani, ST, MT
NIP.198210012014022001

Penguji,

Penguji,

Dr. Ir. Agus Mundiyo
NIP. 195403281982031003

Ir. Parulian Leonard M, MM
NIP. 195702141985031002

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya Mahasiswa Program Studi Teknik Kimia Polimer, Politeknik STMI Jakarta
Kementerian Perindustrian Republik Indonesia:

Nama : Prillia Putri Berya
NIM : 1512043
Program Studi : Teknik Kimia Polimer

Dengan ini menyatakan bahwa hasil karya Tugas Akhir yang saya buat dengan judul:

PENGARUH TEMPERATUR, PH DAN WAKTU KONTAK TERHADAP KONVERSI AMMONIUM DIURANAT PADA PROSES PENGENDAPAN LARUTAN URANIL NITRAT

- Dibuat dan diselesaikan sendiri menggunakan literatur hasil kuliah, survei lapangan, bimbingan dengan dosen pembimbing dan pembimbing di tempat saya melakukan penelitian, melalui tanya jawab maupun asistensi serta buku-buku jurnal acuan yang tertera dalam referensi pada Tugas Akhir ini.
- Bukan merupakan duplikasi yang sudah dipublikasikan atau yang pernah dipakai untuk mendapatkan gelar sarjana di Universitas/Perguruan Tinggi lain, kecuali pada bagian-bagian tertentu digunakan referensi pendukung untuk melengkapi informasi.
- Bukan merupakan karya tulis terjemahan dari kumpulan buku atau jurnal acuan yang tertera dalam referensi pada karya Tugas Akhir saya.

Bila terbukti saya tidak memenuhi apa yang telah saya nyatakan seperti yang tertera diatas, karya Tugas Akhir saya ini dibatalkan.

Jakarta, 26 Juli 2016

Yang Membuat Pernyataan

PRILLIA PUTRI BERYA

LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya Mahasiswa Program Studi Teknik Kimia Polimer, Politeknik STMI Jakarta
Kementerian Perindustrian Republik Indonesia:

Nama : Septy Maulydia Rizal

NIM : 1512066

Program Studi : Teknik Kimia Polimer

Dengan ini menyatakan bahwa hasil karya Tugas Akhir yang saya buat dengan judul:

PENGARUH TEMPERATUR, PH DAN WAKTU KONTAK TERHADAP KONVERSI AMMONIUM DIURANAT PADA PROSES PENGENDAPAN LARUTAN URANIL NITRAT

- Dibuat dan diselesaikan sendiri menggunakan literatur hasil kuliah, survei lapangan, bimbingan dengan dosen pembimbing dan pembimbing di tempat saya melakukan penelitian, melalui tanya jawab maupun asistensi serta buku-buku jurnal acuan yang tertera dalam referensi pada Tugas Akhir ini.
- Bukan merupakan duplikasi yang sudah dipublikasikan atau yang pernah dipakai untuk mendapatkan gelar sarjana di Universitas/Perguruan Tinggi lain, kecuali pada bagian-bagian tertentu digunakan referensi pendukung untuk melengkapi informasi.
- Bukan merupakan karya tulis terjemahan dari kumpulan buku atau jurnal acuan yang tertera dalam referensi pada karya Tugas Akhir saya.

Bila terbukti saya tidak memenuhi apa yang telah saya nyatakan seperti yang tertera diatas, karya Tugas Akhir saya ini dibatalkan.

Jakarta, 26 Juli 2016

Yang Membuat Pernyataan

SEPTY MAULYDIA RIZAL

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa karena berkat rahmat dan anugerah-Nya penulis dapat melaksanakan serta menyelesaikan laporan penelitian ini. Penulisan laporan ini merupakan salah satu syarat kelulusan di Jurusan Teknik Kimia Polimer Politeknik STMI Jakarta. Laporan ini disusun berdasarkan penjelasan, pengarahan dan pengamatan langsung di lapangan dari tanggal 1 Februari sampai 31 Maret 2016.

Selama pelaksanaan penelitian maupun pembuatan laporan, penyusun mendapat bantuan serta dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu pada kesempatan ini, penyusun mengucapkan terima kasih kepada:

1. Kedua orang tua dan keluarga yang telah memberikan doa dan dukungan, perhatian serta kasih sayang yang tulus.
2. Bapak Ir. Roosmariharso, MBA sebagai Ketua Program Studi Teknik Kimia Polimer
3. Ibu Dr. Erfina Oktariani, ST, MT selaku dosen pembimbing tugas akhir penelitian yang telah meluangkan waktunya untuk membantu dan memberikan masukan-masukan selama melaksanakan penelitian dan pembuatan laporan.
4. Ibu Torowati dan Bapak Ngatijo yang telah memberikan waktu dan arahan selama kami berada di PTBBN-BATAN SERPONG.
5. Segenap pihak yang telah membantu dalam pelaksanaan dan penyusunan laporan penelitian yang tidak dapat kami sebutkan satu persatu.

Penulis menyadari dalam penulisan laporan ini belum mencapai kesempurnaan, oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan petunjuk dari berbagai pihak. Akhir kata semoga laporan ini dapat bermanfaat bagi pembaca umumnya dan penulis khususnya.

Jakarta, 18 Juni 2016

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN PEMBIMBING LAPANGAN PENELITIAN	ii
LEMBAR PERSETUJUAN DOSEN PEMBIMBING.....	iii
LEMBAR PENGESAHAN	iv
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
LEMBAR PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	vi
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL.....	x
DAFTAR GAMBAR	xi
ABSTRAK.....	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Energi Nuklir dan Teknologinya.....	4
2.2 Bahan Bakar Nuklir.....	9
2.3 Siklus Daur Bahan Bakar Nuklir.....	11
2.4 Industri Bahan Bakar Nuklir Di Dunia	28
2.5 Reaktor Nuklir.....	31
2.6 Uranium	44
2.7 Ammonium Diuranat	47
2.8 Ammonium hidroksida	48
2.9 Uranyl Nitrat	50
2.10 Prospek PLTN di Indonesia.....	50
BAB III METODE PENELITIAN	52
3.1 Variabel Penelitian	52
3.2 Preparasi Sampel	52
3.3 Langkah-langkah Penelitian.....	53
3.4 Jadwal Penelitian.....	57
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	59
4.1 Pengaruh pH pada proses Pengendapan UN Menjadi ADU	59

4.2 Pengaruh Temperatur pada Proses Pengendapan UN Menjadi ADU	61
4.3 Pengaruh Waktu Kontak pada Proses Pengendapan UN Menjadi ADU	63
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	65
5.1 Kesimpulan	65
5.2 Saran.....	65
DAFTAR PUSTAKA	66
LAMPIRAN A.....	68
LAMPIRAN B	70

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan biaya energi di beberapa Negara	11
Tabel 2.2 Kandungan maksimal impuritas dalam uranil nitrat	16
Tabel 2.3 Kandungan maksimum impuritas dalam serbuk U_3O_8	19
Tabel 2.4 Kadar maksimum unsur pengotor dalam UO_2	20
Tabel 2.5 Spesifikasi Reaktor Kartini, TRIGA dan RSG-GAS	32
Tabel 2.6 <i>Radioactive Properties of Key Uranium Isotopes</i>	45
Tabel 2.7 Karakteristik Uranium	46
Tabel 2.8 Karakteristik Ammonium Diuranat	48
Tabel 2.9 Karakteristik Ammonium Hidrosida	48
Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian	58
Tabel 4.1 Kondisi Operasi pada Variasi pH	59
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Pengaruh pH Terhadap ADU	59
Tabel 4.3 Kondisi Operasi pada Variasi Temperatur	61
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Pengaruh Temperatur Terhadap ADU	61
Tabel 4.5 Kondisi Operasi pada Variasi Waktu Kontak	62
Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Pengaruh Waktu Kontak Terhadap ADU	63

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Reaksi fisi dan fusi.....	4
Gambar 2.2 Siklus daur bahan nuklir.....	12
Gambar 2.3 Skema Dasar Reaktor Nuklir.....	36
Gambar 2.4 Diagram PLTN Jenis PWR	38
Gambar 2.5 Sistem Penghalang Ganda (<i>Multiple Barrier</i>).....	39
Gambar 2.6 Skema Pengelolaan Limbah Radioaktif.....	42
Gambar 2.7 Penyimpanan Lestari Limbah Radioaktif.....	43
Gambar 2.8 Uranium Alam	45
Gambar 2.9 Ammonium diuranat dalam bentuk padatan dan serbuk.....	48
Gambar 2.10 Larutan ammonium hidroksida.....	49
Gambar 3.1 Diagram Konsep Desain Penelitian	52
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian	54
Gambar 3.3 Diagram alir analisa kadar uranium pada larutan UN.....	55
Gambar 3.4 Diagram alir analisa kadar keasaman pada larutan UN	56
Gambar 3.5 Diagram alir proses pengendapan ADU	56
Gambar 3.6 Diagram alir analisa kadar uranium pada filtrat ADU.....	57
Gambar 4.1 Pengaruh pH terhadap ADU.....	60
Gambar 4.2 Pengaruh suhu terhadap ADU	61
Gambar 4.3 Pengaruh waktu kontak terhadap ADU.....	63

ABSTRAK

Energi nuklir yang dihasilkan di dalam inti atom melalui dua buah jenis reaksi, yaitu reaksi fusi dan reaksi fisi. Energi yang dihasilkan dari reaksi fisi dapat dikonversi menjadi energi listrik pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) dengan bahan bakar uranium oksida, umumnya adalah uranium dioksida (UO_2). Penelitian ini dilakukan untuk mencari pengaruh parameter pada proses pengendapan uranyl nitrat menjadi ammonium diuranat, yang merupakan salah satu tahapan dalam pembuatan bahan bakar nuklir. Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahap: analisa kadar uranium dalam larutan uranyl nitrat (UN), analisa kadar keasaman, proses pengendapan dan analisa kadar uranium dalam filtrat. Variasi parameter yang dilakukan adalah variasi temperatur 40, 50, 60, 70 dan 80°C, variasi pH antara 4, 5, 6, 7 dan 8 dan variasi waktu kontak antara 0, 15, 30, 45 dan 60 menit. Pada proses analisa kadar uranium pada spesimen (larutan UN) menggunakan alat Mettler Toledo dengan metode titrasi. Pada proses analisa kadar keasaman pada spesimen (larutan UN) menggunakan alat *titro processor* dengan metode titrasi. Pada proses pengendapan menggunakan alat *hot plate and stirrer* dengan temperatur $\pm 200^\circ C$ dan penambahan larutan NH_4OH untuk mempercepat proses pengendapan. Pada proses analisa kadar uranium pada filtrat hasil saringan setelah proses pengendapan menggunakan alat Mettler Toledo dengan metode titrasi. Berdasarkan hasil analisa diperoleh bahwa variasi temperatur dan pH pada proses pengendapan memberikan pengaruh yang sangat kecil karena menghasilkan konversi ADU yang tidak jauh berbeda (10^{-5}), sedangkan pada variasi waktu kontak tidak memberikan pengaruh pada konversi ADU. Kemudian kondisi terbaik pada proses pengendapan uranyl nitrat menjadi ammonium diuranat (ADU) yaitu pada kondisi temperatur 70°C dengan persentase 99,997%, pH 7 dengan persentase 99,996% dan waktu kontak 15 menit dengan presentase 99,997%.

Kata kunci: Bahan bakar nuklir, proses pengendapan, UN, NH_4OH , ADU dan filtrat.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar belakang

Kecepatan pertumbuhan penduduk, kecepatan pertumbuhan sektor industri, serta kecepatan pertumbuhan ekonomi menyebabkan kebutuhan akan energi listrik dari tahun ke tahun meningkat pesat. Permintaan kebutuhan energi listrik terbesar berada pada sektor industri. Untuk memenuhi segala kebutuhan energi listrik tersebut akan sulit jika hanya mengandalkan pembangkit listrik dengan bahan bakar minyak bumi dan batu bara yang semakin lama ketersediaannya semakin terbatas [1]. Selain itu, pembangkit listrik dengan bahan bakar batubara, minyak dan gas mempunyai potensi yang dapat menimbulkan dampak lingkungan dan masalah transportasi bahan bakar dari tambang menuju lokasi pembangkitan. Dampak lingkungan akibat pembakaran bahan fosil tersebut dapat berupa CO₂ (karbon dioksida), SO₂ (sulfur dioksida) dan NO_x (nitrogen oksida), serta debu yang mengandung logam berat. Kekhawatiran terbesar dalam pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil adalah dapat menimbulkan hujan asam dan peningkatan pemanasan global [3]. Salah satu langkah penting untuk memenuhi kebutuhan energi listrik ini adalah dengan mencari sumber energi alternatif dengan memperhatikan beberapa aspek antara lain aspek ekonomi, aspek keselamatan, aspek sosial, aspek ekonomi dan aspek lingkungan [4].

Salah satu sumber energi alternatif non-minyak yang mempunyai teknologi ramah lingkungan yang dipilih adalah energi nuklir, namun pembangunannya perlu persiapan yang matang dan lama, karena memerlukan sistem keselamatan dan keamanan yang canggih, serta memerlukan ilmu pengetahuan dan teknologi yang tinggi agar tidak menimbulkan masalah besar pada masa pra-operasi, operasi, dan pasca operasi atau penonaktifan (*decommissioning*) [5]. Kebijakan yang diambil dalam memilih energi nuklir tidak hanya berkaitan secara teknologi yang komersial dan kompetitif secara *market* ekonomi, akan tetapi sudah menjadi sebuah kebijakan negara dan bahkan sudah

menjadi sebuah kebijakan global tingkat dunia dalam penerapannya. Namun perlu disadari bahwa tenaga nuklir saat ini merupakan pilihan yang sulit karena menyangkut penerimaan masyarakat (*public acceptance*) dalam hubungannya dengan resiko kecelakaan yang fatal, sampah yang berbahaya dan perlu penanganan khusus. Juga adanya pendapat mengenai energi nuklir yang identik dengan senjata dan peperangan. Seperti bom Hiroshima dan Nagasaki, atau berhubungan kecelakaan dan radiasi nuklir seperti di Chernobyl (Ukraina) dan Three Mile Island (USA). Pendapat masyarakat akan bahaya senjata nuklir yang digunakan dalam peperangan sudah tidak relevan dengan perkembangan saat ini jika dijadikan sebagai alasan untuk tidak menggunakan teknologi nuklir. Karena pada dasarnya senjata nuklir sangat berbeda dengan reaktor nuklir. Bukan hanya tujuan di bangunnya akan tetapi secara teknis, teknologi dan pengembangannya pun akan berbeda [2].

Di Indonesia, uranium sebagian besar terdapat di Kalimantan Barat, tepatnya di Kalan (meliputi luas daerah 20 km²). Taksiran cadangan total dapat mencapai deposit sekitar 10.000 ton U₂O₃, belum lagi ditambah dari daerah-daerah lain di Indonesia, seperti beberapa lokasi di Sumatera Utara dan Papua. Uranium biasanya ditemukan hampir di semua jenis batuan dalam kerak bumi terutama batuan asam seperti granit, dengan kadar 3-4 gram dalam satu ton batuan [5].

Penelitian mengenai bahan bakar nuklir ini sudah pernah dilakukan oleh Jan Setiawan (2011) yang menggunakan SEM menunjukkan bahwa temperatur pengendapan ADU pada 70°C, diperoleh ukuran partikel serbuk uranium oksida yang terbentuk mendekati nilai yang dipersyaratkan (ASTM C753-99) sebagai serbuk yang mampu sinter [8]. Sejauh ini penelitian yang sudah dilakukan sudah sangat berkembang karena pada penelitian ini sangat mempengaruhi proses pengendapan Ammonium diuranat (ADU). Hal ini bertujuan untuk menganalisis parameter untuk mendapatkan hasil yang optimum.

Proses pengendapan larutan uranyl nitrat (UN) menjadi ammonium diuranat (ADU) menarik untuk diteliti. Karena proses pengendapan ini merupakan tahapan proses yang sangat menentukan dalam pembentukan sifat-sifat fisis UO₂.

Pada proses pengendapan ini larutan uranil nitrat diendapkan dengan menggunakan larutan ammonium hidroksida (NH_4OH) sehingga menjadi ammonium diuranat (ADU), dengan menggunakan metode pengendapan dalam skala *batch*. Parameter yang dilakukan dalam penelitian ini adalah suhu, pH, dan waktu kontak. Selain itu, perlu dilakukan juga optimasi parameter pH dan waktu pengendapan agar diperoleh kondisi parameter optimal untuk memperoleh serbuk UO_2 . Maka hal ini bertujuan untuk melakukan penelitian kembali untuk menganalisis parameter untuk mendapatkan hasil yang optimum.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang diangkat pada penelitian ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh temperatur, pH dan waktu kontak terhadap konversi ammonium diuranat pada proses pengendapan larutan uranil nitrat?
2. Bagaimana mendapatkan kondisi terbaik pada proses pengendapan uranil nitrat untuk mendapatkan ammonium diuranat (ADU)?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk:

1. Mengetahui pengaruh temperatur, pH dan waktu kontak terhadap konversi ammonium diuranat pada proses pengendapan larutan uranil nitrat.
2. Mendapatkan hasil kondisi terbaik pada proses pengendapan uranil nitrat menjadi ammonium diuranat (ADU).

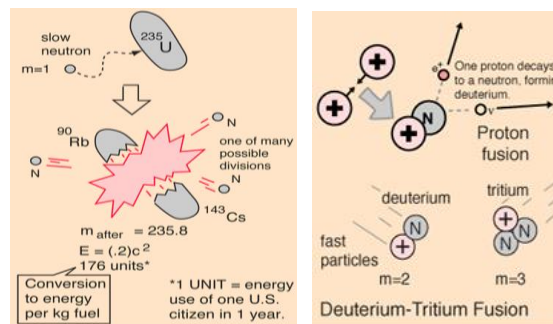
1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang dapat diperoleh dari penelitian ini yaitu dapat memberikan informasi tambahan mengenai proses pengendapan uranil nitrat menjadi ammonium diuranat yang merupakan salah satu tahap dalam pembuatan bahan bakar nuklir.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Nuklir dan Teknologinya

Energi nuklir adalah sebutan untuk bentuk energi yang dihasilkan melalui reaksi inti, baik itu reaksi fisi (pemisahan) maupun reaksi fusi (penggabungan). Sumber energi nuklir yang paling sering digunakan untuk PLTN adalah sebuah unsur radioaktif yang bernama Uranium.



(a) Reaksi Fisi

(b) Reaksi Fusi

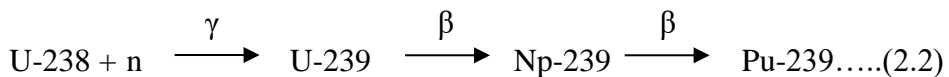
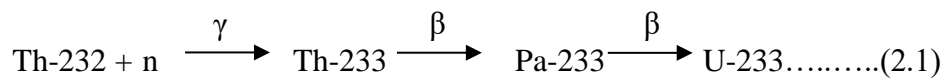
Gambar 2.1 Reaksi fisi dan fusi

Sumber: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu>

Gambar 2.1 memperlihatkan perbedaan antara reaksi fisi dan fusi. Reaksi fusi adalah suatu reaksi yang menggabungkan beberapa partikel atomik menjadi sebuah partikel atomik yang lebih berat. Sedangkan reaksi fisi merupakan kebalikan dari reaksi fusi, yaitu reaksi yang membelah suatu partikel atomik menjadi beberapa partikel atomik lainnya dan menghasilkan sejumlah energi yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi listrik. Salah satu contoh dari reaksi fisi adalah reaksi fisi pada partikel uranium-235 (U-235) yang ditumbuk oleh sebuah neutron lambat. Proses penumbukan atom uranium-235 oleh neutron mengakibatkan terbentuknya partikel uranium-236 (U-236) yang tidak stabil sehingga terbelah menjadi partikel krypton-92 (Kr-92), barium-141 (Ba-141), dan beberapa neutron bebas serta sejumlah energi. Reaksi fisi dapat berlangsung secara terus menerus yang biasa disebut dengan reaksi rantai. Dalam reaksi rantai, neutron yang telah terhambur dari reaksi fisi dapat mengakibatkan terjadinya reaksi fisi lain yang sama baiknya dengan reaksi fisi sebelumnya. Energi yang dihasilkan dari reaksi ini dapat dikonversi menjadi energi listrik pada sebuah

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) [11].

Pada PLTN, bahan bakar sebuah reaktor nuklir berupa uranium oksida. Bahan bakar nuklir merupakan salah satu komponen penunjang utama untuk beroperasinya suatu reaktor nuklir baik reaktor daya maupun reaktor penelitian. Suatu bahan bakar nuklir dapat digunakan sebagai bahan bakar apabila bahan tersebut dapat melakukan reaksi pembelahan (reaksi fisi). Hanya ada tiga macam isotop yang dapat melakukan reaksi pembelahan yaitu U-235, U-233, dan Pu-239, namun hanya isotop U-235 saja yang terdapat di alam dengan kadar sekitar 0,7% dari uranium alam, sedangkan isotop U-233 dan Pu-239 adalah isotop-isotop buatan yang diperoleh dari Th-232 dan U-238 yang ditumbuk oleh neutron sambil memancarkan photon gamma γ dan sinar beta β . Reaksi pembentukannya adalah:



Penelitian dalam pengembangan bahan bakar nuklir di Indonesia ini salah satunya adalah bertujuan dalam membantu pembangunan PLTN Indonesia, hal tersebut didasarkan pada kebutuhan energi selain batu bara yang jumlahnya kian menipis di dunia. Selain itu juga diharapkan dapat menjadi solusi dari dampak-dampak negatif yang diakibatkan dalam proses pemanfaatan batu bara sebagai sumber energi, seperti polusi udara dan pemanasan global. Keuntungan PLTN dibandingkan dengan pembangkit daya utama lainnya adalah:

1. Tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca.
2. Tidak mencemari udara karena tidak menghasilkan gas-gas berbahaya seperti karbon monoksida, sulfur dioksida, aerosol, merkuri, nitrogen oksida, partikulat atau asap fotokimia.
3. Sedikit menghasilkan limbah padat.
4. Biaya bahan bakar rendah.
5. Ketersediaan bahan bakar yang melimpah karena sangat sedikit bahan bakar yang diperlukan [11, 12].

Nuklir adalah energi yang murah untuk dihasilkan, hal ini yang

membuatnya menjadi energi alternatif yang luar biasa. Kemampuan satu gram uranium dalam menghasilkan energi listrik setara dengan satu ton batu bara, biaya yang relatif mahal dalam energi nuklir adalah dalam hal konstruksi dari PLTN. Namun PLTN tetap merupakan pembangkit listrik yang paling ekonomis karena biaya pengoperasian dan bahan bakarnya jauh lebih murah dibandingkan dengan sumber energi lainnya [11].

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) menyediakan sekitar 17 persen dari total tenaga listrik dunia. Beberapa negara membutuhkan tenaga nuklir yang lebih besar dari negara lain. Berdasarkan *International Atomic Energy Agency* (IAEA) 75 persen tenaga listrik yang berada di Negara Perancis dihasilkan oleh reaktor nuklir. Jumlah pembangkit tenaga listrik di dunia diperkirakan lebih dari 400 buah dengan 100 buah diantaranya berada di Amerika Serikat [11].

Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pembangunan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) di Indonesia adalah:

1. Aspek Keselamatan

Aspek keselamatan yang digunakan agar beroperasi secara aman dan terkendali, teknologi nuklir harus mempunyai standar keselamatan yang sangat tinggi. Karena Keselamatan merupakan hal yang paling diutamakan dalam pemanfaatan teknologi nuklir, sehingga bahaya radiasi dapat ditekan serendah mungkin.

2. Pemilihan Teknologi

Dalam pemilihan teknologi terdapat beberapa pilihan diantaranya yaitu PWR (*Pressurized Water Reactor*, reaktor air ringan bertekanan tinggi), BWR (*Boiling Water Reactor*, reaktor air ringan mendidih), PHWR (*Presurized Heavy Water Reactor*, reaktor air bertekanan tinggi). Dari ketiga teknologi tersebut merupakan teknologi modern yang memenuhi persyaratan standar keselamatan internasional *International Atomic Energy Agency* (IAEA) dan di dalam desainnya menyertakan *human factor engineering* sehingga dapat menjamin kemudahan operasi, kemudahan operator berinteraksi dan aman terhadap kesalahan operator.

3. Studi Ekonomi Energi dan Pendanaan dalam Studi Kelayakan.

Studi ini diklasifikasikan menjadi 5 kelompok yaitu:

a. *National Energy Market Analysis*

Dari studi ini diketahui bahwa kebutuhan energi listrik akan terus meningkat seiring dengan pertumbuhan penduduk yang cukup tinggi sebesar 10,3% per tahun pada dekade 1990-2000, sebesar 9,6% per tahun pada dekade 2000-2010 dan 8,3% per tahun pada dekade 2010-2019.

b. *Nuclear Cost Estimate*

Tujuan dari studi *nuclear cost estimate* adalah untuk mendapatkan estimasi mengenai rincian biaya pembangkit listrik tenaga nuklir yang didasarkan atas informasi dari pemasok (*vendor*), Data-data yang diperoleh akan dipergunakan untuk menghitung besarnya biaya pembangkitan listrik. Besarnya biaya modal (*vendors budgetary estimate*) PLTN dari berbagai jenis dan ukuran (600-1000 MWe) adalah berkisar antara 1530-2200 US\$/kWe, sedang estimasi biaya dekomisioning adalah sekitar 10% dari biaya modal.

c. *Electric System Analysis dan Choice of Unit Size*

Studi ini bertujuan untuk menentukan konfigurasi optimum sistem pembangkit listrik Jawa-Bali dengan introduksi PLTN, berikut ukuran dan ciri-ciri utamanya. Pemilihan daya PLTN mempertimbangkan kemampuan sistem jaringan listrik dalam hubungannya dengan aliran beban, hubungan singkat, serta stabilitas jaringan. Namun untuk mengantisipasi perkembangan kebutuhan energi listrik yang besar di masa mendatang, perlu dilakukan studi pemutakhiran sistem jaringan listrik.

d. *Generation Cost*

Dalam studi kelayakan, perhitungan biaya pembangkitan (*generation cost*) dilakukan dengan tujuan untuk menentukan biaya Pembangkitan Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) untuk berbagai jenis dan ukuran. Metodologi yang dipergunakan adalah dengan menghitung seluruh komponen biaya pembangkit listrik selama operasinya yang dinyatakan pada tahun acuan dan mata uang tertentu (misalnya dollar US) dibagi dengan jumlah energi listrik yang dihasilkan selama umur produktifnya. Komponen biaya yang

diperhitungkan meliputi biaya modal, biaya operasi dan perawatan, biaya bahan bakar dan khusus untuk PLTN ditambah lagi dengan biaya *decommissioning*.

e. Pendanaan

Studi pendanaan bertujuan untuk mendapatkan berbagai cara dan sumber pendanaan yang layak untuk dapat diterapkan dalam proyek pembangunan PLTN di Indonesia. Hasil yang diperoleh memperlihatkan bahwa: Pembangunan unit-unit PLTN 600 dan 900 Mwe dengan pola pendanaan konvensional tetap memenuhi kriteria biaya pembangkitan terendah, sesuai dengan jadwal yang digunakan dalam studi ini dan pola pendanaan *modified Build Own Operate* (BOO) diperkirakan akan lebih ekonomis dan mantap dibandingkan pola BOO murni.

4. Teknologi Daur Bahan Bakar Nuklir

Tujuan dari teknologi ini adalah melakukan evaluasi terhadap daur bahan bakar nuklir, perhitungan ekonomi dan strategi pengembangan daur bahan bakar nuklir di Indonesia. Sebagai hasilnya dapat dikemukakan bahwa daur terpilih adalah daur terbuka untuk jangka waktu tertentu dan pabrik elemen bakar reaktor daya, layak untuk diintegrasikan secara domestik, serta uranium produksi domestik dijadikan sebagai pasokan tambahan.

5. Teknologi Pengelolaan Limbah Radioaktif

Bidang ini mencakup evaluasi pengelolaan limbah radioaktif dan kegiatan *decommissioning* PLTN di Indonesia dengan lingkup kajian tentang: jenis, jumlah dan proses pembentukan limbah, aspek teknis, ekonomis dan keselamatan pengelolaan limbah PLTN.

6. Manajemen

Tingkat partisipasi nasional untuk pembangunan PLTN tahap I dapat mencapai sebesar 25% dan akan terus meningkat secara bertahap menjadi sebesar 30%, 35% dan 60% masing-masing pada tahap pembangunan PLTN ke II, III, dan IV dan akan optimal pada tahap pembangunan ke V. Hal ini menunjukkan bahwa melalui program partisipasi nasional dalam pembangunan PLTN di Indonesia, maka proses alih teknologi canggih akan

dapat meningkat dan partisipasi nasional tersebut juga akan memacu industri nasional dalam meningkatkan daya saing dan penguasaan industri berteknologi tinggi dalam rangka menyongsong era globalisasi.

7. Lingkungan

PLTN tidak menghasilkan asap atau debu hasil pembakaran lewat cerobong, ataupun tidak membuang abu dan zat berbahaya seperti: logam berat (Cd, Pb, As, Hg, V), SO₂, NO_x, dan CO₂ ke lingkungan. Sampah radioaktif ditampung, di mampatkan volumenya, kemudian disimpan sementara (puluhan tahun) di dalam wilayah PLTN itu sendiri, karena volumenya relatif kecil. Penggunaan PLTN dapat mengurangi pemanfaatan sumber daya fosil yang semakin lama semakin terbatas. Melalui program pembangunan PLTN kita dapat menyediakan listrik bersih dan PLTN juga dapat membatasi dan mengurangi secara bertahap pembebasan CO₂ ke atmosfer yang menjadi penyebab pemanasan global [13].

2.2 Bahan Bakar Nuklir

Bahan bakar nuklir adalah semua jenis material yang dapat digunakan untuk menghasilkan energi nuklir, demikian bila dianalogikan dengan bahan bakar kimia yang dibakar untuk menghasilkan energi. Hingga saat ini, bahan bakar nuklir yang umum dipakai adalah unsur berat fissil yang dapat menghasilkan reaksi nuklir berantai di dalam reaktor nuklir; Bahan bakar nuklir dapat juga berarti material atau objek fisik (sebagai contoh *bundle* bahan bakar yang terdiri dari batang bahan bakar yang disusun oleh material bahan bakar, bisa juga dicampur dengan material struktural, material moderator atau material pemantul (*reflector*) neutron. Bahan bakar nuklir fissil yang seirng digunakan adalah ²³⁵U dan ²³⁹Pu, dan kegiatan yang berkaitan dengan penambangan, pemurnian, penggunaan dan pembuangan dari material-material ini termasuk dalam siklus bahan bakar nuklir. Siklus bahan bakar nuklir penting adanya karena terkait dengan PLTN dan senjata nuklir [14].

Tidak semua bahan bakar nuklir digunakan dalam reaksi fisi berantai. Sebagai contoh, ²³⁸Pu dan beberapa unsur ringan lainnya digunakan untuk menghasilkan sejumlah daya nuklir melalui proses peluruhan

radioaktif dalam generator radiothermal, dan baterai atom. Isotop ringan seperti ^3H (tritium) digunakan sebagai bahan bakar fusi nuklir. Bila melihat pada energi ikat pada isotop tertentu, terdapat sejumlah energi yang bisa diperoleh dengan memfusikan unsur-unsur dengan nomor atom lebih kecil dari besi, dan memfisikan unsur-unsur dengan nomor atom yang lebih besar dari besi [14].

2.2.1 Sifat-sifat Nuklir Dalam Memenuhi Kebutuhan Energi

Sifat-sifat nuklir dalam memenuhi kebutuhan energi yaitu energi alam yang paling fundamental, konsentrasi energi sangat tinggi yaitu berkisar antara:

- 1 g U-235 = 3.000.000 g batubara (fisika/teori)
- 1 g U-235 = 100.000 g batubara (teknologi 90-an)
- 1 g PU = 1.000.000 g batubara (teknologi 90-an)

Bersifat intensif teknologi, tidak intensif sumber daya alam, reaktor nuklir tidak bisa meledak karena pengkayaan Uranium-235 kurang dari 20%, adanya zat struktural: SS, Zr. Adanya zat pendingin H_2O , adanya racun neutron yang kuat, batang kendali (HF, B, SS). Volume limbah kecil, mudah dikumpulkan, diproses dan disimpan (diisolasi dari lingkungan manusia), pembelahan melalui reaksi inti dengan neutron tidak menimbulkan polutan organik (sebaliknya batubara dibakar dengan oksigen, menimbulkan polutan organik dan non organik: SO_x , NO_x , dan lain-lain yang berbahaya bagi kesehatan). Polusi radiasi mudah diatasi dengan perisai dan sistem keselamatan lain, bahan bakar bersifat kuasi-domestik (mudah diperoleh dipasar internasional dan dapat ditimbun), sumber daya energi nuklir mampu memasok energi dengan skala besar dan untuk jangka panjang.

2.2.2 Perbandingan Energi

Perbedaan energi nuklir dengan energi lain yaitu densitas energi nuklir sangat tinggi, lebih tinggi dibandingkan dengan batu bara ataupun minyak bumi: 1 kg uranium dapat menghasilkan energi listrik sebesar 50.000 kWh bahkan dengan proses lebih lanjut dapat mencapai 3.500.000 kWh, 1 kg batu bara menghasilkan energi sebesar 3 kWh, 1 kg minyak bumi hanya dapat menghasilkan energi sebesar 3 kWh 4 kWh. Pada sebuah pembangkit listrik non-nuklir berkapasitas 1000 MWe diperlukan bahan bakar yaitu 2.600.000 ton batu bara atau 2.000.000

ton minyak bumi. Pada pembangkit listrik tenaga nuklir dengan kapasitas listrik yang sama hanya memerlukan 30 ton uranium dengan teras reaktor 10 m³.

Tabel 2.1 Perbandingan Biaya Energi di Beberapa Negara

Negara	Nuklir	Bt. Bara	Gas
Firland	2.76	3.64	-
France	2.54	3.33	3.92
Germany	2.86	3.52	4.90
Switzerland	2.88	-	4.36
Netherlands	3.58	-	6.04
Czech Rep	2.30	2.94	4.97
Slovakia	3.13	4.78	5.59
Romania	3.06	4.55	-
Japan	4.80	4.95	5.21
Korea	2.34	2.16	4.65
USA	3.01	2.71	4.67
Canada	2.60	3.11	4.00

Sumber: BATAN

Beberapa Negara di dunia menggunakan nuklir, batu bara dan gas sebagai sumber bahan bakar tenaga listrik. Diantara ketiga bahan bakar tersebut dari sisi ekonomi ternyata nuklir lebih terjangkau, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.1.

2.3 Siklus Daur Bahan Bakar Nuklir

Daur bahan bakar nuklir merupakan rangkaian proses yang terdiri dari penambangan bijih uranium, pemurnian, konversi, pengayaan uranium dan konversi ulang menjadi logam uranium. Logam uranium selanjutnya diubah menjadi elemen bakar nuklir melalui proses fabrikasi. Bahan bakar nuklir kemudian dimasukkan ke dalam reaktor dan mengalami reaksi inti. Pada reaktor riset yang dimanfaatkan adalah neutron yang dihasilkan dalam reaksi inti, sedangkan pada reaktor daya atau PLTN yang dimanfaatkan adalah panas hasil fisi, yang digunakan untuk mengubah air menjadi uap yang kemudian menggerakkan turbin-generator sehingga menghasilkan listrik. Bahan bakar bekas dikeluarkan dari reaktor untuk didinginkan selama beberapa waktu, kemudian diangkut menuju fasilitas pengolahan ulang. Unsur uranium sisa pembakaran dan plutonium sebagai hasil belah dipisahkan untuk dimanfaatkan kembali. Rangkaian proses ini disebut daur bahan bakar nuklir [25].

akhir dari proses ini berupa konsentrat uranium oksida (U_3O_8) yang sering disebut kue kuning atau “*Yellow Cake*”, meskipun dalam banyak hal berwarna kecoklatan. Beberapa tambang uranium di Australia, Amerika Serikat, dan Kazakhstan menggunakan In Situ *Leaching* (ISL) untuk mengekstrak uranium secara langsung dari batuan di dalam tanah dan membawanya ke permukaan dalam bentuk larutan kaya uranium, yang kemudian diendapkan dan dikeringkan menjadi padatan uranium oksida. Teknik ini terutama digunakan untuk mengekstrak uranium yang terdapat dalam batuan di dalam tanah yang tidak ekonomis apabila dilakukan dengan teknik konvensional [24].

U_3O_8 merupakan produk komersial yang diperjual-belikan di pasar dunia. Sepuluh negara utama yang memproduksi uranium adalah Kanada, Australia, Kazakhstan, Nigeria, Rusia, Namibia, Afrika Selatan, Ukraina, Amerika Serikat, dan Uzbekistan. Kanada dan Australia memproduksi uranium hampir 50% dari total produksi dunia.

2.3.2 Pemurnian dan Konversi

Tahapan selanjutnya untuk pembuatan bahan bakar nuklir adalah proses pemurnian dan konversi *Yellow Cake* menjadi serbuk uranium dioksida (UO_2) berderajat nuklir. UO_2 tersebut kemudian dikonversi kembali ke dalam bentuk gas uranium hexafluoride (UF_6).

Untuk reaktor nuklir yang menggunakan bahan bakar uranium alam, yaitu reaktor yang mampu menghasilkan reaksi fisi berantai dengan bahan bakar uranium alam yang hanya mengandung 0,7% U-235, serbuk UO_2 hasil konversi *Yellow Cake* dapat langsung dikirim ke pabrik bahan bakar nuklir untuk diproses menjadi perangkat bakar nuklir yang siap digunakan di dalam reaktor. Sedangkan untuk reaktor nuklir yang hanya mampu menghasilkan reaksi fisi berantai dengan bahan bakar uranium diperkaya, serbuk UO_2 hasil proses konversi *Yellow Cake* perlu diubah ke bentuk gas UF_6 sebagai umpan proses pengayaan (proses peningkatan kadar U-235 dalam bahan bakar uranium) [25].

Proses konversi *Yellow Cake* menjadi UO_2 terdiri dari beberapa tahapan proses yaitu proses pelarutan, proses pemurnian, proses pengendapan, proses kalsinasi dan proses reduksi [25].

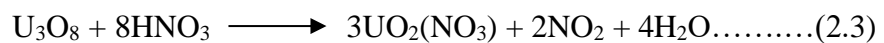
A. Proses Pelarutan

Proses pelarutan dimaksudkan untuk melarutkan uranium yang terdapat dalam *yellow cake* dengan asam nitrat (HNO_3) menjadi larutan Uranil Nitrat (UN) sehingga memudahkan proses pemisahan dengan pengotor-pengotornya melalui proses pemurnian.

Uranium dalam fase padat (*Yellow Cake* atau Gagalan) dilarutkan dalam tangki pelarutan dengan asam nitrat (HNO_3). Sejumlah bahan baku *yellow cake* digerus dan diayak, kemudian diumpankan ke dalam tangki pelarutan yang berisi HNO_3 panas melalui corong pengumpan.

Larutan asam nitrat dipanaskan dalam uap panas (*steam*) dan bila tekanan dalam tangki pelarutan terlalu tinggi, maka penyaluran uap panas ke tangki pelarutan dihentikan, diganti air pendingin hingga suhu tangki pelarutan turun sampai 40°C [9].

Reaksi pelarutan akan berlangsung beberapa jam dan reaksi dinyatakan selesai bila petunjuk densitas menunjukkan harga yang tetap (harga konstan). Persamaan reaksi pada proses pelarutan:



Selama reaksi berlangsung akan menghasilkan gas NO_2 dan bereaksi dengan oksigen dan diserap air hingga terbentuk asam nitrat. Persamaan rekasinya:



Larutan uranil nitrat hasil pelarutan ditampung dalam tangki yang selanjutnya dilakukan pemisahan dengan endapannya sehingga diperoleh larutan uranil nitrat bersih dari lumpur kemudian dilanjutkan dengan proses pemurnian [9].

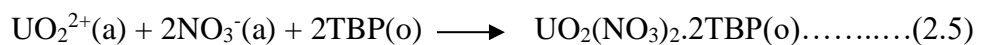
B. Proses Pemurnian

Proses pemurnian terdiri dari tiga proses yaitu:

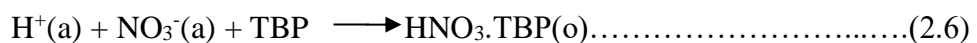
a. Ekstraksi

Proses pemurnian uranium yang umum dilakukan adalah dengan cara ekstraksi cair-cair dimana komponen yang akan diekstraksi maupun pelarutnya sama-sama berada dalam fase cair tetapi kedua cairan tersebut

tidak saling melarutkan antara cairan yang satu dengan yang lainnya. Pelarut harus bersifat selektif dan mempunyai daya ekstrak yang tinggi terhadap uranil nitrat namun masih dapat diekstraksi kembali dengan air atau asam nitrat encer. Pelarut yang banyak digunakan adalah tributil *phosphat* (TBP). Kelemahan-kelemahan TBP dapat diatasi dengan menambahkan bahan pengencer (diluen) untuk menurunkan berat jenis serta viskositas TBP sehingga waktu penguapannya menjadi semakin cepat. Bahan pengencer harus bersifat heterogen dengan air tetapi bersifat homogen dengan TBP. Disamping itu bahan pelarut juga harus bersifat inert terhadap bahan-bahan kimia dan tenaga reduksinya harus rendah. Pelarut yang biasa digunakan adalah kerosin. Proses ekstraksi dilakukan berulang-ulang untuk dapat menghasilkan senyawa uranium yang lebih banyak. Dalam proses ekstraksi diperoleh dua fase larutan UN-TBP (fase organik) dan rafinat (fase air). Rafinat merupakan kumpulan pengotor yang masih mengandung uranium, sehingga rafinat harus diekstraksi kembali agar rafinat benar-benar tidak lagi mengandung uranium. Efisiensi ekstraksi dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain kandungan asam bebas, konsentrasi TBP, waktu kontak, kecepatan pengadukan dan suhu. Semakin tinggi kandungan asam bebas di dalam larutan menyebabkan kompleks uranil nitrat dengan penambahan TBP yang terbentuk semakin banyak pula. Namun setelah tercapai keasaman tertentu, maka penambahan kadar keasaman dalam larutan akan menyebabkan terjadi reaksi pembentukan senyawa kompleks asam nitrat dengan penambahan TBP [9,25]. Reaksi pembentukan senyawa kompleks uranil nitrat dengan penambahan TBP adalah:



Reaksi pembentukan senyawa kompleks HNO₃.TBP adalah:



Dari hasil reaksi tersebut kadar TBP dalam *hexane* akan berpengaruh terhadap kemampuan pelarut untuk mengekstrak uranium. Semakin tinggi kadar TBP dalam *hexane*, maka kemampuan pelarut untuk mengekstrak uranium akan semakin tinggi tetapi densitas dan viskositas pelarut akan semakin besar juga.

Hal tersebut akan memperlambat waktu pengendapannya dan semakin mempersulit perpindahan massa. Kemampuan pelarut untuk mengekstrak uranium ke fase organik hanyalah terbatas hingga pada tingkat kejenuhan maksimum UN dalam fase organik [25].

b. Proses *Stripping*

Ekstrak hasil ekstraksi masih mengandung sejumlah pengotor yang menyertai uranium ke fase organik sehingga perlu dilakukan pencucian dengan ABM (Air Bebas Mineral) [25].

c. Proses re-ekstraksi

Proses re-ekstraksi merupakan kebalikan dari proses ekstraksi dimana uranium yang berada dalam fase organik akan diekstraksi kembali ke fase air dengan menggunakan Air Bebas Mineral (ABM), seperti ditunjukkan pada persamaan dibawah ini:



Batasan kandungan pengotor dalam uranil nitrat ditunjukkan pada Tabel 2.2 [25]:

Tabel 2.2 Kandungan Maksimal Impuritas dalam Uranil Nitrat

Unsur	Maksimal konsentrasi (ppm)	Unsur	Maksimal konsentrasi (ppm)
Boron	0.3	Molybdenum	200
Cadmium	0.2	Nickel	150
Gadalinium	0.1	Phosphorus	200
Alumunium	150	Silicon	200
Thorium	10	Tantalum	200
Chlorine+Fluorine	350	Calcium+Magnesium	150
Chromium	150	Manganese	200
Cobalt	80	Titanium	200
Cuprum	200	Tungsten	200
Ferri	200	Vanadium	200
Stanum	200	Zinc	200

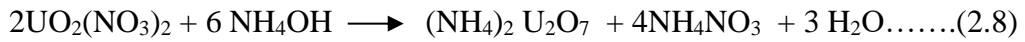
Sumber: BATAN

C. Proses Pengendapan

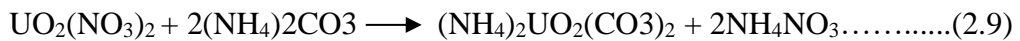
Senyawa uranium yang berada dalam bentuk larutan hasil dari pemurnian kemudian dikonversi ke bentuk padatan dengan cara pengendapan.

Proses pengendapan dapat dilakukan dengan beberapa cara, yaitu:

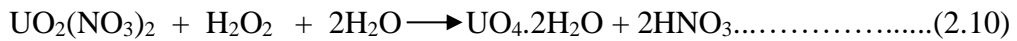
1. Uranium diendapkan sebagai ammonium diuranat (ADU) dengan pereaksi ammonium hidroksida NH_4OH .



2. Uranium diendapkan sebagai ammonium uranil karbonat (AUC) dengan pereaksi Ammonium karbonat $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$



3. Uranium diendapkan sebagai uranium peroksida (UO_4) dengan pereaksi hidrogen peroksida (H_2O_2)

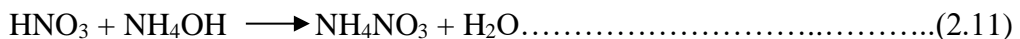


4. Uranium diendapkan sebagai uranil nitrat heksahidrat (UNH) dengan cara penguapan.

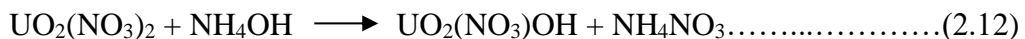
Proses pengendapan merupakan tahapan proses yang sangat menentukan dalam pembentukan karakter atau sifat – sifat fisis serbuk UO_2 . Masing – masing cara penengendapan akan menghasilkan serbuk UO_2 yang memiliki sifat fisis yang berbeda-beda.

Proses yang biasa dilakukan untuk memperoleh uranium dioksida (UO_2) yang mampu sinter (*sinterable*) adalah dengan cara Uranium diendapkan sebagai ammonium diuranat (ADU) dengan pereaksi ammonium hidroksida. Tahapan reaksi yang terjadi pada proses pengendapan uranium dengan NH_4OH adalah sebagai berikut:

- a. Penetralan asam bebas



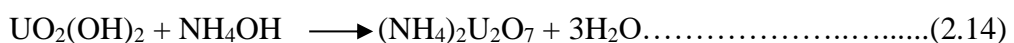
- b. Pembentukan larutan uranil nitrat hidroksida



- c. Pembentukan uranil hidroksida



- d. Pembentukan ammonium diuranat



Dalam proses pengendapan ada beberapa hal yang dapat mempengaruhi kualitas pengendapan antara lain pH, suhu reaksi dan waktu kontak. Derajat

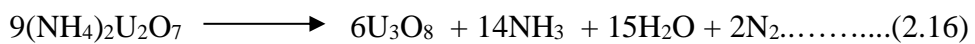
keasaman atau pH merupakan faktor yang sangat besar pengaruhnya dalam pengendapan. pH berpengaruh terhadap efisiensi pengendapan serta sifat-sifat endapannya. Suhu reaksi berpengaruh terhadap kecepatan reaksinya dimana semakin tinggi suhu reaksi, maka kecepatan reaksi akan semakin cepat. Waktu kontak atau waktu tinggal dalam reaktor berpengaruh terhadap jumlah endapan yang dihasilkannya [9].

D. Kalsinasi ADU

Untuk memperoleh U₃O₈, ADU harus di dekomposisi *thermal* (kalsinasi) pada suhu yang tinggi agar semua air dan amonia keluar dan terbentuk oksida-oksida uranium baik itu uranium trioksida ataupun triuranium oktoksida. Dekomposisi ADU dipengaruhi oleh suhu untuk membentuk uranium oksida. Jika dipanaskan pada suhu antara 110°C maka dihasilkan uranium trioksida (UO₃), ditunjukkan pada persamaan dibawah ini:



Sedangkan bila suhu pemanasan antara 600-900°C akan dihasilkan triuranium oktoksida (U₃O₈), ditunjukkan pada persamaan dibawah ini:



Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap sifat-sifat fisis serbuk hasil kalsinasi antara lain adalah suhu dan waktu kalsinasi. Suhu sangat berpengaruh terhadap kecepatan reaksi dekomposisi serta mempengaruhi kualitas serbuk. Semakin tinggi suhu, maka kecepatan dekomposisi semakin tinggi, namun bila suhu terlalu tinggi yaitu melebihi 1000°C, maka sebagian dari serbuk akan menjadi keramik sehingga menyulitkan proses berikutnya [9].

Waktu kalsinasi berkaitan dengan waktu kontak dengan oksigen untuk membentuk U₃O₈, semakin lama waktu kalsinasi maka kesempatan kontak dengan oksigen lebih besar dibandingkan waktu kalsinasi yang lebih singkat. Waktu kalsinasi biasanya dilakukan selama 2 hingga 4 jam [9].

Batas maksimum jumlah pengotor yang diijinkan dalam uranium dibatasi hingga dalam jumlah yang sangat kecil yang bergantung dari daya absorpsi unsur pengotornya masing-masing, seperti pada Tabel 2.3 [25].

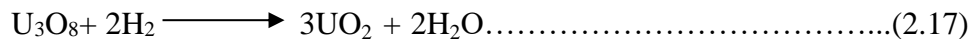
Tabel 2.3 Kandungan Maksimum Impuritas dalam Serbuk U₃O₈

Unsur	Maks. konsentrasi (µg/g uranium)	Unsur	Maks. konsentrasi (µg/g uranium)
Boron	0.3	Lead	50
Cadmium	0.2	Manganese	200
Gadalinium	0.1	Molybdenum	80
Aluminium	50	Nickel	100
Barium	5	Phosphorus	100
Berylium	100	Silicon	200
Calcium	100	Sodium	20
Carbon	100	Tantalum	200
Chlorine	100	Thorium	10
Fluorine	100	Tin	50
Chromium	100	Titanium	50
Cobalt	80	Tungsten	100
Copper	100	Vanadium	10
Iron	40	Zinc	20

Sumber: BATAN

E. Reduksi U₃O₈ menjadi UO₂

Dari hasil kalsinasi diperoleh serbuk U₃O₈, selanjutnya serbuk tersebut di reduksi dengan cara mereaksikan serbuk U₃O₈ dengan gas hidrogen (H₂) suhu sekitar 600 – 800°C. Reaksi reduksi ditunjukkan pada persamaan dibawah ini:



Faktor-faktor yang berpengaruh terhadap kualitas hasil serbuk (serbuk UO₂) antara lain: suhu dan waktu reduksi. Suhu reduksi sangat berkaitan dengan waktu reduksi. Bila suhu reduksi semakin tinggi waktu maka waktu reduksi yang diperlukan semakin singkat dan begitu pula sebaliknya. Selain itu, bila suhu reduksi semakin tinggi, maka ukuran partikel serbuk akan semakin besar karena sebagian dari butiran-butiran UO₂ kemungkinan tersinter kemudian bersama-sama membentuk butiran yang lebih besar. Bahkan pada ketinggian suhu tertentu akan membentuk butiran tunggal [9].

Ukuran partikel serbuk U₃O₈ akan berpengaruh terhadap kecepatan reaksinya. Semakin kecil ukuran partikel serbuk akan memberikan bidang kontak antar partikel semakin besar sehingga kecepatan reaksi akan semakin tinggi. Suhu pengambilan serbuk UO₂ dari *furnace* akan berpengaruh terhadap tingkat

oksidasi serbuk UO_2 dengan udara sehingga akan berpengaruh juga terhadap sifat-sifat fisis lainnya [9].

Spesifikasi serbuk UO_2 hasil proses reduksi harus memenuhi kriteria berderajat nuklir (*nuclear grade*) dan derajat keramik (*ceramic grade*). Derajat nuklir ditentukan oleh tingkat kemurnian serbuk UO_2 terhadap unsur-unsur pengotor/impuritas sedangkan derajat keramik sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat fisik serbuk UO_2 .

Sifat-sifat fisis yang harus dimiliki oleh serbuk UO_2 antara lain:

1. *Moisture content* : maksimal 0.40% (ASTM C 753-99)
2. *Particle size* : lolos ayakan 425 μm /No.40 (ASTM C 753-99)
3. *Bulk density* : minimal 625 kg/m^3 (ASTM C 753-99)
4. *Density* : minimal 99.5% dari densitas teoritis
Densitas teoritis: 10.96 g/cm^3 (ASTM C 776-00)
5. Oksigen/uranium *ratio* : 1.99-2.02 (ASTM C 776-00) [29]

Batas maksimum jumlah pengotor yang diijinkan dalam uranium dibatasi hingga dalam jumlah yang sangat kecil yang bergantung dari daya absorpsi unsur pengotornya masing-masing, batasan tersebut mengacu kepada ASTM C 753-99, seperti pada Tabel 2.4.

Tabel 2.4 Kadar Maksimum Unsur Pengotor dalam UO_2

Unsur	Maks. konsentrasi ($\mu\text{g/g}$ uranium)	Unsur	Maks. konsentrasi ($\mu\text{g/g}$ uranium)
Aluminium	250	Nickel	200
Carbon	100	Nitrogen	200
Calcium	200	Phosporus	250
Chlorine	100	Silicon	300
Fluorine	100	Tantalum	250
Chromium	200	Thorium	10
Cobalt	100	Tin	250
Copper	250	Titanium	250
Iron	250	Tungsten	250
Lead	250	Vanadium	250
Magnese	250	Zinc	250

Sumber: BATAN

F. Karakterisasi UO_2

Karakterisasi serbuk hasil reduksi diperiksa menggunakan:

1. Analisis Perbandingan Oksigen/Uranium (O/U)

Perbandingan O/U merupakan salah satu uji dari pelet atau serbuk uranium oksida pada analisis kendali kualitas menggunakan metode gravimetri. Metode gravimetri adalah suatu metode analisis yang berdasarkan pada prinsip penimbangan. Metode gravimetri digunakan pada beberapa bidang diantaranya untuk mengetahui suatu spesies senyawa dan kandungan unsur tertentu atau molekul dari suatu senyawa murni yang diketahui berdasarkan pada perubahan berat atau melihat adanya perubahan senyawa yang terjadi selama pemanasan dari UO_2 menjadi U_3O_8 .

2. Analisis menggunakan difraksi sinar X

Serbuk uranium oksida yang diperoleh akan dianalisa fase nya menggunakan metode difraksi sinar X, Dengan mengetahui data nilai d , sudut (2θ) dan intensitasnya maka senyawa dan struktur kristal dari sampel dapat diketahui dengan membandingkan data tersebut dengan data *joint comitte on powder diffraction standards* (JCPDF).

3. Analisis dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

SEM digunakan untuk mengamati morfologi dari suatu bahan, sehingga dapat memberikan informasi mengenai struktur mikro permukaan sampel dan morfologi serbuk uranium oksida. Prinsipnya adalah sifat gelombang dari elektron yang dapat terdifraksi pada sudut yang sangat kecil. Elektron dapat dihamburkan oleh sampel yang bermuatan (karena sifat listriknya). Untuk itu pada pengukuran SEM, sampel haruslah merupakan zat yang dapat menghantarkan arus listrik seperti halnya logam, karena serbuk uranium oksida tidak dapat menghantarkan listrik, maka sebelum di analisis terlebih dahulu dilapisi logam. Logam emas lebih disukai karena emas merupakan logam inert dan bersifat konduktif.

Konversi UO_2 menjadi UF_6 dilakukan dalam dua langkah proses. Pertama adalah mereaksikan UO_2 dengan asam anhydrous HF hingga menjadi uranium tetrafluorida (UF_4). Kemudian UF_4 direaksikan dengan gas F_2 sehingga terbentuk

UF₆. Negara utama pengoperasi pabrik komersial konversi *Yellow Cake*-UF₆ adalah Kanada, Perancis, Amerika Serikat, Inggris, dan Rusia. Beberapa negara seperti Cina, India, Aragentina, dan Romania juga mengoperasikan pabrik konversi tetapi hanya sebatas untuk memenuhi kebutuhan dalam negrinya sendiri [25].

2.3.3 Pengkayaan

Mayoritas PLTN yang sekarang beroperasi maupun yang sedang dalam konstruksi memerlukan uranium diperkaya sebagai bahan bakarnya. Pengkayaan uranium adalah proses meningkatkan kadar U-235 dalam bahan bakar uranium dari 0,7% (kadar U-235 dalam uranium alam) menjadi sekitar 3 – 5% atau lebih. Proses pengkayaan membuang sekitar 85% U-238 melalui proses pemisahan gas UF₆ ke dalam dua aliran, yaitu satu aliran merupakan uranium yang telah diperkaya dan akan dipergunakan umpan proses fabrikasi bahan bakar. Sedangkan aliran lainnya adalah aliran buangan atau "*tailing*" berupa aliran uranium miskin U-235 yang disebut sebagai uranium deplesi (kadar U-235 kurang dari 0,25%).

Ada dua metode yang secara komersial digunakan untuk proses pengkayaan uranium, yaitu metode difusi gas dan metode sentrifugasi gas. Kedua metode ini pada dasarnya menggunakan prinsip yang sama, yaitu beda berat antara atom U-238 dan atom U-235. Pada pengayaan metode difusi, gas UF₆ dialirkan ke membran berpori. Oleh karena lebih ringan maka atom U-235 akan berdifusi atau bergerak lebih cepat dibanding atom U-238, sehingga gas UF₆ yang lolos membran akan mengandung U-235 lebih banyak. Untuk mencapai tingkat pengayaan U-235 antara 3–5%, diperlukan sekitar 1400 kali pengulangan proses. Sehingga metode ini sangat boros energi, kira-kira akan mengonsumsi 3–4% dari energi listrik yang dibangkitkannya.

Pada pengayaan metode sentrifugasi, gas UF₆ diputar dengan kecepatan sudut tinggi dalam sebuah tabung panjang dan ramping (1–2 m untuk panjangnya dan 15-20 cm untuk diameternya). Gaya sentrifugal akan melemparkan isotop U-238 yang lebih berat menjauh dari pusat rotasi, sedangkan isotop U-235 yang lebih ringan akan terkonsentrasi di pusat rotasi. Metode gas sentrifugasi lebih hemat energi dan dapat dibangun dengan unit yang lebih kecil dibanding metode

difusi gas, sehingga metode ini lebih ekonomis dan secara komersial cepat berkembang.

Pabrik pengkayaan uranium di dunia pertama kali dibangun di Amerika Serikat dengan metode difusi gas. Beberapa pabrik pengkayaan modern yang berada di Eropa (Perancis, Inggris, Jerman, Belanda) dan Rusia menggunakan metode gas sentrifugasi. Negara lain yang mengoperasikan pabrik pengkayaan uranium komersial adalah Jepang, Cina, Argentina, dan Brazil. Beberapa tipe PLTN, terutama PLTN Candu di Kanada dan PLTN generasi awal dengan reaktor berpendingin gas di Inggris tidak memerlukan bahan bakar uranium diperkaya.

2.3.4 Fabrikasi Bahan Bakar

Fabrikasi bahan bakar atau perangkat bakar nuklir diawali dengan proses konversi UF_6 yang telah diperkaya (keluaran pabrik pengayaan) menjadi serbuk uranium dioksida (UO_2) yang kemudian dibentuk menjadi pil-pil (pelet) silinder melalui pengepresan dan diteruskan dengan pemanggangan dalam suasana gas hidrogen pada temperatur tinggi ($1700^\circ C$) hingga membentuk pelet UO_2 berderajat keramik yang rapat dan kuat. Pelet-pelet UO_2 yang memenuhi persyaratan kualitas kemudian dimasukkan ke dalam sebuah selongsong dari bahan paduan zirconium (*zircalloy*). Setelah kedua ujung selongsong ditutup dan dilas, batang bahan bakar (*fuel rod*) disusun membentuk suatu perangkat bakar (*fuel assembly*) [25].

Salah satu komponen utama elemen bakar nuklir reaktor daya tipe LWR maupun HWR adalah pelet UO_2 berdensitas tinggi berbentuk silindris. Pelet ini dibuat dari serbuk UO_2 melalui proses kompaksi dingin dan sintering suhu tinggi ($1700^\circ C$). Tujuan peletisasi UO_2 adalah mendapatkan densitas bahan bakar yang tinggi (94–96% dari densitas teori), menciptakan kungkungan yang kuat bagi nuklida hasil fisi, serta mendapatkan geometri yang seragam dan standar sesuai persyaratan [25].

Proses peletisasi diawali dari pencampuran serbuk UO_2 dengan pelumas Zn-stearat dan kemudian dikompakan dengan mesin kompaksi. Kompakan UO_2 yang diperoleh kemudian dihancurkan lagi dan dibentuk butiran-butiran melalui proses *crushing, granulating and sieving*. Proses granulasi dilakukan mengingat serbuk UO_2 yang digunakan adalah serbuk hasil proses pengendapan ADU yang

berukuran halus dan berbentuk tidak beraturan sehingga sangat sulit dikompakkan secara dingin (*cold pressing*). Butiran UO_2 kemudian dilakukan proses pengompakan akhir secara dingin menjadi pelet mentah (*green pellet*) yang harus memenuhi persyaratan dimensi dan densitas (50-60% dari densitas teori). Densitas pelet mentah yang diperoleh sangat dipengaruhi oleh tekanan pengompakkan, karakteristik serbuk, dan adanya bahan tambahan atau aditif. Pengompakan akhir dilakukan dengan mesin tekan tipe *double acting press* yang dapat beroperasi secara kontinyu. Pengompakan akhir ini dilakukan pada tekanan yang lebih tinggi dibandingkan tekanan pada pengompakan awal agar diperoleh densitas pelet mentah $5-6 \text{ gr/cm}^3$ atau 50-60% dari densitas teori [25].

Untuk mendapatkan pelet yang sesuai dengan *nuclear grade* dan memiliki densitas tinggi (sekitar 95% dari densitas teori) dilakukan proses penyinteran terhadap pelet mentah. Secara umum penyinteran didefinisikan sebagai suatu proses dimana serbuk yang dicetak-tekan menjadi massa yang kompak melalui pemanasan pada temperatur di bawah titik leburnya. Proses penyinteran pelet UO_2 dilakukan pada temperatur sekitar 1700°C selama 3–4 jam dalam suasana atmosfer reduksi (gas H_2). Proses sintering ini akan menghasilkan pelet UO_2 berderajat keramik yang keras dan kuat dengan densitas 95–96% dari densitas teori UO_2 [25].

Pembuatan bantalan (*spacer & pad*) diawali dengan pemotongan lembaran *Zircalloy* menjadi pelat kecil (sub pelat). Kemudian salah satu sisi sub pelat dilapisi dengan berilium (Be) yang dilakukan dalam mesin penguap Be. Mengingat toksisitas Be yang tinggi, pekerjaan pelapisan dilakukan di ruang khusus untuk menangani Be. Sub pelat yang telah terlapisi Be kemudian dibentuk menjadi penjarak (*spacers*) dan bantalan (*pads*) dengan mesin *press* yang dilakukan di dalam *glovebox*. *End caps* dibentuk dari *Zircalloy rod*, setelah dipotong kemudian dibubut dengan mesin bubut pusat (SchaublinLathe). Adapun *end plates* dibuat dari lembaran/pelat *Zircalloy* yang dipotong sesuai persyaratan ukuran kemudian di-*milling*. Setiap *end plate* diberi (tanda) untuk memudahkan dalam perakitan berkas (identifikasi) [25].

Dalam Penyiapan tabung penyimpanan, *Zircalloy tube* dipotong sesuai panjang tabung. Kemudian dibawa ke Lab. untuk ditempelkan *spacer* dan *pad*. Proses penempelan pertama-tama dilakukan dengan alat *tack welding* dan dilanjutkan dengan proses patri keras (*brazing*). Proses selanjutnya adalah melapisi permukaan bagian dalam tabung dengan grafit. Pelapisan dilakukan dengan mengalirkan suspensi koloidal grafit ke dalam tabung sehingga terbentuk lapisan tipis, dan kemudian dipanggang dalam vakum tinggi grafit yang menempel dengan kuat [25].

Tahapan proses perakitan elemen bakar (*pin*) meliputi pengelasan *end cap* pertama dengan tabung, pemasukan baris pelet UO_2 sinter ke dalam tabung yang salah satu ujungnya telah ditutup dengan *end cap*, pengelasan *end cap* kedua, pengerjaan akhir ujung-ujung batang dan pencucian. Proses pengelasan *end cap* - tabung dilakukan dengan mesin las restansi gaya magnet (*magnetic force resistance welding machine*) di dalam kotak khusus yang kedap udara (*welding box*) sehingga kotak tersebut bisa divakumkan dan diisi kembali dengan gas pelindung las (He, Ar). Tujuan pemvakuman ini adalah untuk menghindari oksidasi selama proses pengelasan. Tekanan pemvakuman mencapai 10^{-3} torr dan tekanan gas pelindung sekitar 1 atm [25].

Selanjutnya tabung diisi dengan pelet UO_2 sinter yang telah dikeringkan pada kondisi vakum tinggi. Kemudian tabung ditutup dengan *end cap* kedua dengan cara pengelasan memakai las gaya magnetik. Dalam waktu bersamaan diisikan pula gas He. Bekas-bekas lasan luar dihilangkan dengan mesin bubut dan dilakukan pembentukan tutup ujung elemen bakar nuklir sebagai proses pengerjaan akhir. Setelah elemen bakar selesai dibuat, dilakukan perakitan menjadi perangkat bakar nuklir. Sebanyak 18 buah elemen bakar yang telah dipersiapkan pada tahapan sebelumnya, disusun pada alat pemegang (*jig and fixture*) yang dilengkapi dengan pelat ujung. Pengelasan dilakukan satu persatu melalui urutan tertentu dengan memakai sistem las titik (*resistance spot welding*) [25].

Tahapan paling akhir yang dilakukan adalah proses oksidasi berkas elemen bakar dengan alat *autoclaving*. Proses ini dimaksudkan untuk membentuk lapisan

tipis oksida-ZrO₂ pada permukaan batang elemen bakar yang akan meningkatkan ketahanan korosi perangkat bakar dalam servisnya di teras reaktor. *Autoclaving* dilakukan dalam tungku bejana tekan yang berisi uap air pada temperatur sekitar 400°C dan tekanan 10 atm selama waktu 24 jam [25].

Setelah proses fabrikasi, perangkat bakar nuklir di masukkan ke dalam teras reaktor. Susunan perangkat bakar (*fuel assembly*) inilah yang membentuk struktur inti atau teras reaktor (*reactor core*). PLTN tipe PWR dengan daya 1000 MW listrik (MWe) berisi sekitar 75 ton uranium sedikit diperkaya. Dalam teras reaktor, U-235 mengalami reaksi fisi dan menghasilkan panas dalam sebuah proses berkesinambungan yang disebut reaksi fisi berantai. Kelangsungan proses ini sangat bergantung pada moderator seperti air atau grafit, dan sepenuhnya dikendalikan dengan menggunakan batang kendali [25].

Di dalam teras reaktor, sejumlah U-238 akan menyerap neutron hasil reaksi fisi dan berubah menjadi plutonium (Pu-239). Setengah dari plutonium yang dihasilkan juga mengalami reaksi fisi dan menghasilkan sepertiga dari energi total reaktor. Untuk mempertahankan kinerja reaktor, sekitar sepertiga dari bahan bakar yang digunakan di dalam teras harus diganti dengan bahan bakar baru setiap satu tahun atau setiap 18 bulan [25].

Pabrik perangkat bakar PWR terbesar di dunia antara lain adalah Westinghouse–USA dengan kapasitas produksi 1600 ton/tahun, Global Nuclear Fuel–Americas dengan kapasitas produksi 1200 ton/tahun, Ulba–Kazakhstan dengan kapasitas produksi 2000 ton/tahun, TVEL Elektrosal–Rusia dengan kapasitas produksi 1020 ton/tahun, TVEL Novosibirsk–Rusia dengan kapasitas produksi 1000 ton/tahun, dan FBFC–Perancis dengan kapasitas produksi 820 ton/tahun. Negara lain pengoperasi PLTN yang juga memproduksi perangkat bahan bakar adalah Jepang, Korea Selatan, China, India, Argentina, Brazil, Inggris (UK), dll [24, 25].

2.3.5 Penyimpanan Sementara Bahan Bakar Bekas

Bahan bakar bekas sangat radioaktif serta mengeluarkan banyak panas. Untuk penanganan yang aman dan selamat, bahan bakar bekas yang baru dikeluarkan dari reaktor disimpan dalam kolam khusus yang berada di dekat

reaktor untuk menurunkan panas maupun radioaktivitas. Air di dalam kolam berfungsi sebagai penghalang terhadap radiasi dan pemindah panas dari bahan bakar bekas [24].

Bahan bakar bekas dapat disimpan di kolam penyimpanan untuk waktu yang lama (sampai lima puluh tahun atau lebih), sebelum akhirnya diolah ulang atau dikirim ke pembuangan akhir sebagai limbah (penyimpanan lestari). Alternatif lain, setelah tingkat radioaktivitas dan pemancaran panas bahan bakar bekas menurun drastis, bahan bakar bekas dapat dikeluarkan dari kolam penyimpanan dan selanjutnya disimpan dengan cara kering. Perisai radiasi yang cukup murah dan pendinginan alamiah yang bebas perawatan, menjadikan cara ini menjadi pilihan yang menarik [24].

2.3.6 Pemanfaatan Uranium Hasil Olah-Ulang

Uranium hasil olah-ulang mempunyai tingkat pengayaan U-235 sekitar 0,8-1%, dan disebut pengayaan rendah karena masih mendekati kadar U-235 dalam uranium alam. Untuk melakukan pengayaan UO_2 hasil olah-ulang diperlukan konversi ke UF_6 sebagai bahan baku pengayaan. UF_6 hasil konversi, meskipun berkadar U-235 rendah tetapi biaya pengayaan masih lebih rendah dibanding bahan baku uranium alam, sehingga sangat ekonomis [24].

2.3.7 Pemanfaatan Plutonium Hasil Olah-Ulang

Untuk memperoleh campuran uranium plutonium oksida, larutan plutonium sulfat dicampur dengan larutan uranium sulfat dan dipanaskan menggunakan gelombang mikro. Campuran oksida kemudian dibuat menjadi pelet dengan penekanan dan disusun ke dalam tabung bahan bakar. Tabung disusun menjadi bundel bahan bakar. Bahan bakar jenis ini disebut dengan bahan bakar campuran uranium plutonium oksida (bahan bakar *Mixed Oxide/MOX*). Bahan bakar MOX dapat digunakan sebagai bahan bakar [24].

2.3.8 Pembuangan Akhir Limbah

Pembuangan akhir limbah pada prinsipnya adalah penyimpanan lestari limbah radioaktivitas tinggi yang telah digelasifikasi dan disegel dalam tabung *stainless steel*, dan juga penyimpanan lestari bahan bakar bekas yang telah melalui

proses pendinginan yang cukup dan telah disegel dalam wadah atau “*canister*” terbuat dari logam tahan korosi seperti tembaga atau *stainless steel* [24].

2.4 Industri Bahan Bakar Nuklir Di Dunia

Industri bahan bakar nuklir dunia saat ini terdiri atas produsen utama bahan bakar dan kelompok yang mempunyai cadangan lain, seperti Rusia yang mempunyai cadangan bahan bakar nuklir berasal dari hulu ledak nuklir. Uranium yang telah dihasilkan di dunia sejak tahun 1945 diperkirakan sekitar 1.900.000 ton. Diperkirakan sekitar 975.000 ton digunakan untuk pembangkit listrik dan sekitar 710.000 ton digunakan untuk persenjataan.

Produsen utama bahan bakar nuklir sejak akhir tahun 1980 telah banyak berkurang karena kebangkrutan, dijual atau bergabung satu sama lain. Sehingga yang tersisa pada saat itu adalah perusahaan bahan bakar nuklir Perancis (COGEMA) dan perusahaan bahan bakar nuklir Inggris (BNFL). Perusahaan lain cenderung untuk menjual uranium dengan harga relatif rendah dalam satu paket mulai dari pemurnian, konversi, pengayaan sampai fabrikasi bahan bakar. Liberalisasi pasar listrik berjalan terus dan PLTN dapat bersaing dengan sumber energi lain karena harga pembangkitannya lebih rendah. Secara tidak langsung hal ini menyebabkan terjadinya percepatan reposisi industri bahan bakar nuklir [15].

2.4.1 Kondisi Industri Pemasok Bahan Bakar Nuklir Saat Ini

Industri pemasok bahan bakar nuklir terdiri dari produksi uranium, konversi U_3O_8 menjadi UF_6 , pengayaan dan fabrikasi bahan bakar nuklir [15].

1. Produksi Uranium

Sejak tahun 1991, telah terjadi peningkatan permintaan uranium di dunia, sebagai akibatnya harus diikuti dengan peningkatan jumlah produksi uranium. Tetapi jumlah produksinya tidak lebih dari 60% jumlah permintaan. Pada akhir tahun 1998 jumlah permintaan uranium dunia mencapai 59.378 ton, sedangkan produksinya hanya 34.986 ton, sehingga terdapat kekurangan pasokan sebesar 24.000 ton. Kekurangan ini dipenuhi dengan pasokan dari cadangan pemerintah dan cadangan publik, pengayaan ulang uranium dan penggunaan uranium hasil olah-ulang dan MOX. Sepertiga cadangan uranium

(kira-kira 58.000 ton pada tahun 1997) berasal dari uranium pengayaan rendah (*Low Enriched Uranium/LEU*) yang diencerkan dari uranium pengayaan tinggi (*High Enriched Uranium/HEU*). HEU berasal dari hulu ledak senjata nuklir Rusia, sedangkan 2/3 bagian (113.000 ton) berasal dari uranium alam, UF₆, uranium diperkaya dan uranium dari pengayaan ulang uranium susut kadar (*depleted uranium*). Jumlah produksi uranium pada 10 tahun mendatang diperkirakan akan meningkat sampai 2/3 kali produksi saat ini. Diperkirakan Kanada dan Australia akan dapat memasok sekitar 50% jumlah produksi uranium dunia pada saat itu. Produsen uranium saat ini adalah: CAMECO (Kanada), COGEMA (Perancis), MINATOM (Rusia), OLIMPIC DAM, ERA (Australia), USEC (Amerika Serikat), ROSING [15].

2. Industri Konversi Uranium (U₃O₈ Menjadi UF₆)

Saat ini, 3/4 pasar konversi uranium dunia dikuasai oleh 5 perusahaan besar yaitu COMBADIN CAMECO, BNFL, COMURHEX dan MINATOM. Selebihnya dipasok oleh cadangan badan pemerintah dan publik dalam berbagai bentuk, misalnya uranium yang diperoleh dari pengayaan ulang uranium susut kadar (pengayaan rendah). Kelima perusahaan konversi tersebut saat ini memiliki kemampuan konversi 65.020 ton uranium, USEC dan MINATOM menguasai lebih dari 3/4 bagian cadangan UF₆ yang dilepas ke pasar [15].

3. Industri Pengayaan Uranium

Sekitar 78% kemampuan pengayaan (*Separation Work Unit/SWU*) dipasok oleh 4 perusahaan besar yaitu URENCO, EURODIF, MINATOM dan USEC. Perusahaan CNNC (Cina) dan JNFL (Jepang) juga melakukan pengayaan, tetapi tidak melayani pasar internasional. Total kemampuan pasokan tahunan 4 perusahaan besar tersebut hampir 2 kali kebutuhan dunia. Saat ini, USEC dan EURODIF menggunakan teknologi pengayaan dengan difusi gas, MINATOM dan URENCO menggunakan teknologi pengayaan dengan sentrifugal gas [15].

4. Fabrikasi Bahan Bakar Uranium

Kemampuan pasokan tahunan bahan bakar uranium dunia saat ini adalah 11.000 ton uranium. Jika reposisi industri nuklir berakhir, maka kemungkinan kemampuannya akan menurun menjadi 9.100-9.600 ton. Perusahaan bahan bakar Inggris (BNFL) sampai dengan akhir bulan Desember 1999 telah membeli divisi nuklir perusahaan *Westinghouse* dan ABB. Selain itu, pada bulan Juli 2000 berdiri *Framatome Advance Nuclear Power* (FANP) yang merupakan gabungan divisi nuklir Framatome dan Siemens. Selanjutnya, 3 perusahaan pembuat bahan bakar untuk tipe reaktor air didih (*boiling waterreactor/BWR*), yaitu *General Electric* (GE), Toshiba dan Hitachi bergabung dan membentuk *Global Nuclear Fuel* (GNF) pada bulan Januari 2000 [15].

2.4.2 Reposisi Industri Nuklir

Pada industri nuklir mempunyai hubungan dengan perusahaan lain dan antara konsumen yang dapat dijelaskan sebagai berikut:

1. Gabungan Produsen Bahan Bakar Dan Reaktor Nuklir

Saat ini, pembuat bahan bakar dan pembuat reaktor nuklir mengembangkan perusahaan bersama (*Joint Venture*). Pasar bahan bakar BWR sangat dipengaruhi oleh divisi pembangkit listrik perusahaan Siemens dan anak perusahaan ABB, yaitu ABB Atom. Sedangkan pasar bahan bakar PWR dikuasai 2 grup perusahaan besar, yaitu grup BNFL dan grup FANP. Di Asia, GE, Siemens dan *Westinghouse* menguasai 1/3 industri bahan bakar di Taiwan [15].

2. Pengaruh Perubahan Hubungan Antara Konsumen dan Pemasok Bahan Bakar Nuklir

Reposisi industri pembangkitan listrik dipercepat dengan adanya deregulasi bidang industri kelistrikan di Inggris, Perancis, Jepang dan Amerika Serikat. Di Amerika Serikat, liberalisasi pembangkitan listrik berlanjut pada tingkat negara bagian menuju kemandirian energi pada tahun 1992. Pada bulan November 2000, liberalisasi pasar pembangkit listrik di 27 negara bagian Amerika Serikat ditetapkan dengan regulasi dan pengawasan, di antaranya

paling sedikit di 16 negara bagian yang mengoperasikan PLTN. Di negara bagian yang melakukan liberalisasi pasar pembangkitan listrik telah terjadi pemisahan antara perusahaan pembangkit listrik dan perusahaan distribusi listrik, sehingga jual beli PLTN di kalangan perusahaan listrik menjadi lebih aktif. Beberapa industri utama di Amerika Serikat berpengaruh pada pasar bahan bakar dunia. Penggabungan beberapa perusahaan akan berlangsung terus bergantung pada: keberagaman pasokan, promosi pemasok, penurunan harga, meningkatnya jaminan pasokan, pengurangan cadangan, dan paket pasokan bahan bakar [15].

2.5 Reaktor Nuklir

Disamping sebagai senjata nuklir, manusia juga memanfaatkan energi nuklir untuk kesejahteraan umat manusia. Salah satu pemanfaatan energi nuklir secara besar-besaran adalah dalam bentuk Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN). Energi nuklir di sini digunakan untuk membangkitkan tenaga listrik [26].

Macam-macam reaktor berdasarkan kegunaannya antara lain adalah:

1. Reaktor daya

Reaktor daya merupakan reaktor komersial yang menghasilkan energi listrik untuk dijual misalnya PLTN (Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir).

2. Reaktor riset termasuk uji material dan latihan.

Reaktor riset/penelitian adalah suatu reaktor yang dimanfaatkan untuk berbagai macam tujuan penelitian. Misalnya reaktor uji material yang digunakan secara khusus untuk uji iradiasi, reaktor untuk eksperimen fisika reaktor, reaktor riset untuk penelitian dengan menggunakan berkas neutron dan alat eksperimen kekritisasi, reaktor untuk pendidikan dan pelatihan. Di antara reaktor-reaktor tersebut, yang disebut reaktor riset pun terdiri dari berbagai macam, misalnya reaktor untuk eksperimen berkas neutron dan uji iradiasi material. Reaktor untuk eksperimen perisai, reaktor untuk uji pulsa dan lain-lain. Tipe-tipe reaktor riset antara lain tipe kolam berpendingin dan bermoderator air berat, tipe kolam berpendingin dan bermoderator air ringan dan tipe kolam berpendingin air ringan dan bermoderator air berat.

Reaktor riset Indonesia saat ini ada 3 yaitu reaktor kartini, reaktor TRIGA dan reaktor RSG-GAS. Spesifikasi dari ketiga reaktor tersebut dapat dilihat pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 Spesifikasi Reaktor Kartini, TRIGA dan RSG-GAS

	Kartini	TRIGA	RSG-GAS
Daya Maksimum	100 kW	2000 kW	30.000 kW
Minimum periode	7 second	7 second	-
% Daya Maksimum	110 %	120 %	-
Suhu air Tangki Maks.	≤ 40	≤ 40	≤ 40
Suhu bahan bakar Maks.	530 °C	530 °C	150 °C
Laju air primer T inlet HE T outlet HE	76 GPM ≤ 10 upper room temp. ≥ 5 upper room temp.	<600 GPM ≤ 10 upper room temp. ≥ 5 upper room temp.	800 kg/det
Laju alir sekunder T inlet HE T outlet HE	160 GPM ≤ 2 upper room temp ≥ 7 upper room temp	-	-
Pemanfaatan	Training, Penelitian	Training, Penelitian, produksi, isotop	Penelitian, produksi, isotope, uji material, silicon doping, uji elemen bakar PLTN

Sumber: BATAN

3. Reaktor produksi isotop yang kadang-kadang digolongkan juga kedalam reaktor riset.

Ditinjau dari tenaga neutron yang melangsungkan reaksi pembelahan, reaktor dibedakan menjadi reaktor cepat dan reaktor *thermal*. Berdasarkan parameter yang lain dapat disebut reaktor *berreflector* grafit, reaktor berpendingin air ringan dan reaktor suhu tinggi [26].

Reaktor nuklir adalah tempat terjadinya reaksi inti berantai terkendali, baik pembelahan inti (fisi) atau penggabungan inti (fusi). Fungsi reaktor fisi dibedakan menjadi dua, yaitu reaktor penelitian dan reaktor daya. Pada reaktor penelitian, yang diutamakan adalah pemanfaatan neutron hasil pembelahan untuk berbagai penelitian dan iradiasi serta produksi radioisotop [26].

Beberapa inti berat akan memecah diri (fisi) jika ditumbuk oleh neutron lambat (neutron *thermal*), yang energinya kurang lebih 0,025 eV. Inti-inti seperti ini disebut inti *fisile*, contohnya ketika pecah inti-inti itu juga memancarkan neutron, yang kemudian menumbuk inti *fisile* lain, sehingga pecah, demikian seterusnya sehingga terjadi reaksi berantai. Uranium terdapat di alam, dapat ditambang, karena itu dijadikan pilihan bahan bakar untuk reaktor nuklir. Sayangnya, dalam sejumlah bahan uranium hanya terdapat sedikit saja (sekitar 0,72%), sisanya. Berbeda dengan, tidak bersifat *fisile*, melainkan menangkap neutron yang datang, sehingga justru mencegah reaksi fisi berantai. Namun meski sedikit, tetap terdapat kemungkinan ditemui oleh neutron dan menjalani reaksi fisi [26].

Untuk meningkatkan kemungkinan terjadinya reaksi fisi, maka harus diperbanyak jumlah neutron *thermal* yang datang ke uranium. Mengingat neutron yang dipancarkan oleh inti *fisile* yang pecah dapat memiliki energi yang tinggi (orde MeV), maka sebelum mencapai uranium neutron ini perlu diperlambat sehingga menjadi neutron *thermal*. Perlambatan ini dilakukan oleh moderator, melalui proses tumbukan. Moderator dapat berupa grafit (karbon), air berat (deterium), air biasa dll. Jadi di dalam reaktor nuklir, batang-batang uranium yang merupakan bahan bakar reaktor dikelilingi oleh moderator, contohnya grafit (karbon), seperti yang dipakai Fermi, air berat (deterium). Jika bahan bakar uranium itu diperkaya dengan sampai 3%, maka sebagai moderator dapat digunakan air biasa. Jika pengayaan sampai 10% tidak diperlukan moderator. Terjadinya reaksi fisi itu dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti:

- a. Jumlah neutron yang dipancarkan oleh inti *fisile*,
- b. Peluang neutron yang dipancarkan inti *fisile* diperlambat oleh moderator tanpa ditangkap oleh moderator,
- c. Peluang neutron yang sudah diperlambat itu berinteraksi dengan uranium,
- d. Peluang neutron *thermal* bertemu dan memicu reaksi fisi,
- e. Peluang neutron *thermal* ditangkap [26].

Reaksi dalam reaktor nuklir dikontrol dengan mengatur fluks neutron di dalam reaktor, menggunakan batang-batang pengontrol. Batang-batang ini terbuat

dari boron atau kadmium, yang dapat menangkap neutron, khususnya neutron lambat. Dengan memasukkan atau mengeluarkan batang-batang ini ke atau dari reaktor fluks neutron dapat diatur. Jika diinginkan produksi energi bertambah, maka batang-batang pengontrol ditarik keluar sampai tercapa produksi energi yang diinginkan, lalu dimasukkan lagi supaya produksi energi stabil. Sebaliknya, jika diinginkan produksi energi berkurang, maka batang-batang pengontrol dimasukkan sampai tercapai produksi energi yang diinginkan, lalu ditarik keluar supaya produksi energi stabil [26].

Reaksi fisi berantai di dalam reaktor nuklir tentu menimbulkan panas yang tinggi. Suhu dalam reaktor bisa mencapai 300 sampai 800°C. Karena itu, reaktor harus didinginkan, dengan cara mengalirkan cairan pendingin (seperti air pada mesin mobil) di sekitar reaktor. Sebagai cairan pendingin dapat digunakan air bertekanan tinggi, karbondioksida, helium dan sodium cair. Cairan pendingin yang keluar membawa panas dari reaktor. Melalui suatu penukar panas (*heat exchanger*), panas dalam cairan tersebut tersebut dipindahkan ke cairan lain. Pada akhirnya panas itu dipakai untuk menggerakkan turbin pembangkit listrik. Penukar panas itu juga bermanfaat agar bahan-bahan radioaktif yang mungkin terbawa dalam cairan pendingin yang pertama tidak terbawa keluar. Sebagai pembangkit listrik, satu gram bahan bakar uranium dapat menghasilkan energi listrik 1 MWatt/hari. Ini sebanding dengan energi listrik yang dihasilkan oleh 2,5 ton batubara. Setelah sekian waktu jumlah uranium di dalam bahan bakar reaktor tentu berkurang, karena menjalani fisi menghasilkan energi, neutron dan inti-inti lain. Karena itu, bahan bakar ini harus diganti. Bahan bakar yang telah terpakai tidak dapat dibuang begitu saja, karena mengandung bahan-bahan radioaktif, yang waktu paruhnya bervariasi, dari sepersekian detik sampai ribuan tahun. Setelah sisa uranium dipisahkan (untuk dimanfaatkan lagi), sampah ini disimpan melalui penyimpanan yang bertahap. Pertama-tama disimpan sampai radioisotop yang berumur pendek jauh berkurang, kemudian dipindahkan ke penyimpanan berikutnya, terakhir untuk disimpan di dalam tanah dalam wadah baja [26].

Panas yang ditimbulkan dirancang sekecil mungkin sehingga panas tersebut dapat dibuang ke lingkungan. Pengambilan panas pada reaktor penelitian

dilakukan dengan sistem pendingin, yang terdiri dari sistem pendingin primer dan sistem pendingin sekunder. Panas yang berasal dari teras reaktor diangkut oleh air di sekitar teras reaktor (sistem pendingin primer) dan dipompa oleh pompa primer menuju alat penukar panas. Selanjutnya panas dibuang ke lingkungan melalui menara pendingin (alat penukar panas pada sistem pendingin sekunder).

Perlu diketahui bahwa antara alat penukar panas, sistem pendingin primer atau sekunder tidak terjadi kontak langsung. Sementara, pada reaktor daya, panas yang timbul dari pembelahan dimanfaatkan untuk menghasilkan uap yang bersuhu dan bertekanan tinggi untuk memutar turbin [26].

Sebuah reaktor merupakan sumber energi yang efisien. Jadi secara umum reaktor nuklir adalah tempat berlangsungnya reaksi nuklir yang terkendali. Untuk mengendalikan operasi dan menghentikannya digunakan bahan penyerap neutron yang disebut batang kendali [26].

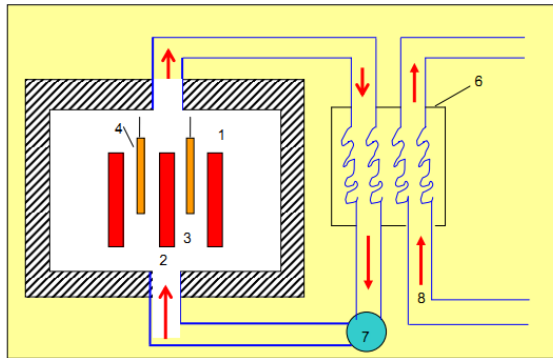
Jenis reaktor nuklir dibedakan berdasarkan besarnya energi kinetik neutron yang merupakan faktor utama dalam reaksi fisi berantai, yaitu reaktor neutron panas, reaktor neutron cepat dan lain-lain. Berdasarkan jenis materi yang digunakan sebagai moderator dan pendingin, reaktor diklasifikasikan menjadi reaktor air ringan, reaktor air berat, reaktor grafit dan lain-lain. Berdasarkan tujuannya, diklasifikasikan menjadi reaktor riset, reaktor uji material, reaktor daya dan lain-lain [26].

2.5.1 Prinsip Kerja Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir mempunyai prinsip kerja yaitu terdiri dari komponen reaktor nuklir, pembangkit listrik tenaga nuklir dan pengolahan limbah radioaktif.

1. Komponen Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir pertama kali dibangun oleh Enrico Fermi pada tahun 1942 di Universitas Chicago. Hingga saat ini telah ada berbagai jenis dan ukuran reaktor nuklir, tetapi semua reaktor atom tersebut memiliki lima komponen dasar yang sama, yaitu: elemen bahan bakar, moderator neutron, batang kendali, pendingin dan perisai beton [24]. Suatu komponen atau skema reaktor nuklir ditunjukkan pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 Skema Dasar Reaktor Nuklir

Sumber: PDIN BATAN

Komponen dalam reaktor nuklir terdiri dari:

a. Elemen Bahan Bakar

Elemen bahan bakar ini berbentuk batang-batang tipis dengan diameter kira-kira 1 cm. Dalam suatu reaktor daya besar, ada ribuan elemen bahan bakar yang diletakkan saling berdekatan. Seluruh elemen bahan bakar dan daerah sekitarnya dinamakan teras reaktor.

Umumnya, bahan bakar reaktor adalah uranium-235. Oleh karena isotop ini hanya kira-kira 0,7% terdapat dalam uranium alam, maka diperlukan proses khusus untuk memperkaya (menaikkan persentase) isotop ini. Kebanyakan reaktor atom komersial menggunakan uranium-235 yang telah diperkaya sekitar 3%.

b. Moderator Neutron

Neutron yang mudah membelah inti adalah neutron lambat yang memiliki energi sekitar 0,04 eV (atau lebih kecil), sedangkan neutron-neutron yang dilepaskan selama proses pembelahan inti (fisi) memiliki energi sekitar 2 MeV. Oleh karena itu, sebuah reaktor atom harus memiliki material yang dapat mengurangi kelajuan neutron-neutron yang energinya sangat besar sehingga neutron-neutron ini dapat dengan mudah membelah inti. Material yang memperlambat kelajuan neutron dinamakan moderator. Moderator yang umum digunakan adalah air. Ketika neutron berenergi tinggi keluar dari sebuah elemen bahan bakar, neutron tersebut memasuki air di sekitarnya dan bertumbukan dengan molekul-molekul air. Neutron cepat akan kehilangan sebagian energinya selama menumbuk molekul air

(moderator) terutama dengan atom-atom hidrogen. Sebagai hasilnya neutron tersebut diperlambat.

c. Batang Kendali

Jika neutron yang dihasilkan selalu konstan dari waktu ke waktu (faktor multiplikasinya bernilai 1), maka reaktor dikatakan berada pada kondisi kritis. Sebuah reaktor normal bekerja pada kondisi kritis. Pada kondisi ini reaktor menghasilkan keluaran energi yang stabil. Jika neutron yang dihasilkan semakin berkurang (multiplikasinya < 1), maka reaktor dikatakan berada pada kondisi subkritis dan daya yang dihasilkan semakin menurun. Sebaliknya jika setiap saat neutron yang dihasilkan meningkat (multiplikasinya > 1), reaktor dikatakan dalam keadaan superkritis. Selama kondisi superkritis, energi yang dibebaskan oleh sebuah reaktor meningkat. Jika kondisi ini tidak dikendalikan, meningkatnya energi dapat mengakibatkan pelepasan bahan radioaktif ke lingkungan sekitar. Maka dari itu diperlukan sebuah batang kendali untuk menjaga reaktor pada keadaan normal ataupun pada keadaan kritis.

Batang kendali terbuat dari bahan-bahan penyerap neutron, seperti boron dan kadmium. Jika reaktor menjadi superkritis, batang kendali secara otomatis bergerak masuk lebih dalam ke dalam teras reaktor untuk menyerap kelebihan neutron yang menyebabkan kondisi itu kembali ke kondisi kritis. Sebaliknya, jika reaktor menjadi subkritis, batang kendali sebagian ditarik menjauhi teras reaktor sehingga lebih sedikit neutron yang diserap. Dengan demikian, lebih banyak neutron tersedia untuk reaksi fisi dan reaktor kembali ke kondisi kritis. Untuk menghentikan operasi reaktor (misal untuk perawatan), batang kendali turun penuh sehingga seluruh neutron diserap dan reaksi fisi berhenti.

d. Pendingin

Energi yang dihasilkan oleh reaksi fisi meningkatkan suhu reaktor. Suhu ini dipindahkan dari reaktor dengan menggunakan bahan pendingin, misalnya air atau karbon dioksida. Bahan pendingin (air) disirkulasikan melalui sistem pompa, sehingga air yang keluar dari bagian atas teras

reaktor digantikan air dingin yang masuk melalui bagian bawah teras reaktor.

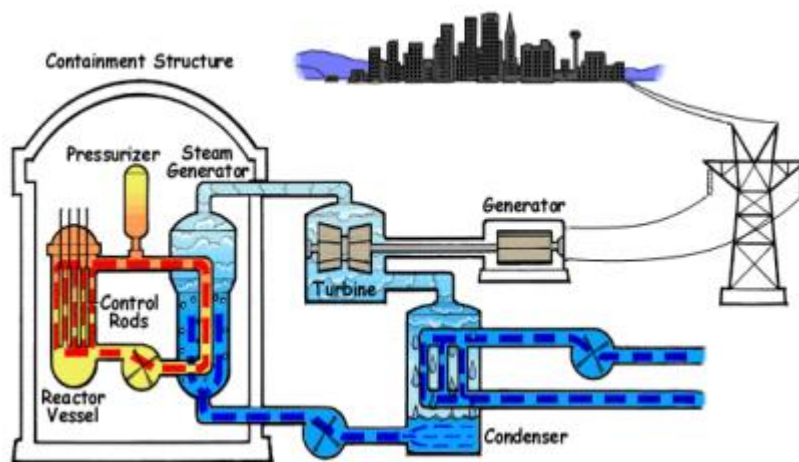
e. Perisai Beton

Inti-inti atom hasil pembelahan dapat menghasilkan radiasi. Untuk menahan radiasi ini (radiasi sinar gamma, neutron dan yang lain), agar keamanan orang yang bekerja di sekitar reaktor terjamin, maka umumnya reaktor dikungkungi oleh perisai beton [26].

2. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)

Berdasarkan jenis pendinginnya, ada beberapa jenis reaktor. Dalam pembahasan ini akan dibahas pembangkit listrik tenaga nuklir yang menggunakan reaktor air bertekanan (*Pressurized Water Reactor = PWR*).

Dalam PWR, kalor yang dihasilkan dalam batang-batang bahan bakar diangkut keluar dari teras reaktor oleh air yang terdapat di sekitarnya (sistem pendingin primer). Air ini secara terus-menerus dipompakan oleh pompa primer ke dalam reaktor melalui saluran pendingin reaktor (sistem pendingin primer) [24]. Diagram PLTN yang berjenis PWR ditunjukkan pada Gambar 2.4.



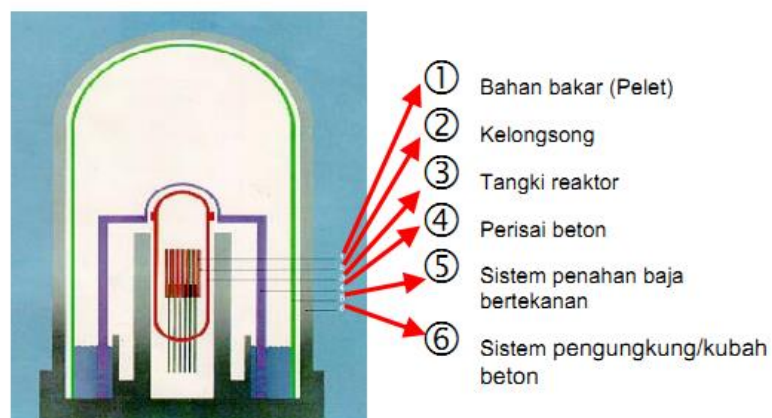
Gambar 2.4 Diagram PLTN Jenis PWR

Sumber: PDIN BATAN

Untuk mengangkut kalor sebesar mungkin, suhu air dikondisikan mencapai 300°C. Untuk menjaga air tidak mendidih (yang dapat terjadi pada suhu 100°C pada tekanan 1 atm), air diberi tekanan 160 atm. Air panas diangkut melalui suatu alat penukar panas (*heat exchanger*), dan kalor dari air panas

dipindahkan ke air yang mengalir di sekitar alat penukar panas (sistem pendingin sekunder). Kalor yang dipindahkan ke sistem pendingin sekunder memproduksi uap yang memutar turbin. Turbin dikopel dengan suatu generator listrik, tempat daya keluaran listrik menuju konsumen melalui kawat transmisi tegangan tinggi. Setelah keluar dari turbin, uap didinginkan kembali menjadi air oleh pengembun (*condenser*) dan kemudian dikembalikan lagi ke alat penukar panas oleh pompa sekunder [26].

Sistem keselamatan operasi reaktor terutama ditujukan untuk menghindari bocornya radiasi dari dalam teras reaktor. Berbagai usaha pengamanan dilakukan untuk melindungi pekerja dan anggota masyarakat dari bahaya radiasi ini. Sistem keselamatan reaktor dirancang mampu menjamin agar unsur-unsur radioaktif di dalam teras reaktor tidak terlepas ke lingkungan, baik dalam operasi normal atau waktu ada kejadian yang tidak diinginkan. Kecelakaan terparah yang diasumsikan dapat terjadi pada suatu reaktor nuklir adalah hilangnya sistem pendingin teras reaktor. Peristiwa ini dapat mengakibatkan pelelehan bahan bakar sehingga unsur-unsur hasil fisi dapat terlepas dari tabung bahan bakar. Hal ini dapat mengakibatkan unsur-unsur hasil fisi tersebar ke dalam ruangan penyungkup retortupaktor [24]. Salah satu jenis sistem penghalang ganda ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Sistem Penghalang Ganda (*Multiple Barrier*)

Sumber: PDIN BATAN

Agar unsur-unsur hasil fisi tetap dalam keadaan tertutup, maka reaktor nuklir memiliki sistem keamanan yang ketat dan berlapis-lapis. Karena digunakan sistem berlapis maka sistem pengamanan ini dinamakan penghalang ganda. Adapaun jenis penghalang tersebut adalah sebagai berikut:

- 1) Penghalang pertama adalah matrik bahan bakar nuklir. Lebih dari 99% unsur hasil fisi akan tetap terikat secara kuat dalam matriks bahan bakar ini.
- 2) Penghalang kedua adalah tabung bahan bakar. Apabila ada unsur hasil fisi yang terlepas dari matriks bahan bakar, maka unsur tersebut akan tetap terkungkung di dalam tabung yang dirancang tahan bocor.
- 3) Penghalang ketiga adalah sistem pendingin. Seandainya masih ada unsur hasil fisi yang terlepas dari tabung, maka unsur tersebut akan terlarut dalam air pendingin primer sehingga tetap tertutup dalam tangki reaktor.
- 4) Penghalang keempat adalah perisai beton. Tangki reaktor disangga oleh bangunan berbentuk kolam dari beton yang dapat berperan sebagai penampung air pendingin apabila terjadi kebocoran.
- 5) Penghalang kelima dan keenam adalah sistem pengungkung reaktor secara keseluruhan yang terbuat dari pelat baja dan beton setebal dua meter serta kedap udara [26].

3. Pengelolaan Limbah Radioaktif

a. Limbah Radioaktif

Limbah radioaktif merupakan hasil samping dari kegiatan pemanfaatan teknologi nuklir. Dalam limbah radioaktif ini terdapat unsur-unsur radioaktif yang masih memancarkan radiasi. Limbah radioaktif tidak boleh dibuang ke lingkungan karena radiasi yang dipancarkan berpotensi memberikan efek merugikan terhadap kesehatan manusia [26].

Program pengelolaan limbah radioaktif ditujukan untuk menjamin agar tidak seorang pun akan menerima paparan radiasi melebihi nilai batas yang diizinkan. Terdapat hal-hal unik yang menguntungkan dalam rangka pengelolaan limbah radioaktif:

- 1) Sifat fisika dari zat radioaktif yang selalu meluruh menjadi zat stabil (tidak radioaktif lagi). Karena terjadi peluruhan, maka jumlah zat radioaktif akan selalu berkurang oleh waktu. Sifat ini sangat menguntungkan karena cukup hanya dengan menyimpan secara aman, zat radioaktif sudah berkurang dengan sendirinya.
- 2) Sebagian besar zat radioaktif yang terbentuk dalam teras reaktor nuklir umumnya memiliki waktu paruh yang sangat pendek, mulai orde beberapa detik hingga beberapa hari. Hal ini menyebabkan peluruhan zat radioaktif yang sangat cepat yang berarti terjadi pengurangan volume limbah yang sangat besar dalam waktu relatif singkat.
- 3) Saat ini telah berhasil dikembangkan berbagai jenis alat ukur yang sangat peka terhadap radiasi. Dengan alat ukur ini keberadaan zat radioaktif sekecil apapun selalu dapat dipantau [26].

b. Pengolahan Limbah Radioaktif

Secara keseluruhan, pengelolaan limbah radioaktif yang lazim dilakukan meliputi tiga pendekatan pokok bergantung besar kecilnya volume limbah, tinggi rendahnya aktivitas zat radioaktif serta sifat-sifat fisika dan kimia limbah tersebut. Tiga pendekatan pokok itu meliputi:

- 1) Limbah radioaktif dipekatkan dan dipadatkan yang pelaksanaannya dilakukan di dalam wadah khusus untuk selanjutnya disimpan dalam waktu yang cukup lama. Cara ini efektif untuk pengelolaan limbah radioaktif cair yang mengandung zat radioaktif beraktivitas sedang dan atau tinggi.
- 2) Limbah radioaktif disimpan dan dibiarkan meluruh dalam tempat penyimpanan khusus sampai aktivitasnya sama dengan aktivitas zat radioaktif lingkungan. Cara ini efektif jika dipakai untuk pengelolaan limbah radioaktif cair atau padat yang beraktivitas rendah dan berwaktu paruh pendek.
- 3) Limbah radioaktif diencerkan dan didispersikan ke lingkungan. Cara ini efektif untuk pengelolaan limbah radioaktif cair atau gas beraktivitas rendah.

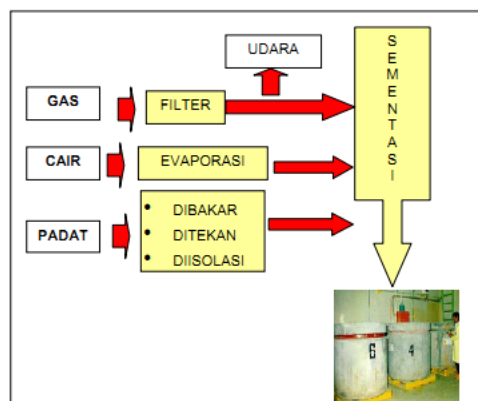
Dengan ketiga pendekatan itu diharapkan bahwa aktivitas limbah radioaktif yang lepas ke lingkungan sama dengan aktivitas zat radioaktif yang secara alamiah sudah ada pada lingkungan. Dengan cara itu faktor keselamatan manusia dan lingkungan tetap merupakan prioritas utama dalam pemanfaatan teknologi nuklir [26].

c. Penyimpanan Lestari

Baik bahan bakar bekas yang tidak mengalami proses ulang maupun bahan-bahan radioaktif sisa hasil proses olah ulang akan tetap diperlakukan sebagai limbah radioaktif. Oleh karena itu, semua bentuk limbah radioaktif harus disimpan secara lestari. Penyimpanan lestari limbah radioaktif secara aman merupakan tujuan akhir dari pengelolaan limbah radioaktif [26].

Untuk mempermudah dalam proses penyimpanan lestari limbah radioaktif, maka semua bentuk limbah diubah ke dalam bentuk padat. Limbah radioaktif cair yang terbentuk diolah dengan proses evaporasi. Sistem ini mampu mengolah limbah radioaktif cair menjadi konsentrat radioaktif dan destilat yang tidak radioaktif [26].

Gas-gas yang terbentuk juga tertutup dalam pengungkung reaktor. Gas ini kemudian disaring melalui sistem ventilasi dengan filter yang berlapis-lapis. Setelah dipakai untuk pengikatan radioaktif, filter tersebut selanjutnya diperlakukan sebagai limbah padat [26]. Skema pengelolaan limbah radioaktif ditunjukkan pada Gambar 2.6.

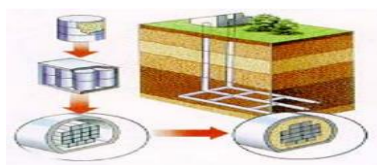


Gambar 2.6 Skema Pengelolaan Limbah Radioaktif
Sumber: PDIN BATAN

Pemadatan limbah radioaktif dimaksudkan agar limbah tersebut terikat dengan kuat alam suatu matriks padat sangat kuat. Matriks dirancang mampu bertahan hingga zat radioaktif yang diikatnya meluruh mencapai kondisi radioaktifnya setara dengan radioaktif lingkungan. Dengan pemadatan seperti ini maka zat radioaktif tidak akan terlepas ke lingkungan dalam kondisi apa pun selama disimpan [26].

Proses pemadatannya bisa dilakukan dengan semen (sementasi), aspal (bitumenisasi), polimer (polimerisasi), maupun bahan gelas (vitrikasi). Padatan limbah radioaktif kemudian dimasukkan ke dalam kontainer yang dibuat dari baja tahan karat. Reaktor nulis untuk pembangkit yang menghasilkan tenaga berdaya 1.200 MWe setiap tahunnya menghasilkan limbah radioaktif padat berupa bahan bakar bekas sebanyak 30 tahun. Namun setelah diolah ulang dan dipadatkan, volume limbah hanya sebanyak 4 m³. Selanjutnya disimpan dalam penyimpanan sementara yang berukuran 50 m x 50 m x 4 m. Tempat penampungan ini mampu menampung limbah padat yang berasal dari 10 reaktor yang beroperasi selama 50 tahun [26].

Setelah mengalami penyimpanan selama 50 tahun di penyimpanan sementara, kemampuan memancarkan radiasi dari limbah tersebut sudah sangat kecil. Selanjutnya dipindahkan ke tempat penyimpanan akhir (*ultimate storage*) yang berada di bawah permukaan tanah. Tahapan penyimpanan akhir ini atau penyimpanan lestari merupakan merupakan tahap akhir proses pengolahan limbah. Falsafahnya: zat radioaktif yang semula diambil dari tanah (proses penambangan uranium), dikembalikan lagi ke dalam tanah [26]. Salah satu penyimpanan lestari limbah radioaktif ditunjukkan pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Penyimpanan Lestari Limbah Radioaktif
Sumber: PDIN BATAN

2.5.2 Aplikasi Reaktor Nuklir

Sebagai penghasil radioisotop, reaktor atom dapat menghasilkan berbagai macam radioisotop yang dapat dimanfaatkan untuk banyak keperluan. Selain itu reaktor atom juga dapat menghasilkan neutron yang dapat digunakan untuk penelitian. Unsur radioaktif yang tersedia di alam tidak memadai untuk memenuhi kebutuhan tertentu yang menghendaki sifat-sifat tertentu dari unsur radioaktif tersebut [26].

Penggunaan radioisotop, di samping mendatangkan banyak manfaat, juga dapat mendatangkan masalah. Masalah yang dihadapi sekarang ini di antaranya, masalah pengontrolan dan pembuangan limbah nuklir. Pembuatan persenjataan nuklir dari negara-negara maju maupun negara yang berkembang yang tidak dikontrol akan membahayakan bagi kehidupan [26].

Di bidang kedokteran, radioisotop digunakan untuk keperluan diagnosis dan perawatan medis. Mesin sinar X merupakan peralatan diagnosis penting yang selama bertahun-tahun telah digunakan. Alat ini membutuhkan arus listrik untuk pengoperasiannya. Kini dengan menggunakan sinar gamma dari sinar radioisotop, dapat diperoleh hasil yang sama. Karena peralatan yang menggunakan sinar gamma sangat ringan dan tidak memerlukan arus listrik yang besar, maka alat ini dapat digunakan di lapangan atau di tempat-tempat yang sekiranya pasien sulit dipindahkan ke ruang sinar X [26].

2.6 Uranium

Uranium adalah bahan yang bersifat radioaktif. Uranium bukan merupakan logam yang jarang karena keberadaannya di alam mencapai 50 kali lebih banyak dibandingkan air raksa yang sudah sejak lama dikenal orang. Uranium terdapat sebagai mineral dalam kerak bumi, juga dalam air laut. Salah satu gambar uranium ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Uranium Alam

Cadangan uranium terdapat terutama di Amerika Serikat, Kanada, Rusia dan beberapa negara Afrika seperti Gabon, Nigeria dan Afrika Selatan. Peristiwa-peristiwa alam dan proses geologi telah membentuk uranium sebagai mineral. Karena mineral tersebut bersifat radioaktif dan untuk mendapatkannya harus melalui proses penggalan dalam tambang, maka uranium seringkali dikenal juga sebagai bahan galian nuklir. Mineral uranium terdapat dalam kerak bumi pada hampir semua jenis batuan, terutama batuan asam seperti granit, dengan kadar 3-4 gram dalam satu ton batuan. Di alam dapat ditemukan lebih dari 100 jenis mineral uranium, antara lain yang terkenal adalah *uraninite*, *pitchblende*, *coffinite*, *brannerite*, *carnatite* dan *tyuyamunitite*. Ada tiga jenis isotop uranium yang diperoleh dari hasil penambangan, yaitu ²³⁵U dengan kadar 0,72 %, ²³⁸U dengan kadar 99,27 % dan ²³⁴U dengan kadar yang sangat kecil yaitu 0.0055%. dari ketiga isotop uranium tersebut, hanya ²³⁵U yang dapat digunakan sebagai bahan bakar fisi [17]. Terdapat tiga jenis isotop uranium seperti pada Tabel 2.6.

Tabel 2.6 Radioactive Properties of Key Uranium Isotopes

Isotop	Half-Life	Natural Abundance (%)	Specific Activity (Ci/g)	Decay Energy (MeV)
U-234	248,000 yr	0.0055	6.2×10^{-3}	4.8 α
U-235	700 million yr	0.72	2.2×10^{-6}	4. 4 α 0.21 γ
U-238	4.5 billion yr	99.27	3.3×10^{-7}	4.2 α

Sumber: *Depleted Uranium Hexafluoride Fact Sheet* (2011)

2.6.1 Karakteristik Uranium

Uranium dengan lambang (U) mempunyai nomor atom 92, warna putih nikel dan massa atom 238,029 g/mol yang ditunjukkan pada Tabel 2.7 tentang karakteristik uranium.

Tabel 2.7 Karakteristik Uranium

Keterangan Umum	Unsur
Nama, Lambang, Nomor Atom	Uranium, U, 92
Deret Kimia	Logam transisi
Golongan, Peroide, Blok	IIIB, 7, f
Penampilan/warna	Putih Nikel
Massa Atom	238,029 g/mol
Konfigurasi Elektron	[Rn]5f ³ 6d ¹ 7s ²

Sumber: www.rsc.org/periodic-table/element/92/uranium

Selain itu uranium mempunyai ciri-ciri fisik berupa fase padat, massa jenis 18,95 g/cm³ dan titik lebur 1,408 K yang telah dijelaskan pada Tabel 2.8.

2.8 Ciri-Ciri Fisik Uranium

Ciri-ciri Fisik	
Fase	Padat
Massa jenis	19.1 g/cm ³
Titik Lebur	1,408 K
Titik Didih	4,407 K
Entalpi Penguapan	422,58 kJ/mol
Entalpi Pembentukan	15,48 kJ/mol

Sumber: www.rsc.org/periodic-table/element/92/uranium

2.6.2 Sumber Unsur Uranium

Mineral uranium terdapat dalam kerak bumi pada hampir semua jenis batuan, terutama batuan asam seperti granit, dengan kadar 3-4 gram dalam satu ton batuan. Kadar uranium dalam batuan granit relatif paling tinggi bila dibandingkan dengan kadarnya di dalam batuan beku lainnya. Oleh sebab itu, batuan tersebut dapat dikatakan sebagai pembawa uranium. Batuan granit dengan volume 1 km³ dapat membentuk cebakan uranium sebanyak 2.500 ton. Pada umumnya uranium dalam batuan ini terdistribusi secara merata dan dapat dijumpai dalam bentuk mineral uranit maupun oksida kompleks euksinit betafit. Uranit merupakan bahan di mana komponen utamanya dengan persentase lebih dari 80% berupa uranium, sedang euksinit betafit merupakan bahan dengan kandungan uraniumnya cukup besar (lebih dari 20%) tetapi uranium tersebut bukan merupakan komponen utamanya.

2.6.3 Manfaat Uranium

Uranium mempunyai beberapa manfaat yaitu terdiri dari pembangkit tenaga listrik, berguna dibidang kesehatan, industri, dapat digunakan sebagai bahan peledak dan juga digunakan sebagai penghitam plat foto.

1. Pembangkit listrik. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) merupakan salah satu aplikasi yang memanfaatkan radioaktif yang dipancarkan oleh unsur yang tak stabil seperti unsur uranium.
2. Kesehatan. Penggunaan radioaktif untuk kesehatan sudah sangat banyak, dan sudah berapa juta orang di dunia yang terselamatkan karena pemanfaatan

radioaktif ini. Sebagai contoh sinar – X untuk penghancur tumor atau untuk ‘foto’ tulang. untuk memantau fungsi organ dan mendeteksi kerusakan yang ditimbulkan oleh pengobatan, misalnya memantau fungsi jantung penderita yang mendapat perawatan kemoterapi. Selain itu, pencitraan tulang menggunakan teknik kedokteran nuklir merupakan cara untuk mendeteksi penyebaran kanker ke tulang. Selain untuk mendeteksi kanker, teknologi nuklir juga sangat membantu dalam penyembuhan penyakit jantung. Teknologi nuklit memiliki kemampuan dalam mendiagnosis dan menentukan prognosis penyakit jantung koroner. Secara umum teknik kedokteran nuklir dalam bidang kardiologi (penyakit jantung) menggunakan kamera gamma yang dapat digunakan untuk menilai fungsi jantung secara kualitatif dan kuantitatif.

3. Industri. Saat ini radioaktif digunakan oleh industri. Misalnya industri pupuk, atau bahkan digunakan oleh perusahaan yang mencari sumber-sumber baru minyak bumi yang ada di perut bumi.
4. Digunakan sebagai bahan peledak. Pada 1789 uranium ditemukan untuk pertama kali. Namun, potensi uranium sebagai bahan peledak baru ditemukan tahun 1938 oleh dua ilmuwan Jerman, Otto Hahn dan Fritz Strassman. Mereka berdua mendemonstrasikan fisi (pembelahan) inti uranium guna dijadikan bahan utama bom atom.
5. Digunakan sebagai penghitam pelat foto. Membungkus sebuah pelat foto dengan kertas hitam dan menempatkan beragam material fosforen di atasnya. Kesemuanya tidak menunjukkan hasil sampai ketika ia menggunakan garam uranium. Terjadi bintik hitam pekat pada pelat foto ketika ia menggunakan garam uranium tersebut.

2.7 Ammonium Diuranat

Ammonium diuranat (ADU) adalah senyawa penting dalam industri bahan bakar nuklir. Proses produksi dan sifat bahan bakar nuklir sangat tergantung pada karakteristik ammonium diuranat (ADU). Amonium diuranat (ADU) merupakan senyawa yang tidak larut dalam air.

Larutan ammonium hidroksida biasanya digunakan pada saat proses pengendapan uranil nitrat menjadi ammonium diuranat yang terdapat pada Gambar 2.10.

2.8.1 Karakteristik Ammonium Hidroksida

Ammonium hidroksida mempunyai warna bening, bau yang sangat kuat, berbentuk larutan dan mempunyai rumus molekul NH_4OH seperti pada Tabel 2.9 yang menjelaskan tentang karakteristik ammonium hidroksida.

Tabel 2.10 Karakteristik Ammonium Hidroksida

Keterangan umum	
Nama	Ammonium Hidroksida
Rumus molekul	NH_4OH
Bentuk	Larutan
Warna	Bening

Sumber: *Material Safety Data Sheet Ammonium hydroxide water solution*

2.8.2 Bahaya Ammonium Hidroksida

Larutan ammonium hidroksida dengan konsentrasi yang tinggi atau pekat dapat menyebabkan kerusakan mata, apabila terjadi kontak secara langsung. Bahkan kerusakan mata yang parah akan terjadi apabila terjadi kontak dengan ammonia yang terlarut. Ammonium hidroksida berbahaya bila tertelan, akan meracuni saluran pernafasan dan menginfeksi dan mengiritasi kulit bila terjadi kontak secara langsung [18].

2.8.3 Kegunaan

Ammonium hidroksida mempunyai beberapa manfaat yang terdapat di laboratorium, rumah tangga, PPPK (Pertolongan Pertama Pada Kecelakaan) dan dalam bidang industri.

1. Di laboratorium banyak digunakan sebagai pereaksi analisis, baik kualitatif mau pun kuantitatif.
2. Dalam rumah tangga banyak digunakan dalam campuran obat pembersih sendok garpu perak dan barang logam lainnya.
3. Dalam PPPK (Pertolongan Pertama Pada Kecelakaan) digunakan untuk obat sengatan serangga untuk menetralkan asam racunnya.

4. Dalam aneka industri digunakan sebagai bahan dasar pembuatan asam nitrat, Na-karbonat, pupuk ZA, pengisi mesin pendingin (pengganti *freon*), pengawet lateks, dan lain-lain [15].

2.9 Uranil Nitrat

Uranil nitrat ($\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$) adalah larutan garam uranium kuning. Larutan uranil nitrat memiliki warna kekuning-hijauan. Uranil nitrat dapat dibuat dengan mereaksikan garam uranium dengan asam nitrat. Hal ini larut dalam air, etanol, aseton, dan eter, tetapi tidak dalam benzena, toluena, atau kloroform. Sifat – sifat fisik uranil nitrat yaitu:

- Rumus molekul : $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2$
- Massa molekul relatif : 394,04 g/mol
- Densitas : 2,81 g/cm³
- Titik lebur : 60,2⁰C
- Titik didih : 118⁰C (dekomposisi)
- Kelarutan dalam air : 122 g / 100 g air (20⁰C)

2.10 Prospek PLTN di Indonesia

Pembangunan PLTN di Indonesia merupakan program untuk membangun dan memanfaatkan ilmu pengetahuan dan teknologi nuklir baik di bidang non-energi maupun di bidang energi. Pemanfaatan non-energi di Indonesia sudah berkembang cukup maju. Seperti pada bidang pertanian, kesehatan, industri, dan lingkungan. Sedangkan dalam bidang energi (pembangkitan listrik), hingga tahun 2011 Indonesia masih berupaya mendapatkan dukungan publik [20].

Mayoritas masyarakat Indonesia masih kontra atau tidak setuju dengan rencana pembangunan PLTN ini. Penolakan tersebut disebabkan oleh kurangnya sosialisasi mengenai manfaat yang dapat dirasakan dari pembangunan PLTN ini. Tantangan terbesar bagi pemerintah adalah bagaimana meningkatkan akseptabilitas listrik nuklir melalui peningkatan kepercayaan (*trust*) masyarakat. Sosialisasi informasi dan edukasi publik perlu diperkuat, agar persepsi yang salah mengenai risiko bahaya nuklir berubah. Sebenarnya Indonesia telah membuktikan kemampuannya dalam mengoperasikan dan merawat dengan aman seluruh fasilitas nuklir selama puluhan tahun, tapi masyarakat tidak sertamerta percaya

bahwa bangsa ini siap melangkah ke PLTN, kurang baiknya *safety culture* di sektor non-nuklir dapat berimbas pada pengelolaan PLTN. Padahal telah diketahui bahwa nuklir menerapkan sistem dan standar yang jauh berbeda. Melalui manajemen dan pelatihan yang baik dengan sistem pengawasan nasional dan internasional yang efektif, nuklir telah membuktikan tingkat keselamatan dan keamanan yang tinggi [21].

Pada provinsi Bangka Belitung (Babel) direncanakan akan dibangun PLTN, karena aspek geologi yang baik dengan lapisan granit di pulau ini yang tidak bergerak. Lokasi PLTN yang paling tepat adalah di desa Sebagin, Simpang Rimba, Kabupaten. Bangka Selatan dan Teluk Manggris di Muntok, Bangka Barat. Keduanya berada sekitar 30 kilometer dari pantai Barat Sumatera yang mudah disambungkan ke Jawa-Sumatera grid dan Asean grid ke Singapura dan Malaysia. Bahan Bakar Nuklir thorium (ditaksir sekitar 23.000 ton) juga ditemukan di Provinsi ini bersama timah, zirkon, uranium, LTJ (Nd, Y, Sc, Eu, Gd, Dy, Er, dll). Lahan 850 hektar (Ha) di Muntok dan 850 Ha di Simpang Rimba telah disiapkan untuk beberapa PLTN ke depan [23].

Ketersediaan bahan bakar nukir yaitu Uranium dan Thorium di Indonesia sebagian besar tersedia di Kalimantan Barat, Papua, dan Sulawesi Barat. Bahan bakar tersebut telah dikategorikan terukur, teraka, dan teridentifikasi. Batan telah menyusun peta radiasi dan radioaktivitas lingkungan, antara lain untuk mengkaji efek kesehatan bagi masyarakat yang tinggal di daerah radiasi tinggi serta indikasi bahan tambang seperti Uranium, Thorium dan mineral sejenisnya [22].

Pemerintah Indonesia telah melakukan studi kelayakan sesuai dengan standard-standard yang telah ditentukan oleh IAEA, dan IAEA telah memberikan perijinan pembangunan PLTN berdasarkan data yang diberikan oleh BATAN dimana data tersebut telah memenuhi standar kelayakan yang telah ditentukan oleh IAEA [21].

BAB III

METODE PENELITIAN

Pengambilan data pada penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan cara mengendapkan larutan uranil nitrat menjadi ammonium diuranat dalam mencari parameter dengan kondisi terbaik.

3.1 Variabel Penelitian

Variabel yang digunakan dalam penelitian ini adalah variabel temperatur, pH dan waktu kontak.

1. Variasi pH

- Variabel berubah: 4, 5, 6, 7 dan 8
- Variabel tetap: temperatur 70°C dan waktu kontak 30 menit

2. Variasi temperatur

- Variabel berubah: 40, 50, 60, 70 dan 80°C
- Variabel tetap: pH 7 dan waktu kontak 30 menit

3. Variasi waktu kontak

- Variabel berubah: 0, 15, 30, 45 dan 60 menit
- Variabel tetap: temperatur 70°C dan pH 7

3.2 Preparasi Sampel

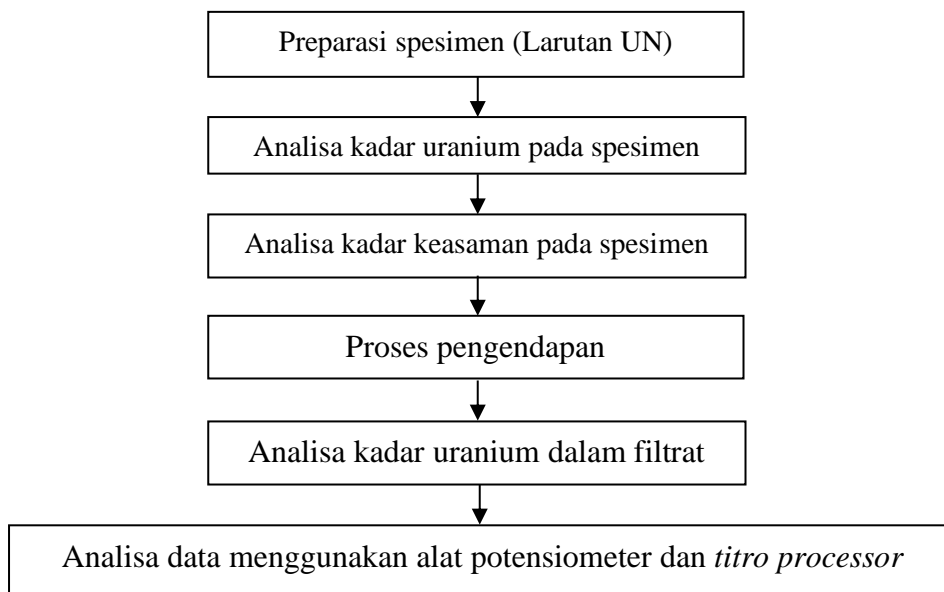
Sampel yang digunakan dalam proses pengendapan ADU yaitu larutan UN yang merupakan bahan utama dalam proses ini, larutan filtrat ADU yaitu sisa saringan pada pemisahan fase padat dan cair. Larutan H₂SO₄ 1M, HNO₃ 1M, dan *Aquadest* biasanya digunakan untuk melarutkan. Larutan asam sulfamat, larutan asam *phosphat* pekat, larutan ferosulfat (FeSO₄), ammonium molibdat, dan vanadil sulfat 1,25% biasanya digunakan pada proses titrasi. Larutan K₂Cr₂O₇ biasanya ditambahkan secara otomatis pada alat *titro processor*. Larutan (NH₄)₂C₂O₄ digunakan pada analisa kadar keasaman. Larutan NH₄OH biasanya ditambahkan pada larutan UN pada proses pengendapan ADU.

Alat yang digunakan dalam proses pengendapan ADU yaitu alat-alat gelas laboratorium biasanya digunakan sebagai wadah suatu larutan, pipet biasanya

digunakan untuk membantu untuk menambahkan suatu larutan, buret biasanya digunakan sebagai wadah untuk larutan NH_4OH , kertas saring biasanya digunakan untuk membantu pada proses penyaringan, cawan porselin sebagai wadah untuk serbuk ADU, corong saringan untuk membantu pada proses penyaringan, pompa vakum biasanya digunakan sebagai alat vakum pada proses penyaringan. Magnet pengaduk biasanya digunakan untuk mengaduk larutan yang berada di dalam *beaker glass*. *Stirrer* atau pengaduk yang biasanya menggunakan magnet pengaduk. pH meter digunakan untuk menguji kadar pH. *Hot plate and stirrer* sebagai alat pemanas sekaligus ada pengaduknya. Mesin *Titro Processor* untuk membantu mengetahui dalam proses titrasi. Mesin *oven* biasanya digunakan untuk mengeringkan serbuk ADU yang masih basah. Mesin *Hot plate* sebagai alat pemanas dalam proses pengendapan. Potensiometer biasanya digunakan untuk mengetahui kadar uranium dalam larutan UN.

3.3 Langkah-langkah Penelitian

Adapun langkah-langkah yang dilakukan dalam penelitian ini yaitu tahap persiapan, analisa kadar uranium, keasaman, proses pengendapan, dan analisa kadar uranium pada filtrat. Langkah-langkah penelitian disajikan dalam bentuk *flow chart* seperti pada Gambar 3.2.

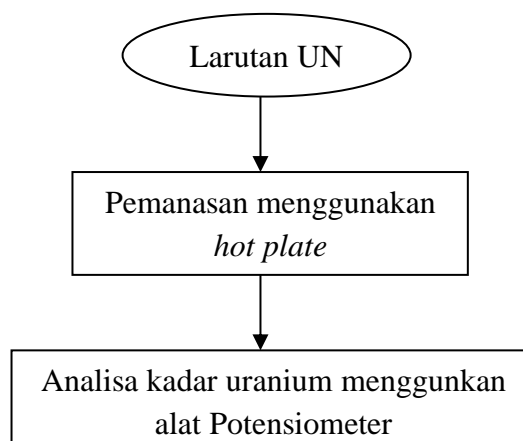


Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

3.3.1 Persiapan Spesimen (Larutan UN)

Bahan utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah larutan UN (Uranil Nitrat) dari Cogema-Perancis. Biasanya larutan UN dipekatkan agar bisa dilakukan untuk proses selanjutnya yaitu dengan cara dipanaskan dengan menggunakan *hot plate* dengan suhu $\pm 200^{\circ}\text{C}$. Larutan UN yang berwarna kuning apabila mulai mengendap atau mulai kering ditambahkan larutan H_2SO_4 1M sebanyak 1 ml, apabila sudah mulai kering ditambahkan kembali dengan larutan HNO_3 1M 1 ml. Apabila sudah mengering dan berubah warna menjadi putih, larutan UN yang sudah mengering tersebut bisa dilakukan untuk proses selanjutnya. Proses selanjutnya yaitu analisa kadar uranium dan analisa kadar keasaman.

3.3.2 Analisa Kadar Uranium pada Spesimen



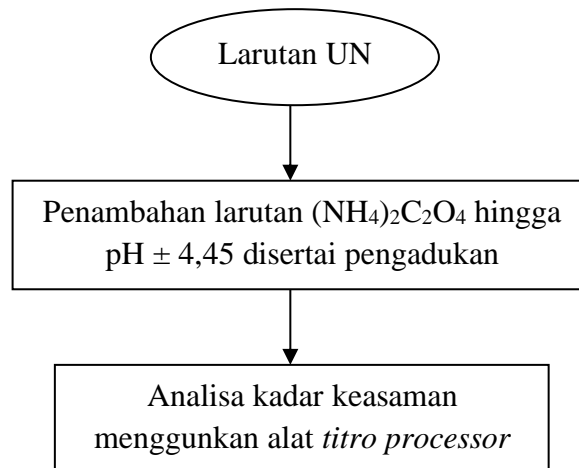
Gambar 3.3 Diagram Alir Analisa Kadar Uranium pada Larutan UN

Analisa kadar uranium pada larutan UN disajikan dalam bentuk diagram alir seperti pada Gambar 3.3. Pelaksanaan analisa kadar uranium dalam spesimen (larutan UN) ini bertujuan untuk mengetahui kadar uranium dalam larutan UN (Uranil Nitrat). Pada penelitian ini yang dilakukan pertama-tama memanaskan larutan UN hingga kering, karena larutan UN yang berwarna kuning masih sangat pekat untuk melakukan proses selanjutnya. Kemudian larutan UN dipanaskan menggunakan *hot plate* yang bersuhu $\pm 200^{\circ}\text{C}$ dengan ditambahkan larutan H_2SO_4 1 ml dan HNO_3 1 ml. Apabila larutan tersebut sudah kering, kemudian ditambahkan Asam Sulfamat 0,5 ml dan Asam *Phosphat* pekat sebanyak 4 ml lalu

diaduk menggunakan *stirrer*, diaduk sampai larutan menjadi putih susu. Menambahkan 0,5 ml larutan ferosulfat dan 1 ml larutan Ammonium molibdat diaduk selama 1 menit sampai larutan coklat hilang/menjadi jernih. Tambahkan 1 ml larutan Vanadil sulfat 1,25% dan *aquadest* sampai volume mencapai 50 ml. Setelah itu larutan tersebut siap untuk di analisis kadar uranium dengan menggunakan alat Potensiometer.

3.3.2 Analisa Kadar Keasaman pada Spesimen

Pelaksanaan analisa kadar keasaman dalam larutan UN untuk pengujian dilakukan dengan metode titrasi dengan menggunakan alat *titro processor*. Pada penelitian ini dilakukan pengambilan larutan UN yang dicampur dengan *aquadest*. Setelah itu ditambahkan larutan $(\text{NH}_4)_2\text{C}_2\text{O}_4$ hingga mencapai $\text{pH} \pm 4,45$ sambil diaduk menggunakan *stirrer*. Setelah tercapai pH yang ditentukan, untuk mengetahui kadar asam bebas menggunakan alat titrasi (*Titro Processor*) dengan ditambahkan larutan NH_4OH . Analisa kadar keasaman pada spesimen disajikan dalam bentuk diagram alir seperti pada Gambar 3.4.

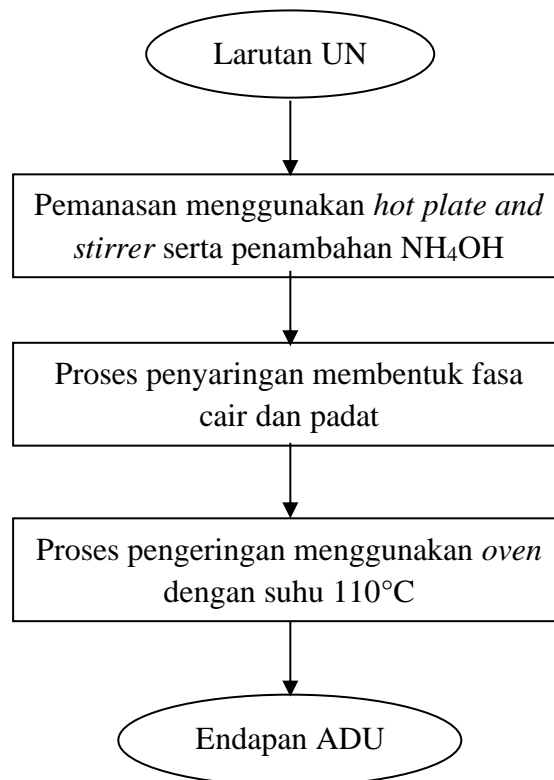


Gambar 3.4 Diagram Alir Analisa Kadar Keasaman pada Larutan UN

3.3.3 Proses Pengendapan

Pelaksanaan penelitian ini merupakan proses pengendapan dari larutan UN menjadi ADU. Pada penelitian ini proses pengendapan larutan UN menggunakan pemanas *hot plate and stirrer*, karena selain memanaskan juga berfungsi untuk mengaduk larutan UN yang ditetaskan dengan larutan NH_4OH dengan menggunakan buret. Setelah itu larutan UN dipanaskan dengan alat *hot plate and*

stirrer hingga mencapai suhu 70°C dan menggunakan pH meter, pada suhu 65°C larutan NH₄OH mulai dimasukkan secara perlahan-lahan hingga mencapai pH yang diinginkan dan dijaga sampai 30 menit. Kemudian akan terdapat larutan yang membentuk 2 fase yaitu fase cairan dan endapan. Setelah itu larutan tersebut disaring untuk memisahkan fase cair dan fase padatan, disaring menggunakan kertas saringan sebanyak 2 buah disaring secara vakum. Fase cair (filtrat) dimasukkan ke dalam wadah dan didiamkan beberapa saat hingga dingin, setelah dingin filtrat tersebut bisa dilakukan untuk dianalisa kadar uranium. Sedangkan fase padatan dikeringkan di dalam *oven* yang bersuhu 110°C. Proses pengendapan ADU disajikan dalam bentuk diagram alir seperti pada Gambar 3.5.

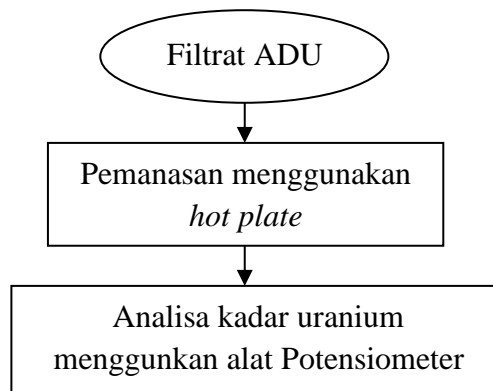


Gambar 3.5 Diagram Alir Proses Pengendapan

3.3.4 Analisa Kadar Uranium pada Filtrat

Pelaksanaan penelitian ini yaitu untuk mengetahui kadar uranium dalam filtrat ADU. Pada penelitian ini hampir sama dengan analisa kadar uranium dari larutan UN, hanya saja larutan yang digunakan yaitu filtrat dari hasil saringan pada proses pengendapan ADU. Pada penelitian ini yang dilakukan pertama-tama

memanaskan filtrat hingga kering, karena filtrat tersebut masih pekat untuk melakukan proses selanjutnya. Kemudian filtrat dipanaskan menggunakan *hot plate* yang bersuhu $\pm 200^{\circ}\text{C}$ dengan ditambahkan larutan H_2SO_4 1 ml dan HNO_3 1 ml. Apabila larutan tersebut sudah kering, kemudian ditambahkan Asam Sulfamat 0,5 ml dan Asam *Phosphat* pekat sebanyak 4 ml lalu diaduk menggunakan *strirrer*, diaduk sampai larutan menjadi putih susu. Menambahkan 0,5 ml larutan ferosulfat dan 1 ml larutan Ammonium molibdat diaduk selama 1 menit sampai larutan coklat hilang/menjadi jernih. Tambahkan 1 ml larutan Vanadil sulfat 1,25% dan *aquadest* sampai volume mencapai 50 ml. Setelah itu larutan tersebut siap untuk di analisis kadar uranium dengan menggunakan alat Potensiometer. Analisa kadar uranium pada filtrat ADU disajikan dalam bentuk diagram alir seperti pada Gambar 3.6.



Gambar 3.6 Diagram Alir Analisa Kadar Uranium pada Filtrat

3.4 Jadwal Penelitian

Penelitian dilakukan di BATAN, Badan Tenaga Nuklir Nasional, berlokasi di Instalasi Elemen Bakar Ekperimental (IEBE) Pusat Teknologi Bahan Bakar Nuklir (PTBBN) BATAN Puspipstek, Serpong. Penelitian ini berlangsung selama dua bulan yaitu dari bulan Februari sampai dengan Maret 2016. Jadwal kegiatan penelitian ini terdiri dari persiapan penelitian, analisa kadar uranium, analisa kadar keasaman, proses pengendapan, analisa kadar uranium dalam filtrat, pengolahan data dan analisis data serta penyusunan laporan disajikan dalam bentuk Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Jadwal Kegiatan Penelitian

No	Uraian	Februari				Maret				April				Mei				Juni			
		Minggu ke-																			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
1	Persiapan penelitian	■																			
2	Analisa kadar uranium	■	■																		
3	Analisa kadar keasaman			■																	
4	Proses pengendapan			■	■																
5	Analisa kadar uranium dalam filtrat					■	■	■	■												
6	Pengolahan data dan analisis data									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
7	Penyusunan laporan									■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Pengaruh pH pada proses Pengendapan UN Menjadi ADU

Derajat keasaman atau pH pada proses pengendapan ADU merupakan faktor yang sangat berpengaruh terhadap konversi pengendapan dan sifat endapannya [8]. Variasi pH dilakukan dengan menggunakan parameter suhu dan waktu kontak yang ditetapkan. Parameter pH divariasikan pada pH 4, 5, 6, 7 dan 8 dengan menggunakan suhu operasi 70°C serta waktu kontak 30 menit seperti pada Tabel 4.1. pH dengan kondisi terbaik ditentukan oleh besarnya konversi pengendapan yang dihasilkan.

Tabel 4.1 Kondisi Operasi pada Variasi pH

pH	Waktu Kontak (menit)	Volume NH ₄ OH (ml)	Jumlah Uranium Dalam Umpan (gr)	Temperatur Awal (°C)
4	30	46	18602,5	27
5	30	49,8	18602,5	27
6	30	53,2	18602,5	27
7	30	53,6	18602,5	27
8	30	112	18602,5	27

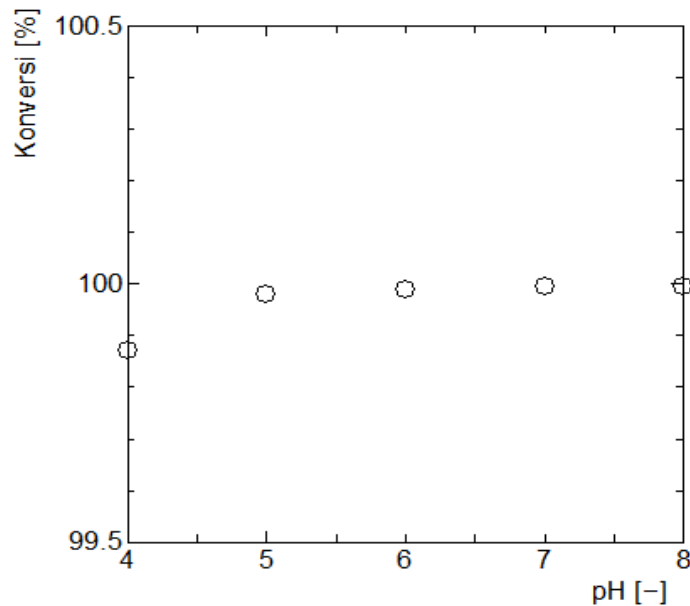
Dalam menentukan konversi pada proses pengendapan uranil nitrat untuk mendapatkan ammonium diuranat digunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{konversi pengendapan} = \frac{\text{jumlah uranium dalam umpan} - \text{jumlah uranium dalam filtrat}}{\text{jumlah uranium dalam umpan}} \times 100\%$$

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Pengaruh pH Terhadap ADU

pH	Temperatur Operasi (°C)	Jumlah Uranium Dalam Filtrat (gr)	Volume Filtrat (ml)	Konversi (%)
4	70	17,292	262	99,907
5	70	2,117	275	99,988
6	70	1,542	275,5	99,991
7	70	0,715	255,5	99,996
8	70	0,998	312	99,994

Hasil perhitungan pada variasi pH pada temperatur operasi 70°C dengan menggunakan rumus konversi pengendapan seperti pada tabel 4.2 menunjukkan bahwa pH 7 memiliki hasil konversi tertinggi karena kadar uranium dalam filtratnya paling rendah, sedangkan pH 4 hasil konversinya paling rendah karena kadar uranium dalam filtrat yang didapat paling tinggi.



Gambar 4.1 Pengaruh pH terhadap ADU

Pada gambar 4.1 diatas dapat dilihat bahwa pH 7 merupakan pH dengan kondisi terbaik pada proses pengendapan karena menghasilkan konversi ADU yang paling tinggi dengan reaksi pengendapan yang sempurna. Pengendapan pada pH terendah yaitu pada pH 4 menghasilkan konversi pengendapan terkecil yaitu 99.875%. ADU yang terbentuk sangat mudah disaring karena menghasilkan padatan yang besar. Tetapi reaksi pengendapannya tidak sempurna karena waktu pengendapannya terlalu cepat. Pada pH 5 mengalami sedikit kenaikan pada hasil konversi yaitu 99.986%. Endapan yang dihasilkan berupa padatan-padatan besar yang mudah disaring. Tetapi reaksi pengendapannya tetap tidak sempurna dikarenakan waktu pengendapannya yang masih terlalu cepat. Pada pH 6 konversi pengendapan mengalami kenaikan namun belum mencapai titik optimum dikarenakan hasil konversi pH 6 masih lebih sedikit dari pH 7. Pada pH 8 hasil konversi mengalami penurunan hal itu disebabkan oleh waktu pengendapan yang

lebih lama, sehingga menghasilkan endapan yang lebih halus dan lebih sulit untuk disaring.

4.2 Pengaruh Temperatur pada Proses Pengendapan UN Menjadi ADU

Temperatur reaksi berpengaruh terhadap kecepatan reaksinya, dimana semakin tinggi temperatur reaksi, maka kecepatan reaksi akan semakin cepat, temperatur reaksi juga berpengaruh terhadap kualitas pengendapan [8]. Variasi temperatur dilakukan dengan menggunakan waktu kontak dan pH yang ditetapkan. Temperatur pengendapan divariasikan pada 40, 50, 60, 70 dan 80°C, dengan menggunakan waktu kontak 30 menit dan pH 7 seperti pada Tabel 4.3. Temperatur dengan kondisi terbaik ditentukan oleh besarnya konversi pengendapan yang dihasilkan.

Tabel 4.3 Kondisi Operasi pada Variasi Temperatur

pH	waku (menit)	volume NH ₄ OH (ml)	Jumlah uranium dalam umpan (gr)	Temperatur Awal (°C)
7	30	52,2	18602,5	27
7	30	53,8	18602,5	27
7	30	62,2	18602,5	27
7	30	52,6	18602,5	27
7	30	65	18602,5	27

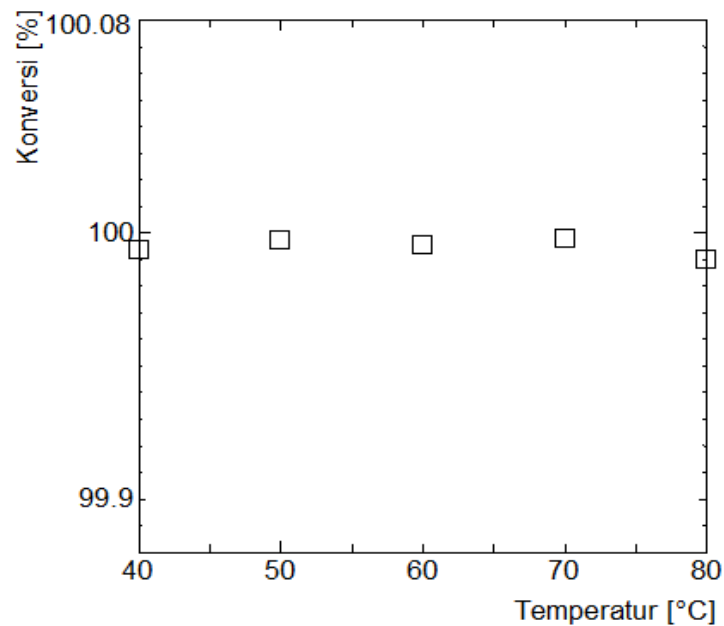
Dalam menentukan konversi pada proses pengendapan uranil nitrat untuk mendapatkan ammonium diuranat digunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{konversi pengendapan} = \frac{\text{jumlah uranium dalam umpan} - \text{jumlah uranium dalam filtrat}}{\text{jumlah uranium dalam umpan}} \times 100\%$$

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Pengaruh Temperatur Terhadap ADU

Temperatur operasi (°C)	Jumlah uranium dalam filtrat (gr)	Volume Filtrat (ml)	Konversi (%)
40	1,132	333,1	99,993
50	0,413	295	99,997
60	0,637	245	99,996
70	0,306	255,5	99,998
80	1,377	255	99,992

Hasil perhitungan pada variasi temperatur pada pH 7 dengan menggunakan rumus konversi pengendapan seperti pada tabel 4.4 menunjukkan bahwa temperatur 70°C memiliki hasil konversi tertinggi karena kadar uranium dalam filtrat yang didapat paling rendah, sedangkan pada temperatur 80°C hasil konversinya paling rendah karena kadar uranium dalam filtrat yang didapat paling tinggi dari temperatur yang lain.



Gambar 4.2 Pengaruh Temperatur terhadap ADU

Pada Gambar 4.2 menunjukkan temperatur 70°C merupakan temperatur dengan kondisi terbaik pada proses pengendapan UN menjadi ADU karena memiliki konversi pengendapan paling tinggi dibandingkan temperatur lainnya. Pada temperatur 40, 50, dan 60°C akan diperoleh endapan yang sulit disaring dan reaksi pengendapannya belum sempurna, dikarenakan temperatur reaksi berpengaruh terhadap kecepatan reaksi, dimana semakin tinggi temperaturnya maka semakin cepat reaksinya. Namun pada temperatur 80°C reaksi sudah tidak dapat dipercepat kembali karena ammonia dalam larutan mudah terlepas menyebabkan panas reaksi yang berlebihan dan membuat pH larutan mudah berubah atau tidak stabil.

4.3 Pengaruh Waktu Kontak pada Proses Pengendapan UN Menjadi ADU

Waktu kontak atau waktu tinggal dalam reaktor berpengaruh terhadap jumlah endapan yang dihasilkannya, semakin lama waktu tinggal dalam reaktor, maka zat-zat yang beraksi akan semakin banyak sehingga endapan yang terjadi juga akan semakin banyak, tetapi setelah konversi reaksi yang maksimum, penambahan waktu tinggal dalam reaktor sudah tidak berarti lagi [8]. Variasi waktu kontak dilakukan dengan menggunakan parameter temperatur dan pH yang telah ditetapkan. Waktu kontak divariasikan pada waktu 0, 15, 30, 45 dan 60 menit dengan menggunakan suhu operasi 70°C dan pH 7 seperti pada Tabel 4.3. Waktu kontak dengan kondisi terbaik ditentukan oleh besarnya konversi pengendapan yang dihasilkan.

Tabel 4.5 Kondisi Operasi pada Pengaruh Waktu Kontak Terhadap ADU

pH	Waktu (menit)	Volume NH ₄ OH (ml)	Jumlah uranium dalam umpan (gr)	Temperatur Awal (°C)
7	0	52	18602,5	27
7	15	52,6	18602,5	27
7	30	53,6	18602,5	27
7	45	55,6	18602,5	27
7	60	76,8	18602,5	27

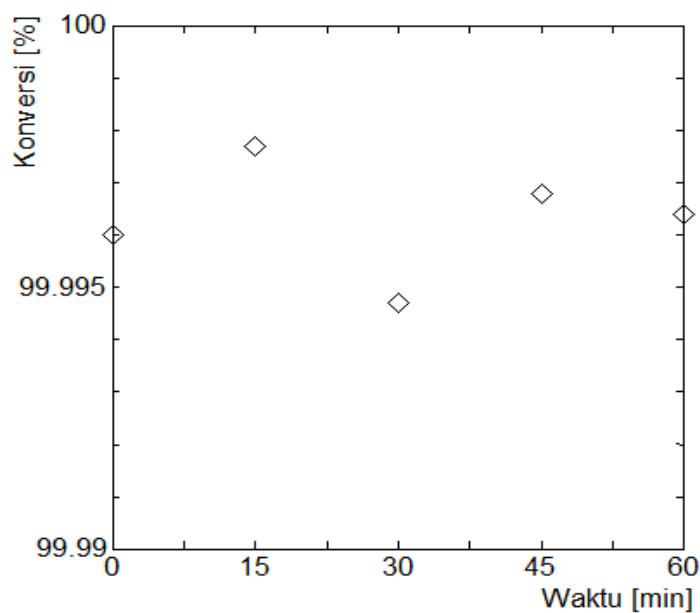
Dalam menentukan konversi pada proses pengendapan uranil nitrat untuk mendapatkan ammonium diuranat digunakan rumus sebagai berikut:

$$\text{konversi pengendapan} = \frac{\text{jumlah uranium dalam umpan} - \text{jumlah uranium dalam filtrat}}{\text{jumlah uranium dalam umpan}} \times 100\%$$

Hasil perhitungan pada variasi waktu kontak pada temperatur 70°C dengan menggunakan rumus konversi pengendapan seperti pada tabel 4.6 menunjukkan bahwa waktu kontak 15 menit memiliki hasil konversi tertinggi karena kadar uranium dalam filtrat yang didapat paling rendah, sedangkan waktu kontak 30 menit hasil konversinya paling rendah, karena kadar uranium dalam filtrat yang didapat paling tinggi.

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Pengaruh Waktu Kontak Terhadap ADU

Waktu kontak	Temperatur Operasi (°C)	Jumlah uranium dalam filtrat	Volume Filtrat	Konversi (%)
0	70	0,592	282	99,9960
15	70	0,327	273	99,9977
30	70	0,715	255,5	99,9947
45	70	0,464	273	99,9968
60	70	0,524	276	99,9964



Gambar 4.3 Pengaruh Waktu Kontak terhadap ADU

Dalam penelitian ini waktu kontak atau waktu tinggal dalam reaktor tidak berpengaruh terhadap jumlah endapan yang dihasilkan karena konversi yang dihasilkan tidak terlalu jauh berbeda. Pada gambar 4.3 diatas diperoleh waktu kontak 15 menit merupakan waktu yang paling efisien dalam proses pengendapan. Karena pada waktu kontak 15 menit hasil konversi yang didapat paling tinggi dari waktu yang lain, sedangkan pada waktu kontak 0 menit endapan yang dihasilkan belum terbentuk secara sempurna sehingga konversi yang dihasilkan kecil. Pada waktu kontak 30, 45, dan 60 menit terjadi fluktuasi hasil karena reaksi konversi yang maksimum telah terlewati.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan penelitian dan analisa data yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Variasi temperatur dan variasi pH pada proses pengendapan memberikan pengaruh yang sangat kecil karena menghasilkan konversi ADU yang tidak jauh berbeda (10^{-5}), sedangkan pada variasi waktu kontak tidak memberikan pengaruh pada konversi ADU.
2. Kondisi terbaik pada proses pengendapan uranil nitrat menjadi ammonium diuranat (ADU) yaitu pada kondisi temperatur 70°C dengan persentase 99,997%, pH 7 dengan persentase 99,996% dan waktu kontak 15 menit dengan presentase 99,997%.

5.2 Saran

Saran yang terkait pada pelaksanaan penelitian yaitu:

1. Sebelum dan setelah proses pengendapan sebaiknya dilakukan analisa kadar pengotor untuk mengetahui kandungan pengotor yang dihasilkan pada proses pengendapan ADU.
2. Dalam melakukan proses pengendapan pada variasi waktu kontak tidak berpengaruh karena hasil konversi yang tidak jauh berbeda, sebaiknya diganti parameter lain seperti kecepatan pengaduk.

DAFTAR PUSTAKA

1. Galung Susanto, Bambang. 2007, Optimasi Rancangan Kapasitas Produksi Pabrik Elemen Bakar Nuklir Untuk Mendukung PLTN di Indonesia. PDIPTN BATAN: Yogyakarta
2. Permana, Sidik. 2005. *Energi Nuklir dan Kebutuhan Energi Masa Depan (Era Renaissans Energi Nuklir Dunia dan Energi Nuklir Indonesia)*. Research Laboratory for Nuclear Reactors, Tokyo Institute of Technology: Japan
3. ANONYM. *Pengenalan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN)*. PDIN BATAN: Jakarta
4. Adiwardoyo. 1996. *Prospek PLTN dalam Penyediaan Energi Nasional*. PEBN BATAN: Jakarta
5. Sutarman. *Pembangunan PLTN Sebagai Satu Solusi Krisis Listrik di Indonesia*. Puslitbang Keselamatan Radiasi dan Biomedika Nuklir – BATAN: Jakarta
6. Benedict, Manson, et al. 1981. Nuclear chemical engineering, 2nd. ed. McGraw-Hill Book Company: New York.
7. Marwoto. 1984. *Pilot Conversion Plant Tinjauan pada bagian pelarutan konsentrat uranium (Seksi 300) IEBE*. Tangerang: Unit pengelola teknis persiapan pengembangan industri nuklir BATAN.
8. Jan setiawan, masripah dan Ratih Langenati, 2011, *Karakterisasi Morfologi dan Struktur Kristal Serbuk UO_2 dari Yellow Cake dengan Variasi Temperatur Pengendapan ADU*, PTBBN BATAN: Serpong.
9. Deni Mustika, Aminhar Lakoni, Noor Yudhi, Mujinem. 2010, *Pengaruh pH Terhadap Pengendapan Ammonium diuranat (ADU) pada Konversi Yellow Cake menjadi UO_2* , PTBBN BATAN: Serpong.
10. Torowati, Pranjono, MM.Lilis Windaryati, Noor Yudhi. 2010, *Pengaruh Waktu Kontak Terhadap Efisiensi Pengendapan Larutan Uranil Nitrat Hasil Pemurnian Yellow Cake*, PTBBN BATAN: Serpong.
11. Madi Parmanto, Eko & Dimas Irawan, 2007. *Mengenal PLTN dan prospeknya di Indonesia*. PDIN BATAN: Jakarta.
12. Rahmayanti, Tri. 2008. *Oksidasi gagal pellet sinter UO_2 pada suhu $600^\circ C$ dengan variasi waktu*. Departemen Fisika FMIPA IPB: Bogor. Skripsi

13. Kusnoputranto, Haryoto. 1996. Energi Nuklir dan Dampaknya Terhadap Lingkungan dan Kesehatan Masyarakat. PSPKR-BATAN.
14. http://dbpedia.cs.ui.ac.id/page/Bahan_bakar_nuklir
15. ANONYM. *Industri Bahan Bakar Nuklir Di Dunia*. Ensiklopedi Teknologi Nuklir –BATAN
16. <http://www.elektroindonesia.com/elektro/ener33.html>
17. ANONYM. 2001. *Depleted Uranium Hexafluoride Fact Sheet*.
18. ANONYM. *Material Safety Data Sheet Ammonium hydroxide water solution, >14N NH₄OH (>25% as ammonia, NH₃)*
19. <http://www.batan.go.id/index.php/id/home/sejarah>
20. <http://ebtke.esdm.go.id/post/2016/03/23/1163/11.negara.bahas.potensi.uraniu>
m
21. http://warintek.ristekdikti.go.id/nuklir/info_nuklir/penjelasan_batan.html
22. ANONYM. 2013. *Indonesia Miliki Cadangan 70.000 Ton Uranium Terbanyak di Kalimantan Barat*. BATAN: Jakarta.
23. Moch. Djoko Birmano. 2011. *Kajian Awal Dampak Pembangunan PLTN di Bangka Belitung*. PPEN-BATAN.
24. ANONYM. *Ensiklopedi Teknologi Nuklir*. BATAN
25. ANONYM. 2009. *Nuclear Fuel Cycle Information System*. IAEA: Austria
26. Adiwardojo, dkk. 2010. *Mengenal Reaktor Nuklir dan Manfaatnya*. PDIN BATAN.
27. ANONYM. *Objek Inspeksi Dalam Bidang Instalasi Nuklir*. BATAN

LAMPIRAN A
GAMBAR ALAT DAN BAHAN



Mettler Toledo



pH Meter



Titro Processor



Heater



Mesin Oven



Stirrer



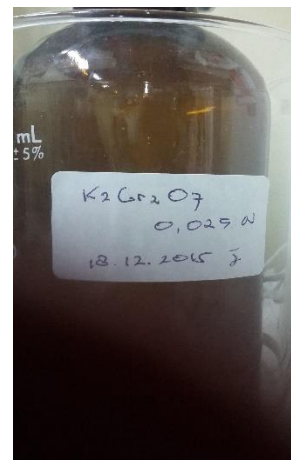
Alat-alat Laboratorium



Larutan UN



Larutan untuk Proses Titrasi

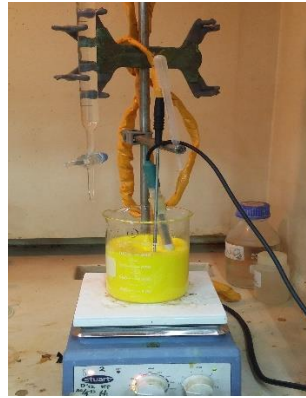


Larutan $K_2Cr_2O_7$

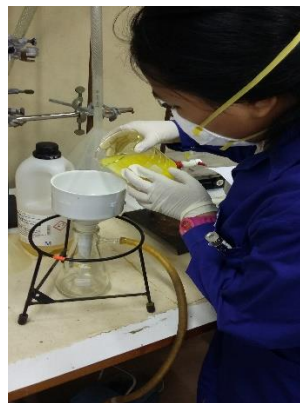
LAMPIRAN B
GAMBAR PROSES PENELITIAN



**Larutan UN Sebelum
Terbentuk Endapan**



**Larutan UN Mulai
Terbentuk Endapan**



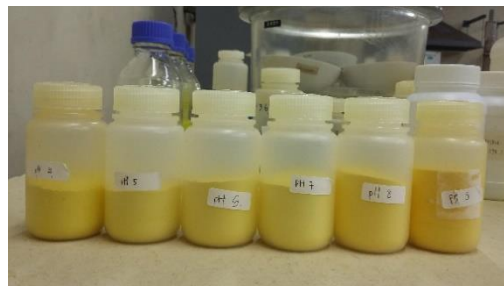
Proses Penyaringan



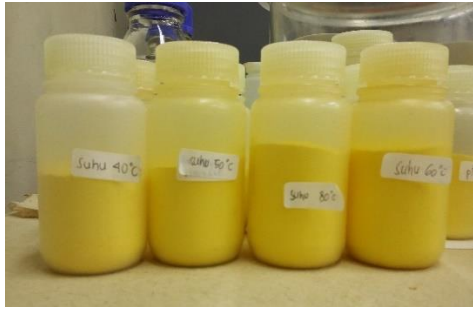
**Endapan ADU Setelah
Proses Penyaringan**



Proses Penggerusan



Serbuk pH 4, 5, 6, 7 dan 8



Serbuk Suhu 40, 50, 60, 70 dan 80



Filtrat ADU