

STUDI STATUS TEKNIK PENGAYAAN D₂O

Sukarsono, Imam Dahroni, Didik Herhady
Pusat Teknologi Akselerator dan Proses Bahan BATAN

ABSTRAK

Telah dilakukan studi status teknik pengayaan air berat baik yang telah dilakukan di Indonesia maupun di dunia. Proses pembuatan air berat yang sudah diteliti meliputi distilasi air, distilasi hidrogen, pemisahan dengan laser, elektrolisa dan pertukaran isotop. Pertukaran isotop sendiri dapat menggunakan pasangan bahan kimia seperti air-hidrogen sulfit, ammonium-hidrogen, aminomethan-hidrogen, dan air- hidrogen. Untuk proses pertukaran isotop ada yang dijalankan pada satu panas (mono thermal) atau dua panas (bithermal). Negara produsen terbesar air berat adalah Kanada. Negara-negara yang sudah mempunyai pabrik air berat adalah Amerika Serikat, Norwegia dan India. Proses yang banyak digunakan untuk produksi air berat adalah pertukatan isotop Girdler-Sulphide (G-S), distilasi dan elektrolisa, yang masing-masing mempunyai kekurangan dan keunggulannya sendiri. Penelitian yang sudah dilaksanakan di Batan Yogyakarta bertujuan untuk melihat karakteristik pemisahan air berat, meliputi distilasi, eletrolisa dan pertukaran isotop. Beberapa peralatan sudah berdiri adalah distilasi 3 buah dengan kolom pirek tinggi 2 m, stainless steel tinggi 3 m dan baja 6 m. Peralatan elektrolisa yang ada adalah 50 buah sel elektrolisa, dan unit pertukaran isotop dengan katalisator Ni-Cr₂O₃ dan Pt-Carbon. Peralatan tersebut dalam keadaan yang belum siap dioperasikan

ABSTRACT

Technical status study of heavy water enrichment in Indonesia and also in the world has been done. Heavy water enrichment processes have been investigated were water disstillation, hydrogen disstillation, laser enrichment, electrolysis and isotope exchange. For the isotope exchange, the chemical pair can be used were water-hydrogen sulphite, ammonium-hydrogen, aminomethan-hydrogen, and water-hydrogen. For the isotope exchange, there was carried out by monothermal or bithermal. The highest producer of heavy water is Canada, and the other producer is USA, Norwegian and India. The processes be used in the world are isotope exchange Girdler Sulphide (GS), distillation and electrolysis. Research of heavy water carried out in Batan Yogyakarta, has a purpose to know the characteristic of heavy water purification. Several apparatus which has erected were 3 distillation colm: Pyrex glass of 2 m tall, stainless steel colm of 3 m tall and steel of 6 m tall. Electrolysis apparatus is 50 cell electrolysis and an isotope exchange unit which has catalyst: Ni-Cr₂O₃ and Pt-Carbon. These apparatus were not ready to operate

PENDAHULUAN

Penelitian air berat di BATAN sudah dimulai sejak tahun 1978 sejak Batan di Yogyakarta masih bernama Pusat Penelitian Tenaga Atom Yogyakarta. Pada waktu PPTA Batan berubah nama menjadi Pusat Penelitian Bahan Murni dan Instrumentasi, penelitian air berat tetap dilakukan di Yogyakarta. Pada sekitar tahun sembilan puluhan, penelitian ini dihentikan karena orientasi reaktor nuklir tidak mengacu ke reaktor nuklir berbahan bakar uranium alam lagi.

Dengan mulai ramai dibicarakan pembangunan PLTN yang diharapkan dapat beroperasi tahun 2016, dan adanya pertimbangan disamping beberapa reaktor PWR yang mulai dibangun 2010, akan dibangun juga reaktor dengan bahan bakar DUPIC yang menggunakan bahan bakar bekas dan bermoderator air berat, timbullah wacana untuk menghidupkan lagi penelitian air berat, sebagai persiapan penggunaan D₂O pada bahan bakar DUPIC di masa yang akan datang.

Tulisan ini akan membahas sejauh mana penelitian air berat sudah pernah dilakukan di BATAN Yogyakarta, bagaimana pengembangan penelitian air berat di masa yang akan datang dan juga perkembangan produksi dan penelitian air berat di dunia.

Bahan Dasar

Air berat adalah senyawa oksida dari isotop hydrogen dengan rumus kimia (D₂O). Air berat banyak terdapat dalam air alam, gas alam, petroleum dan sebagainya. Air berat di alam kadar kadarnya sangat kecil sekali seperti dalam air alam reratanya hanya sebesar 147 ppm⁽¹⁾ Metode untuk mengambil air berat dari air alam dan dari gas alam telah banyak dilakukan, tetapi yang sangat penting adalah pengkayaan air berat dari air alam. Hal tersebut disebabkan jika bahan dasar deuterium dari bahan gas alam dan petroleum akan mengalami hambatan antara lain^(1,2) : 1. Harus melalui proses kimia lebih dahulu, misal diubah dahulu dalam bentuk gas hydrogen, amoniak dan sebagainya yang akan menambah biaya operasi, 2. Jumlah air berat yang dihasilkan sangat sedikit sekali jika dibandingkan dengan kebutuhan air berat yang digunakan pada suatu reaktor daya (PHWR)

Sebagai ilustrasi persoalan dalam pemisahan air berat, dari 1000 ton amoniak per hari hanya dapat menghasilkan 75 ton deuterium per tahun, padahal untuk suatu operasi awal reaktor daya 600M W, dibutuhkan air berat sebanyak 500 ton. Hal lain yang perlu diperhatikan untuk operasi selama satu tahun harus disediakan 10 ton air berat untuk mengganti bahan moderator tersebut yang terdegradasi / hilang.

Proses Pemisahan Air Berat

Karena hanya terdiri dari satu macam isotop hidrogen, pemisahan deuterium dari air lebih mudah dibandingkan separasi isotop dari unsur-unsur lain. Pemisahan isotop deuterium dan air dapat dilakukan melalui proses fisika dan kimia. Meskipun kandungan deuterium di alam yang sangat kecil, (di bawah satu bagian dalam 6000 bagian), deuterium dapat diekstrak dengan perkiraan biaya kurang lebih \$300/kg D₂O. Biaya pemisahan ini relative kecil bila dibandingkan untuk memisahkan emas dari batuan yang diperlukan biaya diatas 6000 \$/kg.

Untuk menggambarkan faktor ekonomis proses produksi D₂O, dapat dilihat distilasi fraksinasi air untuk proses pemisahan. Pada 13 kPa (51°C) tekanan uap bentuk deuterium pada fase cair berkurang 5,5% dibandingkan dengan pada fase uap, atau dapat dinyatakan sebagai faktor pemisahan

$$\alpha = 1.055 = \frac{\text{Konsentrasi deuterium dalam fase uap}}{\text{konsentrasi deuterium dalam fase cair}} \quad (1)$$

Besaran α ini turun pada suhu yang naik dan karena besaran α pada titik didih normal hanya 1.015, maka penggunaan vakum sangat menguntungkan untuk menjaga harga α masih tetap tinggi pada titik didih air karena air mendidih pada suhu yang rendah.

Proses pemisahan deuterium bisa menggunakan berbagai macam metode. Diantara metode-metode tersebut ada yang sudah terbukti, dan digunakan untuk memproduksi air berat, ada juga yang masih dalam taraf penelitian. Rangkuman proses pemisahan air berat dapat dilihat dalam Tabel 1.

Ada lima batasan karakteristik yang dapat digunakan untuk membuat pertimbangan terhadap proses pembuatan D₂O yaitu distilasi air, distilasi hidrogen, elektrolisa air, pemisahan isotop dengan laser dan pertukaran isotop. Tabel 1 membandingkan beberapa proses yang mungkin untuk produksi D₂O dalam 5 kriteria tersebut. Hal-hal yang menyebabkan proses tidak ekonomis dicetak dengan huruf tebal proses yang bagus dicetak dengan huruf miring. Tabel 1 tersebut berisi proses yang mungkin untuk memproduksi D₂O dari air, gas atau bahan lain, tetapi tidak semuanya ekonomis untuk dilakukan dalam skala komersial. Tiap proses mengandung hal yang positif dan hal yang negatif.

Tabel 1. Rangkuman Proses Pemisahan Air Berat⁽²⁰⁾

Proses	Faktor pemisahan	Energi dibutuhkan	Kecepatan Pemisahan	Aliran berlawanan	Masukan
Distilasi Air	1,015-1,055	Sangat tinggi	Moderate	Ya	<i>Air</i>
Distilasi cairan H ₂	~ 1,5	Moderat	Pelan	Ya	H ₂ sangat murni
Elektrolisa air	5-10	Sangat tinggi	Cepat	tidak	Air

Proses	Faktor pemisahan	Energi dibutuhkan	Kecepatan Pemisahan	Aliran berlawanan	Masukan
Pemisahan isotop dengan laser	<i>Sangat besar >20.000</i>	Moderat	Pelan	Tidak penting	CFCs
Pertukaraan Air-H ₂ S	1,8 - 2,3	Tinggi	Cepat	Ya	Air
Pertukaran Ammonia-Hidrogen	2,8 - 6	moderat	Lambat, diperlukan katalis	Ya	H ₂
Pertukaran Aminometan-H ₂	3,5 - 7	Moderat	Lambat, diperlukan katalis	Ya	H ₂
Air-Hydrogen	2 - 3,8	Moderat	Hampir tidak ada, diperlukan katalis	Ya	Air

Dalam Tabel 1, hal-hal yang menyebabkan proses tidak ekonomis dicetak dengan huruf tebal proses yang bagus dicetak dengan huruf miring. Tabel 1 tersebut berisi proses yang mungkin untuk memproduksi D₂O dari air, gas atau bahan lain, tetapi tidak semuanya ekonomis untuk dilakukan dalam skala komersial. Tiap proses mengandung hal yang positif dan hal yang negatif.

Elektrolisa air mempunyai factor pemisahan yang besar, tetapi satu-satunya jalan untuk menggunakan proses ini adalah secara berulang yaitu menggabungkan antara oksigen dan hidrogen menjadi air dan kemudian kembali dielektrolisa sehingga energi yang diperlukan sangat intensip. Elektrolisis tidak tergantung pada kesetimbangan tetapi pada efek kinetik isotop, hidrogen berkembang lebih cepat dari deuterium, sedang faktor pemisahan dari proses lain adalah tergantung dari nilai termodinamik yang tertentu dan tergantung pada suhu, sedang kecepatannya tergantung dari detail dari peralatannya.

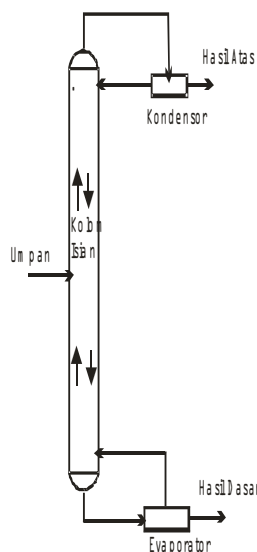
Penelitian untuk pemisahan air berat yang pernah dilakukan adalah:

1. Distilasi vakum : 1). Air, 2). Hidrogen
2. Elektrolisa air
3. Pemisahan isotop dengan laser
4. Pertukaran isotop : 1). Air-hidrogen sulfit, 2). Ammonium- Hidrogen, 3). Aminomethan-hidrogen, 4). Air-hidrogen

1. Distilasi Fraksinasi Air Berat

Gambar 1 menggambarkan distilasi vakum air. Air dididihkan dan diembunkan pada bagian atas kolom isian, sedang kolom isian sebagai tempat terjadinya kontak antara air dan uap, sehingga terjadi kesetimbangan uap-air. Kolom isian diberi packing yang sifatnya terbasahi oleh air (bersifat suka air), biasanya dari bronce fosfor. Melalui bahan isian tersebut cairan dan uap kontak secara berulang-ulang. Cairan yang turun, akan diperkaya deuteriumnya sedang uap yang naik menjadi berkurang deuteriumnya. Kontak antara cair-uap yang berulang-ulang, akan meningkatkan pemisahan deuterium. Karena faktor pemisahan yang sangat kecil, biasanya kontak itu dilakukan terulang-ulang sampai ratusan kesetimbangan. Proses distilasi cukup sederhana, panas ditambahkan pada dasar dan pendingin pada bagian atas. Proses dilakukan secara tertutup. Proses tambahan dibutuhkan untuk sistem kecil untuk mengeluarkan udara bocoran, pembuatan air murni untuk mencegah korosi yang akan melapisi packing. Hal yang membatasi proses distilasi ini adalah: a. Jumlah air yang harus diuapkan basar sehingga energi yang dibutuhkan besar pula, b. Faktor pemisahan sangat kecil, sehingga aliran internal antara boiler dan kondensor harus 13 kali lebih besar dari aliran air masuk, c. Diperlukan proses penguapan yang sangat besar, d. Bahan baku yang dimasukkan dibandingkan dengan hasil yang diperoleh sangat banyak, e. Konsentrasi D dalam air umpan sangat sedikit. Untuk produksi D₂O, maka sejumlah tertentu, maka sejumlah 100.000 kali produk harus dididihkan dan diembunkan. Karena itu proses ini tidak dapat dijadikan sebagai proses pemisahan D₂O yang utama. Meskipun demikian, distilasi air untuk pemisahan air

berat ada juga segi positifnya yaitu: a. Proses sangat cepat, b. Dapat dilakukan kontak lawan arah dari cair dan uap, c. Jumlah air tersedia tanpa batas



Gambar 1. Diagram Pemisahan air berat dengan distilasi

Prinsip dari metode proses distilasi adalah didasarkan atas perbedaan titik didih atau sifat volatilitas dari komponen penyusun dalam senyawa air alam. Di dalam air alam terdapat campuran dari H₂O, HDO dan D₂O yang dalam kondisi berkesetimbangan reaksi sebagai berikut^(1,3,7,8) :



Deuterium dalam kondisi kadar yang rendah hampir seluruhnya berupa senyawa HDO, jadi persamaan reaksi (1) kesetimbangannya bergeser kekanan, sedangkan apabila kadar deuterium meningkat dan mencapai kadar yang tinggi berujud senyawa D₂O yang berarti kesetimbangan reaksi (1) bergeser ke kiri.

Dalam proses distilasi campuran ketiga persenyawaan H₂O, HDO dan D₂O dianggap hanya terdiri dari dua senyawa saja yaitu H₂O dan D₂O. Untuk hal tersebut ada beberapa asumsi yang harus dipenuhi yaitu : a. Harga kesetimbangan dari persamaan (1) diasumsikan bernilai 4, b. Campuran dari senyawa tersebut adalah ideal, c. Berlaku asumsi bahwa hubungan ratio tekanan uap murni H₂O terhadap HDO = ratio tekanan uap murni HDO terhadap D₂O, d. Distribusi keberadaan senyawa HDO, H₂O dan D₂O dalam keadaan setimbang dan acak.

Dengan anggapan tersebut harga faktor pemisah dari campuran ke tiga komponen tersebut di atas adalah dapat di sederhanakan menjadi :

$$\alpha = \sqrt{\frac{P^\circ \text{H}_2\text{O}}{P^\circ \text{D}_2\text{O}}} \quad (3)$$

Dalam hubungan ini P^o H₂O dan P^o D₂O adalah tekanan uap murni H₂O dan D₂O, sedangkan simbol α disebut faktor pemisahan.

Faktor pemisahan menggambarkan mudah tidaknya suatu campuran senyawa tertentu dapat dipisahkan. Jika harga faktor pemisah sama dengan 1, maka kedua campuran tersebut tidak mungkin dapat dipisahkan, sedangkan apabila harga faktor pemisahan tersebut lebih besar dari 1 maka berarti dapat dipisahkan. Semakin besar harga faktor pemisahan semakin mudah dilakukan pemisahan. Di bawah ini ditampilkan hubungan antara harga faktor pemisah dengan tekanan uap H₂O pada Tabel 2.

Dari Tabel 2, maka jelaslah proses disitilasi air berat akan mendapatkan hasil yang baik apabila dilakukan pada kondisi vakum atau pada kondisi tekanan kurang dari 760 mmHg walaupun harga faktor pemisahnya relatif adalah kecil.

Tabel 2. Hubungan suhu, tekanan uap H₂O dan harga faktor pemisah

Suhu (°C)	Tekanan uap H ₂ O	α (faktor pemisah)
0	4,58	1,12
20	17,54	1,074
40	55,30	1,059
60	149,40	1,035
80	355	1,035
100	760	1,026

Perhitungan jumlah Tray / Unit pemisah dan tinggi kolom

Rumus untuk menghitung jumlah plat / unit pemisah yang dibutuhkan suatu kolom distilasi dapat dihitung secara teoritis sebagai berikut,

- 1). Menentukan jumlah unit pemisah kesetimbangan

Dengan menggunakan rumus Fenske⁽³⁾:

$$N_{\min} = \frac{\ln X_p (1 - X_F) / X_F (1 - X_p)}{\ln \alpha} \quad (4)$$

Dalam hal ini notasi X_F adalah fraksi umpan D₂O dan X_p adalah fraksi produk D₂O, jika dimisalkan fraksi umpan D₂O sebesar 149 ppm dan produk diinginkan 99,8 % D₂O, maka harga $N_{\min}$ (Jumlah plat minimum) adalah :

$$N_{\min} = \frac{\ln 0,998(1 - 0,000149) / 0,000149(1 - 0,998)}{\ln 1,05} = 308 \text{ buah (unit pemisah minimum)}$$

Untuk kebutuhan plat sesungguhnya dibutuhkan^(1,3) sebesar = $2 \times 308 = 616$ buah

- 2). Perhitungan tinggi kolom

Menurut Benedict⁽¹⁾ apabila dimisalkan sebuah unit pemisah diperlukan tinggi rerata 20 cm maka tinggi kolom distilasi yang diperlukan untuk mengkayakan air berat dari air alam (149 ppm) menjadi air berat bahan moderator (99,8 %) maka diperlukan tinggi sepanjang = $616 \times 20 \text{ cm}$ atau 123 meter.

Dalam praktek dilapangan dibuat minimal 4 buah kolom yang masing- masing mempunyai tinggi 30 meter.

- 3). Perhitungan diameter kolom

Menghitung diameter menggunakan dua rumusan langkah yaitu :

- (a) Menghitung steam yang lewat dalam kolom distilasi

Perhitungan diambil dari ratio molar minimum^(1,3) antara aliran Steam (G) terhadap produk (P) dan di dapatkan korelasi sebagai berikut :

$$G / P = \frac{X_p - X_F}{X_F} \left(\frac{\alpha}{\alpha - 1} \right) \quad (5)$$

$$G / P = \frac{0,998 - 0,000149}{0,000149} \left(\frac{1,05}{1,05 - 1} \right) = 141.000$$

Korelasi tersebut memberikan arti bahwa untuk mendapatkan produk air berat 1 mol derajat nuklir diperlukan steam/uap (umpan berupa gas/uap air alam) sebanyak 141.000 mol atau dilapangan sebesar hampir mencapai 200 000 mol steam.

(b) Perhitungan diameter melalui besarnya aliran massa steam persatuan volum⁽¹⁴⁾.

Korelasi hubungan diameter D dengan aliran massa adalah sebagai berikut :

$$D = \sqrt{\frac{4GM}{V_p}} \quad (6)$$

Dalam hal ini D= diameter, G = massa steam M = Bm gas /steam, V_p = aliran per satuan massa.

Harga diameter dapat diperoleh dari persamaan tersebut harganya sangat besar mengingat jumlah steam aliran (G) sangat tinggi. Dari pengalaman dilapangan diperoleh data, bahwa dengan pengakayaan air berat sebesar 92 % untuk produksi 3 ton air berat pertahun diperlukan D = 10 Inch dan tinggi kolom 20 meter. Jadi jelaslah bahwa untuk proses distilasi hambatan atau kendala yang harus dihadapi adalah : a). Masalah energi panas yang disediakan untuk mengubah fase cair air menjadi, b). fase gas adalah sangat besar sekali, c). Bahan peralatan proses sangat besar baik ukuran maupun jumlahnya.

Hal yang menguntungkan : a). Rancang bangunnya sederhana, b). Proses pemisahannya secara fisik tidak rumit, c). Untuk proses pengayaan tingkat akhir ukuran dan jumlahnya relatif kecil

2. Pemisahan dengan Metode Elektrolisis

Proses elektrolisis air alam adalah suatu proses yang menggunakan tenaga listrik untuk memisahkan isotop deuterium dan hidrogen. Proses ini mempunyai harga faktor pemisah antara 2-8 kali lipat dibandingkan dengan secara distilasi^(1,2).

Prinsip pengayaan adalah berdasarkan perbedaan mobilitas ion H⁺ dan D⁺ dalam sel elektrolisis. Massa deuterium lebih besar dari massa hidrogen, oleh karena itu di bagian elektrolit makin lama makin banyak kandungan deuteriumnya dibandingkan dengan dibagian produk yang dihasilkan yaitu berupa campuran gas H₂ dan O₂. Oleh karena itu di bagian elektrolisis semakin kaya kandungan deuterium^(3,7).

Untuk menginginkan konsentrasi air berat sampai ke derajat nuklir (99,8%) diperlukan jumlah stage sebanyak 16 buah apabila digunakan umpan air alam.

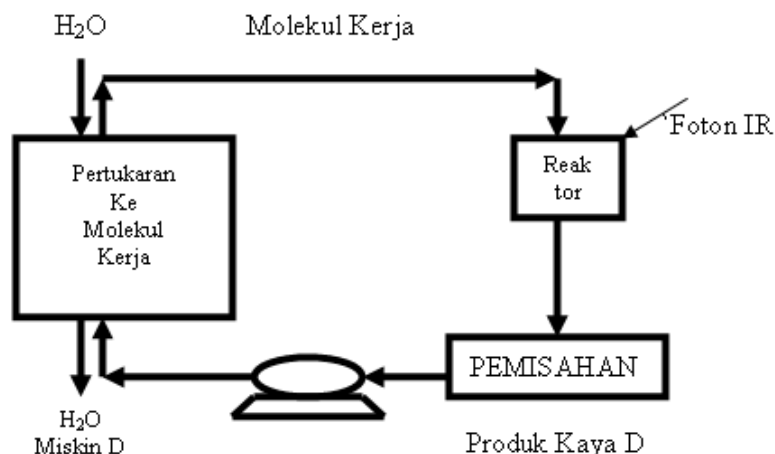
Harga faktor pemisah dari proses elektrolisis ini dipengaruhi oleh^(1,3) : 1. Tipe/jenis dari sel elektrolisis, 2. Kondisi suhu operasi, 3. Material katode, 4. Komposisi elektrolit,

Hal – hal yang dapat menurunkan harga faktor pemisah antara lain : 1. Pengotor dalam umpan, 2. Efek polarisasi, 3. Percikan dari busa cairan sel, 4. Suhu sel yang sangat tinggi, 5. Jenis elektrolit asam lebih jelek dari pada basa

3. Pemisahan air Berat dengan Laser

Pemisahan dengan laser menawarkan kemungkinan yang sangat menarik.⁽²⁰⁾ Gambar 2 menggambarkan konsep yang didasarkan pada perbedaan frekuensi resonansi dari ikatan akhir dari atom protium dan deuterium. Dalam teori orang dapat menset laser pada frekuensi yang tepat untuk ikatan dengan deuterium, dan memutuskannya sehingga dapat diperoleh deuterium yang bebas, dengan tingkat selektifitas yang tinggi. Tetapi pemecahan ikatan kimia dengan foton tunggal, memerlukan energi ultra violet dan mahal. Hal ini dihindari dengan penemuan dari Marling dari Laboratorium Lawrence Livermore. *Cascade* dari foton sinar infra merah dapat diatur selektif apabila foton disetel pada transisi pertama pada groundstate elektronik. Molekul deuterium sederhana yang tersedia melimpah dalam jumlah yang banyak seperti air, hydrogen, ammonia dan metana, tidak dapat digunakan untuk proses ini. Molekul tersebut harus diubah menjadi molekul yang selektif terhadap foton misalnya klorofluorokarbon. Setiap pemecahan senyawa yang selektif dengan foton, dihasilkan 1 atom deuterium. Senyawa yang selektif foton tersebut dideuterasi kembali dengan mengkontakkan secara berlawanan arah dengan air

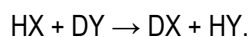
Bahan yang mempunyai sifat selektif terhadap foton yang baik adalah klorofluorokarbon yang mempunyai faktor pisah sampai 26.000. Sayangnya klorofluorokarbon ini tidak ramah lingkungan, karena dapat merusak lapisan ozon di angkasa.



Gambar 2. Pemisahan Air Berat dengan Laser

4. Pemisahan dengan Pertukaran Kation

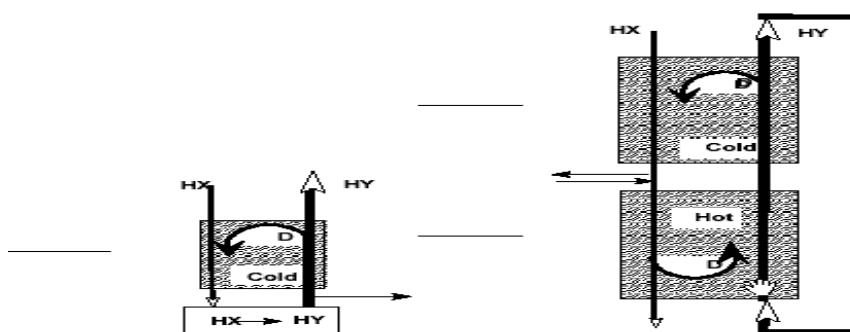
Proses yang tertampil di Tabel 1 tergantung dari faktor pemisahan dari 2 senyawa kimia dipengaruhi oleh type reaksi yang terjadi:



Berdasar pada panas yang digunakan dalam kolom pertukaran isotop dapat dibedakan menjadi proses monoterma dan biterma.

a. Monoterma versus Proses Biterma

Pemisahan isotop, melibatkan satu senyawa yang berbentuk gas dan cair. Factor pemisah untuk pasangan senyawa yang ada dalam daftar tsb cukup besar dan dapat digunakan dengan 2 pendekatan: monoterma dan biterma. Gambar 3 untuk menggambarkan perbedaan antara keduanya.



Gambar 3. Diagram Proses Pertukaran Isotop

Proses monoterma sangat sederhana, uap deuterium bersetimbang dalam cairan, sehingga cair harus diubah menjadi gas dengan penguapan dan digunakan untuk memperkaya deuterium dari cairan yang masuk. Efek ini dapat ditingkatkan dengan aliran cairan yang berlawanan arah. Kolom pertukaran yang pendek, sudah dapat mencapai pengayaan yang tinggi. Prinsip pemisahan terjadi karena deuterium dalam cairan dapat diekstraksi sehingga konsentrasi gas keluar dapat lebih rendah nilainya $1/\alpha$ dari konsentrasi masukan. Problem pada monoterma adalah bagaimana proses konversi α deuterium yang dalam air hanya 100 ppm, maka diperlukan 10.000 mol untuk produksi 1 mol D₂O, dengan berat molekul air 20. Energi yang dibutuhkan secara termodinamika untuk disosiasi D₂O adalah 120GJ/kg D₂O.

Proses bitermal, lebih kompleks, tetap menghindari kebutuhan konversi kimia, untuk prosesnya. Proses bitermal memanfaatkan hubungan terbalik dari faktor pemisahan dan suhu, Sehingga tower dingin dari proses bitermal memperkaya cairan dengan D dan menstriping D dari gas. Cairan kemudian diteruskan ke tower panas yang mempunyai faktor pemisahan yang kecil. Konsekuensinya D dalam cairan dipaksa kembali ke gas dan tower panas mengurangi D secara progresif dan mengayakan gas. Cairan disini adalah umpan yang masuk dan gas diumpan balik. Catatan, ekstraksi D dari umpan, dibatasi dengan ratio faktor pemisahan α dari, dalam bagian panas α_h dan bagian dingin α_c .

b. Pasangan untuk pertukaran isotop

Kombinasi air H₂S adalah dasar dari proses bitermal Girdler-Sulphide (G-S). Proses ini digunakan untuk produksi D₂O di Kanada dan di banyak tempat di dunia. Proses GS ini telah dikembangkan oleh AECL dan Ontario Hydro, dengan membuat peningkatan : penyelesaian problem buih dengan bahan anti buih pada air masuk, problem korosi dengan memilih bahan non korosi, dan mengontrol proses, sehingga ada perbaikan kontak antara cair dan uap, sehingga proses dapat berjalan efektif. Sebagai hasil, 1980 Kanada telah sukses, memproduksi 2000 ton/hari, D₂O. Proses GS ini memerlukan air jumlah besar, energi (>10Mg/kg D₂O). Senyawa H₂S adalah bahan yang beracun kuat dan korosif. Factor pemisah tidak bervariasi terhadap perubahan suhu yang pendek.

PABRIK AIR BERAT DI DUNIA

Produsen air berat yang terbesar adalah di Kanada yaitu Bruce Heavy Water Plant di Ontario, Canada, menggunakan proses menggabungkan dua bagian dalam 1 step atau yang disebut sebagai bitermal. Pada bagian atas ("dingin," 30–40 °C), deuterium dari H₂S berpindah ke air dan pada bagian bawah ("panas," 120–140 °C) deuterium berpindah dari air ke H₂S sehingga terjadi pengayaan deuterium lebih banyak. Pengayaan dibagi dalam 3 stage, pada stage 1. gas dikayakan dari 0.015% deuterium ke 0.07%, stage 2 dikayakan ke 0.35%, dan stage 3 dikayakan antara 10% and 30% deuterium. Untuk pengayaan lebih lanjut produk dikirim ke unit distillation untuk menyempurnakan menjadi 99.75% air berat atau "reactor-grade"

Produsen lain yang sudah menerapkan bermacam-macam proses pengayaan air berat adalah India. Kegiatan pengayaan air berat dimulai di Chemical Engineering division of Bhabha Atomic Research Centre (BARC) tahun 1960 dan pilot plan Heavy Water Division of the Centre yang mempelajari proses pertukaran H₂S-H₂O exchange dan pembuatan pabrik Nangal Punjab (August, 1962). Pada saat ini kegiatan produksi sudah berkembang sehingga India mempunyai 8 plant air berat di India⁽²²⁾

Tabel 3. Pabrik Air Berat di India

Sr.No	Heavy Water Plant Location	Process	Date of commissioning
1.	Nangal, Punjab	Hydrogen Liquification and Distillation	Aug, 1962
2.	Baroda, Gujarat	Mono thermal Ammonia-Hydrogen Exchange	July, 1977
3.	Tuticorin, Tamilnadu	Mono thermal Ammonia-Hydrogen Exchange	July, 1978
4.	Talcher, Orissa	Bi-thermal Ammonia- Hydrogen Exchange	March, 1978
5.	Kota, Rajasthan	Hydrogen Sulphide – Water Exchange	April, 1985
6.	Thal, Maharashtra	Mono thermal Ammonia - Hydrogen Exchange	February, 1987
7.	Hazira, Gujarat	Mono thermal Ammonia - Hydrogen Exchange	February, 1991
8.	Manuguru, Andhra Pradesh	Hydrogen Sulphide Water Exchange	December, 1991

Salah satu pabrik di India adalah pabrik di Talcher. Pabrik di Talcher ini menggunakan proses bitermal menggunakan pasangan kimia Ammonium- Hidrogen.



Gambar 4. Pabrik Air Berat di Talcher

Bahan bakunya adalah gas sintesis yang mengandung camp 1 bag nitrogen dan 3 bag hydrogen yang mengandung 140 ppm (0.014%) deuterium. Gas dialirkan ke ke pabrik 99,600 Nm³/hr tekanan 10-15 Kg/cm² dimurniakan untuk menghilangkan O₂, CO, CO₂, Oil dan uap air dan dijenuhkan dengan ammonia dengan mencuci dengan cairan ammonia dan larutan amonia dari potassium amide. Kemudian dilewatkan kolom pada 30 deg. C., deuterium dalam gas dikontakkan dengan aliran amonia untuk mendapatkan pengayaan deuterium dengan katalis potasium amide. Gas sistesis deplesi dikirim kembali pabrik gas

Pada bagian pertukaran isotop, bagian pengayaan terdiri dari 2 stage, yang pertama terdiri dari dua kolom striping panas dan dingin. Tiap stage terdiri dari pasangan kolom dingin dan panas. Konsentrasi deuterium maksimum dalam larutan ammonia di bagian bawah dari kolom dingin dan dalam gas sintesis pada bagian atas kolom panas. Gas kemudian dialirkan ke pengayaan selanjutnya. Konsentrasi maksimum pada deuterium pada stage ini adalah pada cairan ammonia pada dasar kolom ke 3 yang mengandung D₂O 17.5% dikirim untuk proses selanjutnya

Cairan amonia didistilasi untuk memisahkan katalis potassium amide dan di dikontakkan dengan air demineralisasi dalam kolom pertukatan ammonia - air yang dioperasikan pada tekanan 2 kg./cm². Sebagian dari deuterion dalam amonia pindah ke air. Ammonia yang deuteriumnya sudah diambil kemudian setelah dicampur dengan katalis dikembalikan pada bagian pengayaan. Air yang sudah diperkaya dengan D didistilasi untuk mendapatkan air berat "nuclear grade"

Tabel 4. Data kondisi operasi pabrik air berat di Talcher

Proses digunakan	Pertukaran NH ₃ -H ₂ (Bitermal)
Kapasitas Pabrik	62.5 Te/Th
Tanggal dimulai proyek	4-10-1972
Tanggal Operasi	31-3-1985
Modal	Rs. 7383 Lakhs
Luas	4.48 Ha
Jumlah Pegawai	404 (pada 1-4-1991)
Tekanan Operasi	320 Kg/Cm ²
Kecepatan Alir Gas Sintesa	99600 Nm ³ /Hr
Berat Peralatan terberat	350 Te
Diameter maksimum peralatan	2.5 M

Proses digunakan	Pertukaran NH ₃ -H ₂ (Bitermal)
Tinggi tower maksimum	40 M
Kebutuhan daya	72 MWH/hari
Kebutuhan air	4800 M ³ /hari
Kebutuhan gas	Nil
Kebutuhan air Bebas Mineral	480 Kg/hari

Negara lain yang membuat air berat adalah Amerika Serikat. Amerika mengembangkan Proses Girdler Sulfide kapasitas besar di Dana, Indiana plant pada 1945 and at the Savannah River Plant, selatan Carolina pada 1952. SRP dioperasikan DuPont untuk USDOE sampai 1980. Negara lain yang sudah mempelajari pengayaan air berat adalah Norwegia dan Argentina

METODE ANALISIS AIR BERAT

Berbagai macam metode analisis air berat telah dilakukan penelitian yaitu meliputi :

1. Teknik analisis air berat dengan peralatan Mass Spektrometer MAT 250
2. Teknik analisis airberat dengan peralatan Gas Khromatografi
3. Teknik analisis airberat dengan peralatan Infra Red
4. Teknik analisis airberat dengan peralatan metode Falling Drops

Dengan bertumpu dua modal dasar tersebut PTAPB memulai merintis penelitian proses pengayaan air berat dari air alam yang didukung oleh beberapa tenaga sarjana dan sarjana muda dari disiplin ilmu teknik kimia, teknik nuklir dan MIPA Kimia dan dibantu tenaga STM kimia, mekanik dan elektrik.

EVALUASI PENGKAYAAN AIR BERAT DI PTAPB

Proses pengkayaan air berat di PTAPB telah dilakukan sejak tahun 1976 sampai tahun 1994. Dari hasil pantauan dan informasi dari berbagai pihak kondisi sarana dan prasarana laboratorium tempat proses pengkayaan air berat adalah sebagai berikut:

1. Di bidang peralatan proses

Peralatan proses yang telah ada di unit bidang Kimia dan Teknologi Proses Bahan adalah sebagai berikut :

- a. Unit distilasi

Tabel 3. Daftar peralatan penelitian distilasi air menjadi deuterium

No	Jenis / macamPeralatan	Kondisi peralatan	Keterangan
1	Unit distilasi dari bahan stainless steell	1. Kolom distilasi bahan SS, D=15cm, H = 1,5 m, berisi Bahan isian kaca berbentuk silinder berlubang. D= ± 1 cm buatan PTAPB (PPBMI) 2. Pemanas elektrik dari hasil kumparan kawat nikelin buatan PTAPB, Suhu pemanas < 100 °C, Kontrol tekanan vakum < 760 mHg sistem manual. 3. Pendingin menggunakan air alam yang didinginkan AC sampai suhu 15 – 20° C	Dibuat Th 1984 Proses baru dilakukan tingkat skala labo ratoris dan hanya dipakai sebagai umpan unit elektrolisis. Kapasitas 1,2 lt /jam. Hasil proses pengkayaan masih sangat rendah yaitu 170 ppm
2	Unit distilasi dari bahan besi baja	Kolom distilasi bahan SS, D=5 cm, H = 3 m, berisi bahan isian berupa kasa bentuk Dixon buatan PTAPB (PPBMI) Pemanas elektrik dari hasil kumparan kawat nikelin buatan PTAPB, Suhu pemanas< 100 °C, Kontrol tekanan vakum < 760 mHg sistem manual bergabung dengan unit distilasi 1.	Dibuat tahun 1984 bersamaan dengan unit distilasi 1. Sampai saat ini baru dicoba skala laboratoris dan masih mengalami kendala pada bagian bahan isiannya dan hasil produk yang sangat kotor akibat terjadinya karat dari kolomnya.Belum

No	Jenis / macam Peralatan	Kondisi peralatan	Keterangan
		Pendingin menggunakan air alam yang didinginkan AC sampai suhu 15 – 20° C bergabung dengan unit distilasi 1	medapatkan karakteristik dari peralatan prosesnya
3	Unit distilasi bahan kaca ⁽¹⁾	Kolom distilasi bahan dari kaca Pyrex. D kolom = 5,7 cm L = 300 cm. Berisi bahan isian jenis logam bentuk spiral. Sistem pemanas listrik berupa mantel jaket yang memanasi labu umpan kapasitas 8 liter, Kontrol tekanan vakum secara otomatis. dengan operasi s/d < 760 mmHg dan suhu < 100 °C	Peralatan skala laboratoris adalah buatan Perancis tahun 1978, Telah diuji karakteristik alat. Seperti harga HETP untuk berbagai tekanan vakum, kadar HDO yang diperoleh adalah 255 ppm pada operasi suhu 300 mmHg.

Tercatat ada 3 unit kolom distilasi yang sudah terinstal tetapi dengan berjalannya waktu, peralatan tersebut sudah tidak dapat dioperasikan, perlu pembenahan untuk dapat dioperasikan. Dari segi ketinggian kolom isiannya, peralatan tersebut jauh dari kebutuhan minimum tinggi plate yang diperlukan untuk menghasilkan pemisahan yang cukup signifikan. Peralatan tersebut hanya dapat digunakan untuk mendapatkan karakteristik pemisahan air berat dengan menggunakan metode distilasi. Karakteristik pemisahan tersebut pada saatnya dapat digunakan untuk pedoman dalam membuat peralatan komersial.

b. Unit Elektrolisis

Unit elektrolisa pada saat mulai dioperasikan keadaannya masih bagus, dan dapat berlahan lancar. Untuk saat sekarang kalau alat tersebut akan dihidupkan lagi diperlukan pembenahan peralatan meskipun tidak sebanyak alat distilasi.

Tabel 4. Daftar peralatan penelitian elektrolisa air menjadi deuterium

Peralatan	Kondisi Peralatan	Keterangan
Unit Elektrolisis	Peralatan proses sel elektrolisis terdiri dari bagian-bagian komponen pokok : • 50 buah sel elektrolisis masing-masing berbentuk silinder • Unit rectifier pengatur besar arus listrik • Unit pendingin Air yang telah didinginkan dengan AC sampai suhu 20° C • Unit evaporator, suatu pemurnian larutan elektrolit hasil dari residu yang kaya air berat dari setiap tingkat	Peralatan skala pilot baik perancangan maupun Instalasinya dibuat oleh PTAPB. Dari hasil uji coba peralatannya yang dilakukan selama periode tersebut telah diperoleh data-data sbb : a. Harga faktor pemisah $\alpha > 10$, kerapatan arus 0,1A/cm² b. Suhu operasi 30° C besar arus 40 A, dan tegangan 3-3,5 Volt. c. Pada proses pengkayaan secara sinambung diperoleh pengkayaan s/d 2775ppm d. Efisiensi Energi 46% e. Kebutuhan energi/ mol, 185 Kkal.

c. Unit Pertukaran Isotop

Pada proses pertukaran isotop H₂O-HDO, di lapangan biasanya dipadukan dengan proses elektrolisis dan biasanya di tempatkan pada posisi stage/tingkat ≥ 3 karena mulai tingkat ini produk gas mengandung kadar deuterium tinggi. Di bawah ini disajikan kondisi peralatan pertukaran isotop tersebut sebagai berikut :

Tabel 5 Daftar peralatan Pertukaran isotop untuk pembuatan air berat menjadi deuterium

No	Peralatan	Kondisi peralatan	Keterangan
1	Unit pertukaran Isotope HD- H ₂ O	Baru skala laboratories, berupa 2 kolom kaca yang terdiri dari 2 buah kolom yaitu kolom tempat terjadinya reaksi pertukaran isotop dipermukaan katalisator dan dikolom lain terjadi reaksi pertukaran sehingga pengayaan HDO dalam air terjadi.	Selama periode saat itu telah diketahui kondisi karakteristik alat seperti batasan operasi suhu yang baik dan masalah katalisator telah dicoba seperti Ni- Cr ₂ O ₃ , Pt – Karbon. Harga factor pemisahan 2-4, kondisi operasi 80°C - 100°C
2	Unit pertukaran isotop HDO – H ₂ S	Baru skala laboratories dan peralatan dari gelas. Sehingga operasinya hanya dilakukan pada tekanan 1 atm.	Belum diperoleh data Skala laboratories maupun skala pilot

KESIMPULAN

1. Penelitian di Batan Yogyakarta meneliti karakteristik proses pengayaan air berat dengan metode distilasi, elektrolisa dan pertukaran isotop.
2. Untuk menghidupkan penelitian air berat perlu revitalisasi unit peralatan distilasi dan unit elektrolisa dan pertukaran isotop karena komponen banyak rusak
3. Untuk sampai pada tahap produksi perlu peralatan yang mempunyai stage kesetimbangan banyak sampai ribuan (tinggi kolom puluhan m)
4. Diperlukan alat analisis air berat kadar rendah dan tinggi
5. Diperlukan standar air berat

DAFTAR PUSTAKA

1. BENEDICT M., "Nuclear Chemical Engineering", Second Edition, Mc Graw Hill Book Company, New York, (1981)
2. MALONEY, J.O., dkk, "Production of Heavy Water". First Edition, Part I, Mc Graw Hill Book Company, New York, (1955)
3. VILLANI S., "Isotop Separation", Published by American Nuclear Society, (1976.)
4. RAE HK, " Separation of Hydrogen Isotopes ", Acs. Symp. Ser., Vol. 68, (1979), hal 1 - 26.
5. MAJALAH, " Nuclear India ", Vol. 21, No. 5, (1983).
6. HAMMERLY, MWH, Stevano W.J. Bradley and Jp Butler, Report AECL 5512, April (1976).
7. BABINGTON WP, dkk., "Production Of Heavy Water Savanah River and Dana Plant's", Printed for the united states Atomic Energy Devition. DP 400, Ju1i, (1959)
8. KIRSHENBAUM I, "Physical Properties and Analysis of Heavy Water Mc Graw Hill Books Company, First Edition, page 34-324. Inc., New York, (1951)
9. HARUZUMI IZAWA, "Gaseous Exchange Reaction of Deuterium between hydrogen and water on Hydrophobic Catalyst Suporting Platina" Journal of Nuclear and Technology, Vol 16, No 10 Hal 741-749, Oktober (1979)
10. RAMMAN MSC, dkk, "improvevement Relating to Power Consumption on the Electrolytic Production of Heavy Water, Departement of Chemical Engineering, Indian Institute of Science of Bangalove-12 Chemical Age Of India, Vol 3, (1962)
11. SELA PATRIX, J., dkk., "A. Review of Processes and Plants For large Scale Production of Heavy water", Chemical Engineering Progress, Vol. 50, No 5, Nol, 36- 40, (1964)
12. CHARLES A, Law., " Why The GS Process still Stops Competitors", Canadian Nuclear Technology, Vol 3, No 1, 36-40, (1964.)
13. BAIQUNI A, SUDARSONO., "Pola Pengembangan Energy Nasional dilihat dari segi Tenaga Nukliir ", Batan, Seminar Energy Nasional, Juli, (1974).
14. TREYBALL, RE., "Transfer Mass Operation"., Mc. Graw Hill Book Company Inc, (1955)

15. PECULLEA, M., "Enrichment and Isotope Analysis of Deuterium for the Manufacture of Heavy Water ", IAEA, (1991)
16. DAHRONI, I., dkk., "Harga Rekoveri Pemisah Pada Aiat Eiektrolisis di Lab.SBR " PPNY - BATAN, Prosiding Pertemuan dan Presentasi ilmiah, Penelitian Dasar dan ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, Yogyakarta, ISSN 0216- 3128, 6-8 Maret (1989)
17. DAHRONI, dkk, "Pengaruh keadaan Elektrode Terhadap Harga Faktar Pemisah Pada Proses Pengayaan Air Berat ", Prosiding Pertemuan dan Presentasi iimiah, Penelitian Dasar dan ilmu Pengetahuan dan Teknoigi Nuklir, Yogyakarta, ISSN 0216- 3128, 21-22 Maret (1990)
18. DAHRQNI, I., "Harga Rekoveri Deuterium Pada Proses Elektroiisis Cara Catu Memakai membran Asbes, Prosiding Pertemuan dan Presentiasi ilmiah Penelitian Dasar dan ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, Yogyakarta, ISSN 0216- 3128, 28-30 April (1992)
19. DAHRONI., I., dkk., "Penyusunan Unit Sel Elektrolisis Bertingkat dalam Usaha Pengayaan Air Berat", Prosiding Pertemuan dan Presentiasi ilmiah Penelitian Dasar dan ilmu Pengetahuan dan Teknologi Nuklir, Yogyakarta, ISSN 0216- 3128, 26-28 April (1994)
20. MILLER, A. I., "Heavy Water: A Manufacturers' Guide for the Hydrogen Century, Published in the Canadian Nuclear Sosiety Bulletin, Vol 22 No. 1, February, (2001)
21. NUCLEAR INDIA, Published by The Departement of Atomic Energy Government of India, Vol 36/No 1, July (2002)
22. HEAVY WATER BOARD, Published by The Departement of Atomic Energy Government of India, [Http://www.dae.gov.in/heavywaterboard.org/ docs/history.htm](http://www.dae.gov.in/heavywaterboard.org/docs/history.htm), (2006)