

BAB 16

PENGGUNAAN TEKNOLOGI NUKLIR

Pembangkit listrik pertama yang menghasilkan listrik dengan menggunakan panas dari fisi atom uranium mulai beroperasi pada tahun 1950. Hari ini kebanyakan orang menyadari kontribusi penting energi nuklir yang bersih yang memberikan proporsi yang signifikan dari listrik dunia. Tidak begitu terkenal adalah banyak cara lain atom damai telah menyelipkan diam-diam ke dalam kehidupan kita, sering tanpa pemberitahuan dan dalam banyak kasus tidak dihargai. Radioisotop dan radiasi memiliki banyak aplikasi di bidang pertanian, kedokteran, industri dan penelitian. Mereka sangat meningkatkan kualitas kehidupan kita dari hari ke hari.

Isotop adalah bentuk yang berbeda dari sebuah atom dari unsur kimia yang sama. Mereka memiliki sifat kimia yang identik tapi bobot atom yang berbeda. Sementara jumlah proton adalah sama, jumlah neutron dalam inti berbeda.

Beberapa isotop yang disebut sebagai 'stabil' dan tidak berubah, sementara yang lain 'tidak stabil' sejak inti mereka berubah dari waktu ke waktu, dari milidetik sampai ribuan tahun, karena mereka memancarkan partikel bermuatan atau gelombang, membuat mereka 'radioaktif'. Ini adalah sifat radioaktif dari atom-atom yang tidak stabil, biasanya disebut sebagai 'radioisotop', yang memberikan mereka begitu banyak aplikasi dalam ilmu pengetahuan modern dan teknologi.

Para ilmuwan terus menemukan cara-cara baru dan menguntungkan menggunakan teknologi nuklir untuk meningkatkan kehidupan kita. Dalam kehidupan kita sehari-hari kita membutuhkan makanan, air dan kesehatan yang baik. Radioisotop memainkan peranan penting dalam teknologi yang menyediakan kita dengan kebutuhan dasar. Badan Energi Atom Internasional PBB (IAEA) adalah dasar untuk kerjasama internasional dalam ratusan proyek pembangunan.

16.1 Desalinasi Nuklir

Diperkirakan seperlima dari penduduk dunia tidak memiliki akses ke air minum yang aman, dan bahwa proporsi ini akan meningkat karena pertumbuhan penduduk relatif terhadap sumber daya air. Daerah yang paling parah terkena adalah daerah kering dan semi kering dari Asia dan Afrika Utara. Sebuah laporan UNESCO pada tahun 2002 mengatakan bahwa kekurangan air tawar di seluruh dunia telah terjadi sebesar 230 miliar m³/tahun dan akan meningkat menjadi 2000 miliar m³/tahun pada tahun 2025. Perjuangan atas akses ke air, tidak hanya energi dan sumber daya mineral, yang harus dilakukan. Sebuah laporan Forum Ekonomi Dunia pada bulan Januari 2015 menyoroti masalah ini dan mengatakan bahwa kekurangan air bersih dapat menjadi ancaman global yang utama dalam dekade berikutnya. Air tawar merupakan prioritas utama dalam pembangunan berkelanjutan. Di mana hal itu tidak dapat diperoleh dari sungai dan akuifer, maka desalinasi air laut, mineral tanah atau air limbah perkotaan diperlukan. Sebuah studi pada tahun 2006 oleh Badan Energi Atom Internasional (IAEA) PBB menunjukkan bahwa 2,3 miliar orang hidup di daerah air-stres, 1,7 miliar dari mereka memiliki akses ke lebih dari 1000 m³ air minum per tahun. Dengan pertumbuhan penduduk, angka-angka ini akan meningkat secara substansial.

Air dapat disimpan, sementara listrik pada skala utilitas tidak bisa. Hal ini menunjukkan dua sinergi dengan pembangkit listrik beban dasar untuk desalinasi dengan cara kelistrikan dapat dilakukan terutama pada masa beban rendah harian dan mingguan. Investasi kumulatif pada pabrik desalinasi mencapai sekitar US \$ 21,4 milyar pada tahun 2015 dan diharapkan setidaknya dua kali lipat pada tahun 2020 menurut laporan tahun 2016 oleh analis pasar,

Penelitian dan Pasar. Laporan , Desalinasi Air Laut dan Air Payau, termasuk prediksi bahwa investasi pada tahun 2020 harus di atas US \$ 48 milyar, menunjukkan tingkat pertumbuhan tahunan gabungan sebesar 17,6%. Laporan ini menilai pasar untuk fasilitas industri atau kota besar dengan kapasitas lebih besar dari 1.000 m³/hari. Ini menyoroti kesenjangan yang tumbuh antara sumber air tawar dan permintaan dari semua sektor.

16.1.1 Desalinasi

Kebanyakan desalinasi saat ini menggunakan bahan bakar fosil, dan dengan demikian memberikan kontribusi untuk peningkatan tingkat gas rumah kaca. Total kapasitas dunia pada 2013 adalah 80 juta m³/hari (29.200 GL / yr) air minum, di lebih dari 17.000 pabrik. Mayoritas ini terdapat di Timur Tengah dan Afrika utara. Menggabungkan pembangkit listrik dan produksi air dengan desalinasi secara ekonomi menguntungkan dan secara luas digunakan di Timur Tengah. Pada bulan Desember 2015 "Aliansi Global Desalinasi Air Bersih-H₂O dikurangi CO₂" berinisiatif meluncurkan pada COP 21 yaitu pembicaraan iklim di Paris, dan meminta keanggotaan 17 negara untuk menggunakan energi bersih untuk daya plants desalinasi baru. Himbauan ini merupakan tujuan aliansi untuk mengatasi hubungan air-energi dan perubahan iklim. Pabrik desalinasi terbesar - \$ 3,8 milyar Al-Jubail 2 di Arab Saudi - memiliki kapasitas 948.000 m³/hari (346 GL/yr) MED-TVC kapasitas, ditambah 2.745 pembangkit listrik MWe menggunakan turbin gas. Saudi Saline Air Conversion Corporation (SWCC) membutuhkan waktu sekitar 62% dari output untuk memasok Riyadh. China sedang membangun 1 juta m³/hari pabrik RO untuk memasok Beijing. Dua-pertiga dari kapasitas dunia adalah pengolahan air laut, dan sepertiga menggunakan air artesis payau.

16.1.2 Teknologi Desalinasi

Dua jenis utama dari teknologi desalinasi yang digunakan di seluruh dunia dapat secara luas diklasifikasikan sebagai proses termal, di mana air umpan direbus dan uap yang terkondensasi sebagai air murni (destilasi), atau proses desalinasi membran, di mana air umpan dipompa melalui semi-permeabel membran untuk menyaring padatan terlarut. Proses termal utama adalah Multi-Stage Distilasi (MSF), Multi-Efek Distilasi (MED) dan Vapour Compression Variants – Thermal And Mechanical (TVC, MVC). Proses membran utama adalah Reverse Osmosis (RO). Lebih dari tiga perempat dari kapasitas adalah MSF dan RO, tapi MED meningkat dengan cepat. Pabrik baru dengan total kapasitas 6 juta m³/hari diharapkan untuk segera beroperasi pada tahun 2013, menurut Desalinasi Asosiasi Internasional. Teknologi utama dalam penggunaan dan sedang dibangun saat ini adalah Reverse Osmosis (RO) didorong oleh pompa listrik yang menekan air dan memaksa melalui membran semipermeabel terhadap tekanan osmotik nya. Ini menyumbang 63% dari kapasitas dunia tahun 2012, naik dari hanya 10% pada tahun 1999. Dengan air payau, RO jauh lebih hemat biaya, meskipun MSF memberikan air murni daripada RO. RO bergantung pada listrik untuk mendorong proses aktual dan membutuhkan (disaring) air umpan bersih. IAEA 2015 menyatakan bahwa tekanan operasi untuk rentang osmosis 17-27 bar untuk air payau dan 55-82 bar (5500-8200 kPa) untuk air laut. Efisiensi energi air laut RO sangat bergantung pada pemulihan energi dari bertekanan menolak air garam. Pada pabrik besar, energi menolak tekanan air garam dilakukan oleh turbin; umumnya turbin roda Peloton pulih 20% sampai 40% dari energi yang dikonsumsi.

Pabrik Hibrida termal-membran memiliki rasio daya dengan air rasio yang lebih fleksibel, operasi yang efisien bahkan dengan fluktuasi permintaan musiman dan harian yang signifikan dari listrik dan air, konsumsi energi primer kurang dan peningkatan efisiensi pabrik, sehingga meningkatkan ekonomi dan mengurangi dampak lingkungan . MSF + RO atau MED-TVC + RO pabrik hibrida mengeksplorasi fitur terbaik dari masing-masing teknologi untuk produk-produk berkualitas yang berbeda atau produk yang dicampur.

Beberapa proses distilasi termal mampu menggunakan limbah panas dari pembangkit listrik yang di gunakan: Multi-stage (MSF) proses penyulingan menggunakan uap, adalah awal yang menonjol. Pabrik bekerja dengan mengubah sebagian dari air menjadi uap dalam beberapa tahapan, berlawanan dengan penukar panas dan itu menyumbang 23% dari kapasitas dunia pada tahun 2012. Hal ini lebih banyak dari energi-intensif dari MED, tetapi dapat mengatasi padatan tersuspensi dan setiap tingkat salinitas. Badan Energi Atom Jepang (JAEA) telah merancang 600 MWt HTR disebut GTHTTR300 yang menghasilkan 300 MWe dan menggunakan limbah panas di desalinasi MSF, biaya air diproyeksikan menjadi setengah dari menggunakan CCGT yang menembakkan gas.

Peningkatan jumlah pabrik menggunakan beberapa efek distilasi (MED) dengan 8% kapasitas dunia pada 2012, atau destilasi kompresi uap multi-efek (MVC atau VCD) i atau kombinasi dari ini, misalnya MED-TVC dengan kompresi uap panas. Beberapa efek distilasi (MED) adalah proses termal suhu rendah memperoleh air bersih dengan memulihkan uap mendidih air laut di urutan kapal (disebut efek), masing-masing dipertahankan pada suhu lebih rendah dari yang terakhir. Karena titik didih air berkurang tekanan berkurang, uap direbus di satu kapal dapat digunakan untuk memanaskan berikutnya, dan hanya yang pertama (pada tekanan tertinggi) membutuhkan sumber eksternal panas, seperti yang dari kondensor rangkaian pembangkit listrik. Hal ini lebih tinggi-biaya dari RO tetapi dapat diatasi dengan tingkat salinitas. Membran distilasi (MD) adalah proses yang muncul yang merupakan penggerak termal. Desalinasi bersifat energi-intensif. Reverse osmosis perlu sampai 6 kWh listrik per meter kubik air (tergantung pada kedua proses dan konten garam aslinya), meskipun pabrik RO terbaru seperti di Perth, Australia Barat, menggunakan 3,5 kWh/m³, atau 4 kWh/m³ termasuk memompa untuk distribusi. Oleh karena itu 1 MWe terus menerus akan menghasilkan sekitar 4.000-6.000 m³ per hari dari air laut. MSF dan MED memerlukan panas pada 70-130 ° C dan menggunakan sekitar 38 kWh/ m³ input thermal, ditambah 3,5 kWh/m³ listrik untuk MSF dan 1,5 kWh/m³ untuk MED-TVC. (IAEA 2015 mengutip 100 kWh/m³ input termal, ditambah 3,5 kWh /m³ listrik untuk MSF dan 50 kWh/ m³ input termal, ditambah 2,5 kWh/m³ listrik untuk MED.) Berbagai suhu rendah dan limbah sumber panas dapat digunakan , termasuk energi surya (terutama untuk MED), sehingga di atas angka kilowatt-jam yang tidak benar sebanding. Untuk air payau dan reklamasi RO air limbah kota hanya membutuhkan sekitar 1 kWh/m³. Pilihan proses umumnya tergantung pada nilai-nilai ekonomi relatif air dan khususnya bahan bakar segar, dan apakah kogenerasi adalah suatu kemungkinan. proses termal lebih padat modal. Forward Osmosis (FO) dapat digunakan dalam hubungannya dengan proses selanjutnya untuk desalinasi. FO menarik air melalui membran dari larutan umpan ke dalam larutan yang konsentrasi yang lebih pekat, yang kemudian didesalinasi tanpa masalah **fouling**, seperti sering dijumpai dengan RO sederhana. Pabrik FO beroperasi di Gibraltar dan Oman.

16.1.3 Ketergantungan Terhadap Desalinasi

Sekitar tiga-perempat dari air bersih Israel adalah hasil desalinasi, dan satu pabrik RO besar memberikan air pada 58 sen per meter kubik, diklaim sebagai harga termurah di dunia. Hingga tahun 2013 itu Israel juga mengaku memiliki pabrik air laut RO terbesar dunia di Soreq, memproduksi 627.000 m³/hari. Pada tahun 2015 Israel dan Yordania menandatangani perjanjian \$ 900.juta untuk pabrik desalinasi baru di Aqaba di Laut Merah, yang didukung oleh Bank Dunia dan berdasarkan perjanjian tahun 2013. Perjanjian baru melibatkan desalinasi 80 juta m³ per tahun/ 220.000 m³/hari di pabrik Aqaba, dengan Israel membeli setengah dari jumlah itu untuk digunakan di kota pelabuhan selatannya Eilat dan wilayah Arava - baik daerah gurun dengan kekurangan air kronis . Jordania akan mendapatkan setengah air untuk bagian selatan gersang negara itu. Sebagai bagian dari kesepakatan itu, Israel akan memasok tambahan 50 juta m³ air untuk bagian tengah dan utara Yordania dari

perusahaan Lake Kinneret. Selain desalinasi ini, lebih dari 100 juta m³ air garam pekat akan dipompa 180 km sebelah utara untuk mengisi Laut Mati. Malta mendapat dua pertiga dari air minum yang dari RO, dan ini membutuhkan 4% dari pasokan listriknya. Singapura pada tahun 2005 membangun pabrik besar Desalinasi Air Laut RO yang memasok 136.000 m³/hari - 10% dari kebutuhan, dengan 49 sen AS per meter kubik, dan pada tahun 2013 membangun pabrik RO dengan kapasitas 318.500 m³/hari pada operasi dasar, biaya US \$ 700 juta, dengan biaya untuk menyediakan air pada US 36 sen/m³. Desalinasi air laut sekarang akan memberikan 25% dari air Singapura, sebagai salah satu negara pulau, bersama dengan air resapan lokal, air impor, dan NEWater, dan air limbah daur ulang Singapura sendiri. Sebuah pabrik dengan kapasitas 228.000 m³/hari akan dibangun pada tahun 2016, sebagai penyediaan air minum dengan biaya US 22 ¢ / m³. Arab Saudi pada tahun 2011 memperoleh 3,3 juta m³/hari dari 27 pabrik desalinasi (SWCC) air laut milik pemerintah, 70% dari kebutuhan negara. Dua belas pabrik, untuk sebagian besar produksi, menggunakan multi-stage distilasi (MSF) dan 7 pabrik menggunakan multi-efek distilasi (MED), dalam kedua kasus pabrik yang terintegrasi dengan pembangkit listrik (pembangkit kogenerasi), menggunakan uap dari daya generasi sebagai sumber energi untuk desalinasi. Delapan pabrik adalah pabrik-tujuan tunggal yang menggunakan Reverse Osmosis (RO) teknologi terbalik dan kekuatan dari grid. UAE sangat tergantung pada desalinasi air laut, sebagian besar dengan pabrik kogenerasi. Aljazair pada pertengahan 2013 memiliki kapasitas 2,1 juta m³/hari dan pembangunan pabrik lain dengan kapasitas 400.000 m³/hari sedang dipertimbangkan. Pada bulan Februari 2012 Dewan Negara China mengumumkan bahwa mereka bertujuan untuk memiliki kapasitas desalinasi air laut 2,2-2.600.000 m³/hari yang beroperasi pada tahun 2015, dan target awal tahun 2015 di bawah Rencana Khusus Pemerintah untuk Pemanfaatan Seawater adalah 4 juta m³/hari. Sebanyak 400 dari 668 kota terbesar di Cina dilaporkan mengalami kelangkaan air. Pabrik Desalinasi Kwinana di dekat Perth, Australia Barat, telah berjalan sejak awal tahun 2007 dan memproduksi sekitar 140.000 m³/hari (45 GL / yr) air minum, membutuhkan 24 MWe daya untuk ini, maka 576.000 kWh/hari, atau 4,1 kWh/m³ secara keseluruhan, dan sekitar 3,7 kWh/m³ melintasi membran. Pabrik ini memiliki pra-perlakuan, maka 12 kereta air laut RO dengan kapasitas 160.000 m³/hari yang memberi muatan enam kereta sekunder memproduksi 144.000 m³/hari air dengan 50 mg/L total padatan terlarut. Biaya diperkirakan A \$ 1,20/m³. aliran debit adalah sekitar 7% garam. Masa depan pabrik desalinasi WA akan memiliki lebih canggih pre-perlakuan untuk meningkatkan efisiensi. Pada bulan Agustus 2011 pemerintah negara bagian memutuskan untuk melipatgandakan ukuran yang baru Pabrik Desalinasi Air Southern di Binningup pabrik dekat Perth sampai 100 GL/tahun, mengambil biaya sekitar \$ 1.45 milyar. Tahap 1 dari 50 GL/tahun adalah dalam anggaran A \$ 955 juta.

16.1.4 Studi Desalinasi Nuklir

Reaktor nuklir berukuran kecil dan menengah yang cocok untuk desalinasi, sering dengan cara kogenerasi listrik menggunakan tekanan rendah uap dari turbin dan air laut panas umpan dari sistem pendinginan akhir. Peluang utama untuk pembangkit nuklir telah diidentifikasi sebagai rentang 80-100.000 m³/hari dan 200-500,000 m³/ hari. kapal induk Angkatan Laut AS bertenaga nuklir dilaporkan melakukan desalinasi 1500 m³/hari masing-masing untuk penggunaan harian. Sebuah laporan IAEA tahun 2006 didasarkan pada studi kasus negara menunjukkan bahwa biaya akan berada di kisaran (\$ US) 50-94 sen/m³ untuk RO, 60-96 ¢/m³ untuk MED dan \$ 1,18-1,48/m³ untuk proses MSF, dengan ekonomi yang ditandai skala. Angka-angka ini konsisten dengan laporan kemudian. tenaga nuklir sangat kompetitif pada tahun 2006 dengan harga gas dan minyak. Sebuah studi Perancis untuk Tunisia dibandingkan empat pilihan tenaga nuklir dengan turbin gas siklus gabungan dan menemukan bahwa biaya desalinasi nuklir sekitar setengah dari pabrik gas untuk teknologi

MED dan sekitar sepertiga lebih sedikit untuk RO. Dengan semua sumber energi, biaya desalinasi dengan RO yang lebih rendah dari biaya MED. Pada KTT April 2010 Global Air di Paris, prospek pabrik desalinasi menjadi satu dengan pembangkit listrik tenaga nuklir didukung oleh para ahli air internasional. Sebagai teknologi desalinasi air laut yang berkembang pesat dan lebih banyak negara yang memilih untuk dual-tujuan pembangkit listrik terpadu (yaitu kogenerasi), kebutuhan untuk teknologi canggih yang cocok untuk kopling untuk pembangkit listrik tenaga nuklir dan mengarah ke sistem desalinasi nuklir lebih efisien dan ekonomis tentu sangat jelas. Program Penelitian IAEA Coordinated (CRP) Teknologi Baru untuk Desalinasi Seawater menggunakan Energi Nuklir diselenggarakan dalam rangka Kelompok Kerja Teknis Desalinasi Nuklir yang didirikan pada tahun 2008. CRP yang bekerja sepanjang tahun 2009-2011 yang memfokuskan teknologi inovatif untuk desalinasi air laut yang bisa digabungkan ke jenis utama dari pembangkit listrik tenaga nuklir yang ada. CRP difokuskan pada distilasi suhu rendah tabung horisontal multi-efek, berdasarkan sistem pemulihan panas menggunakan penukar panas pipa panas, dan sistem pembuangan zero air garam. Sebuah studi kelayakan awal IAEA pada desalinasi nuklir di Aljazair diterbitkan pada tahun 2015, untuk Skikda di pantai Mediterania, menggunakan kogenerasi. Pilihan energi nuklir sangat kompetitif dibandingkan dengan bahan bakar fosil.

16.1.5 Pengalaman Nuklir Terhadap Desalinasi

Kelayakan pabrik desalinasi nuklir terpadu telah terbukti dengan lebih dari pengalaman bertahun-tahun 150 reaktor, terutama di Kazakhstan, India dan Jepang. Penyebaran skala besar desalinasi nuklir secara komersial akan tergantung terutama pada faktor-faktor ekonomi. Biaya indikatif yang US \$ 70-90 sen per meter kubik, sama seperti pabrik berbahan bakar fosil di wilayah yang sama. Salah satu strategi yang jelas adalah dengan menggunakan reaktor yang berjalan pada kapasitas penuh, tetapi dengan semua listrik yang diterapkan untuk memenuhi beban jaringan saat itu tinggi dan bagian dari itu untuk menggerakkan pompa untuk desalinasi RO ketika permintaan jaringan rendah. Reaktor Cepat BN-350 di Aktau, di Kazakhstan, berhasil memasok hingga 135 MWe tenaga listrik sambil menghasilkan 80.000 m³/hari air minum selama lebih dari 27 tahun, sekitar 60% dari daya yang digunakan untuk panas dan desalinasi. Pabrik dirancang 1000 MWt tetapi tidak pernah dioperasikan pada lebih dari 750 MWt, tetapi didirikan berdasarkan kelayakan dan keandalan pabrik kogenerasi tersebut. (Bahkan, minyak / gas yang digunakan dalam hubungannya dengan itu, dan total kapasitas desalinasi melalui sepuluh unit MED adalah 120.000 m³/hari.)

Di Jepang, sepuluh fasilitas desalinasi terkait dengan reaktor air bertekanan operasi untuk produksi listrik menghasilkan sekitar 14.000 m³/hari air minum, dan lebih dari 100 reaktor yang memiliki bertahun-tahun pengalaman telah beroperasi. Pada awalnya sistemnya adalah MSF, tapi MED dan RO telah ditemukan lebih efisien di sana. Air itu digunakan untuk reaktor untuk sistem pendingin sendiri.

India telah terlibat dalam penelitian desalinasi sejak 1970-an. Pada tahun 2002 pabrik percontohan ditambah dengan 170 reaktor nuklir MWe kembar (PHWR) didirikan pada Power Station Atom Madras, Kalpakkam, di India tenggara. Nuklir Desalinasi Proyek Demonstrasi hybrid (NDDP) ini terdiri dari unit osmosis (RO) dengan kapasitas 1.800 m³/hari dan unit pabrik multi-stage (MSF) 4500 m³/hari biaya sekitar 25% lebih, ditambah baru-baru ini penambahan tongkang, dipasang unit pabrik RO. Ini adalah yang terbesar pabrik desalinasi nuklir berbasis teknologi MSF-RO hybrid menggunakan tekanan rendah uap dan air laut dari stasiun tenaga nuklir. Mereka mengalami kerugian daya 4 MWe dari pabrik. Pada tahun 2009 sebuah pabrik MVC (kompresi uap mekanik) berkapasitas 10.200 m³/hari didirikan di Kudankulam untuk memasok air bersih untuk pabrik baru. Ia memiliki empat tahap di masing-masing empat sungai. Pabrik RO ada disediakan perkampungan awalnya. Pabrik MVC berkapasitas penuh sedang beroperasi pada pertengahan 2012, dengan

kapasitas 7200 m³/hari untuk memasok pabrik pendingin primer dan sekunder pada kota setempat. Biaya dikutip pada INR 0,05 per liter (USD 0,9/m³). Sebuah pembangkit nuklir desalinasi suhu rendah (LTE) menggunakan limbah panas dari reaktor riset nuklir di Trombay telah beroperasi sejak sekitar tahun 2004 untuk memasok air dalam reaktor.

Pakistan pada 2010 mendirikan pabrik desalinasi MED berkapasitas 4800 m³/hari, digabungkan ke Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Karachi (KANUPP, 125 MWe PHWR) dekat Karachi, dan pada tahun 2014 pabrik itu telah berkapasitas 1.600 m³/hari. Kemudian jugat telah beroperasi pabrik RO dengan kapasitas 454 m³/hari untuk digunakan sendiri.

Tenaga Nuklir Umum China (CGN) telah mendirikan pabrik desalinasi berkapasitas 10.080 m³/hari air laut menggunakan limbah panas untuk menyediakan pendingin air pada proyek Hongyanhe baru di Dalian di provinsi Liaoning timur laut.

Pengalaman yang relevan banyak berasal dari pembangkit nuklir di Rusia, Eropa Timur dan Kanada di mana pemansan adalah produk sampingan. Penyebaran skala besar desalinasi nuklir secara komersial akan tergantung terutama pada faktor-faktor ekonomi. Badan Energi Atom Internasional PBB (IAEA) yang mendorong penelitian dan kolaborasi dalam masalah ini. Pada tahun 2014 Rusatom Overseas menyatakan akan berencana untuk mempromosikan pabrik desalinasi termal menggunakan tenaga nuklir pada BOO (build-own-operate) dasar. Pertemuan pertama dari Ahli Dewan Internasional Rusatom Overseas pada Desalinasi berlangsung pada bulan September di Moskow.

Di California, sebuah Gugus Tugas Kekeringan Kabupaten bekerja sama dengan Diablo Canyon pemilik pabrik nuklir Pacific Gas dan Electric dengan maksud untuk menggunakan pabrik desalinasi RO berkapasitas 5700 m³/hari untuk memasok hingga 3100 m³/hari air surplus bagi warga kabupaten.

16.1.6 Reaktor Nuklir Kecil Untuk Desalinasi

Korea Selatan telah mengembangkan desain reaktor nuklir kecil untuk kogenerasi listrik dan air minum. Reaktor SMART 330 MWt (sebuah PWR integral) memiliki desain kehidupan panjang dan membutuhkan pengisian bahan bakar hanya setiap 3 tahun. Konsep utama memiliki reaktor SMART digabungkan ke empat unit MED, masing-masing dengan kompresor termal-uap (MED-TVC) dan memproduksi jumlah 40.000 m³/hari, dengan 90 MWe. Argentina telah merancang PWR 100 MWt CAREM terpisahkan, cocok untuk kogenerasi atau desalinasi sendiri, dan prototipe sedang dibangun di sebelah Atucha. Sebuah versi yang lebih besar ini dipertimbangkan, yang dapat dibangun di Arab Saudi. INET China telah mengembangkan ini NHR-200, didasarkan pada pilot pabrik 5 MW. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Mengambang (FNPP) dari Rusia, dengan dua reaktor KLT-40S berasal dari pemecah es Rusia, atau desain lainnya untuk desalinasi. (Jika terutama untuk desalinasi kembar KLT-40 set-up dikenal sebagai APVS-80.) ATETs-80 adalah unit kogenerasi twin-reaktor menggunakan KLT-40 dan dapat mengambang atau berbasis tanah, memproduksi 85 MWe ditambah 120.000 m³/hari air minum. reaktor kecil ABV-6 adalah reaktor termal 38 MW, dan sepasang dipasang di tongkang 97 meter dikenal sebagai Volnolom mengambang PLTN, memproduksi 12 MWe ditambah 40.000 m³/hari air minum oleh Reverse Osmosis. Sebuah konsep yang lebih besar memiliki dua V reaktor BER-300 di pusat ponton panjang tongkang 170 m, dengan peralatan pendukung pada dua ponton sisi, seluruh kapal menjadi 49.000 dwt. Pabrik ini dirancang untuk dirombak setiap 20 tahun dan memiliki masa kerja 60 tahun. desain lain, Paes-150, memiliki satu VBER-300 Unit pada 25.000 dwt catamaran tongkang.

16.1.7 Pengolahan Air Limbah Dan Air Tanah Untuk Irigasi

Di Timur Tengah, persyaratan utama adalah untuk air irigasi untuk tanaman dan lanskap. Ini tidak perlu kualitas minum, tetapi harus diperlakukan dan dengan padatan terlarut cukup rendah.

Di Oman, tahap pertama 76.000 m³/hari dari pabrik desalinasi terendam Bioreaktor Membran (BRMt) dibuka pada tahun 2011. Kapasitas pabrik akhirnya adalah 220.000 m³/hari. Ini adalah pabrik pengolahan air limbah murah menggunakan kedua proses fisik dan biologis dan yang menghasilkan limbah berkualitas tinggi yang cukup untuk beberapa penggunaan domestik atau reinjeksi ke akuifer.

Di Australia AGL berencana untuk menginstal pabrik RO Desal dengan kapasitas 2000 m³/hari untuk menghasilkan air dari bagian lapisan batubara dalam proyek gas Gloucester tersebut. Ini akan digunakan untuk irigasi, bukannya untuk kualitas air minum. Juga di Australia, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO) telah menemukan bahwa penambahan nutrisi bisa membuat air desalinasi lebih menarik secara finansial untuk petani, yang biasanya membayar 20 sen/kiloliter untuk air irigasi, sedangkan sebagian besar biaya tanah Desal lebih dari A \$ 1/kL.

16.1.8 Proyek Desalinasi Baru

Aljazair telah melakukan studi pada pembangkit tenaga nuklir dan desalinasi menggunakan RO dan MED. Pabrik desalinasi air laut RO Desal dengan kapasitas 500.000 m³/hari Magtaa di Oran dengan biaya \$ 495.000.000 ditugaskan pada bulan November 2014, menyusul pabrik air laut RO Desal dengan kapasitas 120.000 m³/hari Fouka di Tipaza dekat Algiers pada tahun 2011, dengan biaya \$ 185.000.000. Negara ini juga mempertimbangkan MSF desalinasi untuk dua pabrik baru di samping pabrik Arzew MSF dengan kapasitas 91.000 m³/hari sekarang beroperasi. Total kapasitas adalah 2.3 juta m³/hari.

Di Argentina, sebuah pabrik air laut RO dengan kapasitas 3000 m³/hari sedang dibangun di Puerto Deseado, Santa Cruz, sekitar 1800 km sebelah selatan dari Buenos Aires.

Di Australia, enam pabrik air laut RO utama ditugaskan dengan biaya A \$ 12 milyar antara tahun 2006 dan 2012. Namun, pabrik Kurnell di dekat Sydney tidak digunakan tetapi memerlukan biaya A \$ 500.000 per hari untuk perawatan dan pemeliharaan. Di Victoria, sebuah pabrik RO desalinasi dengan kapasitas 440.000 m³/hari (150 GL/tahun) dekat Wonthaggi dibangun oleh Degremont telah ditugaskan untuk memasok Melbourne. Ini klaim untuk menggunakan 90 hingga 120 MWe dari energi terbarukan, dan diperluas sampai 200 GL / yr. Namun, belum pernah digunakan sejak 2012 selesai dan tetap siaga. Melbourne Water dengan biaya A \$ 18 miliar pada pembayaran kembali karena lebih dari 27 tahun dari 2015 diusulkan untuk menyebarkan lebih dari 60 tahun. Biaya pemeliharaan sebesar A \$ 607.000.000 ditagih kepada pelanggan. Pemerintah negara bagian pada tahun 2016 memesan 50 GL air dengan biaya A \$ 27.000.000 (lebih dari angka pemeliharaan). Pabrik di Adelaide dengan kapasitas 100.000 m³/hari (36 GL/hari) mulai beroperasi pada tahun 2011, dengan rencana untuk memperluas sampai 100 GL / tahun. Sebuah pabrik desalinasi dengan kapasitas 200-280,000 m³/hari untuk melayani tambang Olympic Dam di Australia Selatan memiliki persetujuan lingkungan tapi sekarang mungkin tidak melanjutkan. Perth memiliki dua pabrik RO air laut Desal, sebuah dengan kapasitas 123.000 m³/ hari (45 GL/tahun) dengan biaya A \$ 387.000.000 selesai pada tahun 2006 didukung oleh sebuah peternakan angin, dan sebuah lagi dengan kapasitas 100 GL/tahun satu didukung oleh 65 MWe dengan menggunakan energi terbarukan, yang bersama-sama memberikan setengah dari kebutuhan kota. Setelah uji coba ekstensif, kota berencana membuat skema pengisian air tanah dari perlakuan air limbah yang diharapkan biaya menjadi setengah dan menggunakan setengah energi dari desalinasi air laut. Ini akan mencakup Lanjutan Water Recycling Plant baru dan memberikan 7 GL/tahun dari tahun 2016 dan 28 GL/tahun akhirnya pada sekitar tahun 2022.

Di Chile, pabrik BHP Billiton dan Rio Tinto dengan biaya \$ 3,43 milyar, direncanakan pabrik air laut Desal dengan kapasitas 220.000 m³/hari (79 GL/tahun) dengan pipa diameter 1.07 m kembar dan pompa untuk tambang tembaga Escondida, dengan ketinggian 3100 m di atas permukaan laut dan 185 km di pedalaman. Ini akan membutuhkan lebih dari 1000 MWe dari grid untuk Desal sendiri dan akan ditugaskan pada tahun 2017. Doosan adalah untuk membangun pabrik di Caleta Coloso di bawah pengawasan Bechtel. Pada bulan November 2015 komisi tembaga negara Chili Cochilco mengatakan bahwa desalinasi akan memberikan setengah dari kebutuhan air untuk tambang tembaga negara pada tahun 2026 dengan kapasitas 924 ML/hari. Ada 16 proyek desalinasi terkait pertambangan senilai US \$ 10 milyar direncanakan atau dalam pembangunan di negeri ini, dan sembilan sudah beroperasi.

Cina membangun 112 pabrik air laut Desal pada tahun 2014, dengan total output dari 927.000 m³/hari, menurut State Oceanic Administration. Hal ini melihat kelayakan pabrik desalinasi air laut nuklir di wilayah Yantai Semenanjung Shandong, memproduksi 80-160.000 m³/hari dengan proses MED, menggunakan reaktor 200 MWt NHR-200. Sebuah pabrik air laut RO dengan kapasitas 100.000 m³/hari disediakan oleh Abengoa dari Spanyol mulai beroperasi awal tahun 2013 di Qingdao di Provinsi Shandong. Proyek lainnya membangun pabrik Aqualyng dengan kapasitas 330.000 m³/hari dekat Daya Bay. Sebuah pabrik dengan kapasitas 50.000 m³/hari selesai pada Oktober 2011 di Caofeidian di Teluk Bohai di provinsi Hebei, dan tahap kedua dua kali lipat ini pada tahun 2012. Beijing Enterprises Water Group yang berbasis di Hong Kong (BEWG) dengan Aqualyng sedang membangun pabrik RO dengan kapasitas 1 juta m³/hari di Caofeidian dengan biaya CNY 7 miliar untuk memasok Beijing melalui pipa sepanjang 270 km pada tahun 2019, dan pabrik dengan kapasitas 3 juta m³/hari direncanakan untuk diperluas ini untuk memasok modal, menyediakan sekitar sepertiga dari kebutuhannya. Pipa itu sendiri merupakan bagian utama dari proyek ini, akan menelan biaya sekitar CNY 10 miliar, dan pasokan air desalinasi dengan biaya CNY 8/m³ (\$ 1,28/m³). Pada bulan Maret 2013 Komisi Pembangunan dan Reformasi Nasional mengumumkan rencana baru untuk desalinasi air laut, termasuk untuk kota-kota Shenzhen dan Zhoushan, Pulau Luxixiang di Provinsi Zhejiang, Binhai New Area di Tianjin, Bohai New Area di Hebei, dan beberapa taman industri dan perusahaan. Biaya mungkin ada beberapa CNY 21 miliar (\$ 3,35 milyar). Cina bertujuan untuk menghasilkan 2,2 juta m³/hari air Desal pada tahun 2015, lebih dari tiga kali tingkat tahun 2011. Lebih dari setengah dari air tawar disalurkan ke pulau-pulau dan lebih dari 15% air dikirim ke pabrik pesisir akan datang dari laut pada tahun 2015, menurut rencana. Sebuah pabrik air laut Desal dengan kapasitas 300.000 m³/hari di Tianjin sedang dibangun dan akan menjadi yang pertama pabrik debit nol-cair (ZLD) di dunia. Hal ini karena pasokan pabrik petrokimia dari tahun 2017.

Di Mesir telah dilakukan studi kelayakan untuk pabrik kogenerasi untuk listrik dan air minum di El-Dabaa, di pantai Mediterania. Pada tahun 2010 rencana sedang dibentuk untuk empat 1000 reaktor MWe kelas yang akan dibangun di sana dan datang on line 2019-25, dengan kapasitas desalinasi signifikan. Pabrik desalinasi RO terbesar Mesir, dengan kapasitas 24.000 m³/hari, sedang dibangun di Marsa Matrouh di Barat Laut itu harus disertakan dengan perangkat Tekanan Exchanger (PX) energi-recovery oleh Energy Recovery Inc dari California. Yang pertama dari empat modul akan dimulai pada tahun 2013.

Di Ghana, Abengoa telah membangun pabrik RO air laut dengan kapasitas 60.000 m³/hari di Nungua untuk memasok Accra. Kontrak senilai \$ 125.000.000 meliputi operasi dan pemeliharaan selama 25 tahun.

Di India, pabrik dengan kapasitas 45.000 m³ per hari, menggunakan keduanya MSF dan teknologi desalinasi RO, dan dibangun berdasarkan pengalaman yang luas yang diuraikan di atas. Untuk Chennai, pabrik desalinasi air laut RO Minjur dengan kapasitas 100.000 m³/hari ditugaskan pada tahun 2010, Pabrik desalinasi air laut RO Nemmeli dengan kapasitas 100.000 m³/hari ditugaskan pada tahun 2013, dan ekspansi 150.000 m³/hari sedang

direncanakan. Sebuah pabrik dengan kapasitas 200.000 m³/hari direncanakan untuk Pattipulam, dengan potensi untuk meningkat dua kali lipat, dan juga melayani Chennai. Di Tamil Nadu dua pabrik air laut RO dengan kapasitas 60.000 m³/hari sedang dibangun di Kuthiraimozhi di Ramanathapuram dan Alanthalai di kota pelabuhan Tuticorin untuk memasok air minum.

Di Indonesia, Korea Selatan menyelidiki kelayakan membangun reaktor nuklir SMART dengan Unit kogenerasi menggunakan teknologi desalinasi MSF untuk Pulau Madura, dan kemudian studi telah di skala yang lebih besar PWR kogenerasi oleh Batan.

Di Iran, sebuah pabrik desalinasi MSF, dengan kapasitas 200.000 m³/hari dirancang untuk operasi dengan pembangkit listrik tenaga nuklir Bushehr pada tahun 1977, tapi awalnya dihentikan karena keterlambatan konstruksi berkepanjangan. Ini sedang diselesaikan oleh AEOI selanjutnya.

Di Irak, Basrah memiliki pabrik desalinasi air sungai garam dengan kapasitas 400.000 m³/hari, dan konsorsium yang dipimpin Hitachi membangun pabrik baru RO dengan kapasitas 199.000 m³/hari di sana, selesai pada tahun 2016.

Israel memiliki empat pabrik RO air laut Desal dengan kapasitas 627.000 m³/hari di Soreq. Israel merencanakan kapasitas lebih besar, termasuk pembelian sekitar 35-40 GL/tahun dari pabrik direncanakan di Aqaba bersama-sama dijalankan dengan Jordan.

Jordania memiliki 'defisit air ' dari sekitar 1,4 juta m³ per hari dan secara aktif mencari tenaga nuklir untuk mengatasi hal ini, serta menyediakan listrik. Pabrik dengan kapasitas 80 GL/tahun atau 220.000 m³/hari di Aqaba direncanakan dibangun, dengan Jordania menggunakan setengah hasilnya..

Kenya berencana mendirikan pabrik Desal dengan kapasitas 100.000 m³/hari dekat Mombasa.

Kuwait telah mempertimbangkan skema kogenerasi untuk reaktor 1000 MWe digabungkan ke pabrik desalinasi dengan kapasitas 140.000 m³ / hari. Sementara Kuwait memiliki kontrak senilai \$ 1,4 milyar dengan Hyundai dan anak perusahaan Veolia untuk membangun gabungan siklus pembangkit listrik 1.500 MWe bakar gas Az-Zour Utara dan pabrik MED dengan kapasitas 486.000 m³/hari. Ini akan mencapai sekitar 10% dari kapasitas daya Kuwait dan 20% dari kapasitas Desal nya tahun 2016.

Di Libya, pada pertengahan tahun 2007 nota kesepahaman ditandatangani dengan Perancis terkait untuk membangun pabrik nuklir menengah untuk desalinasi air laut. Areva TA akan memasok ini. Libya juga mempertimbangkan mengadaptasi reaktor riset Tajoura untuk desalinasi demonstrasi pembangkit nuklir dengan sistem MED-RO hybrid.

Meksiko memiliki pabrik El Salitral dengan kapasitas 21.000 m³/hari beroperasi dari akhir tahun 2013, dan telah memulai pembangunan pabrik dengan kapasitas dari 22.000 m³/hari di San Quintin di Baja California, dan satu lagi serupa di Ensenada, keduanya menggunakan kemitraan publik-swasta. Sebuah pabrik desalinasi air laut RO dengan kapasitas 379.000 m³/hari dikontrak di Rosarito Beach, di Baja California dekat perbatasan AS, dengan kapasitas 189.500 m³/hari sebagai fase 1 tahun 2019, dan fase 2 pada tahun 2024, menjadikannya pabrik desalinasi terbesar di belahan bumi Barat .

Maroko telah menyelesaikan studi pra-proyek dengan China, di Tan-Tan di pantai Atlantik, menggunakan reaktor pemanas 10 MWt yang menghasilkan 8000 m³ /hari air minum dengan distilasi (MED). Pemerintah memiliki rencana untuk membangun pembangkit listrik tenaga nuklir awal tahun 2016-17 di Sidi Boulbra, dan Atomstroyexport adalah membantu dengan studi kelayakan untuk ini.

Pada tahun 2014 Abengoa dianugerahi kontrak untuk membangun pabrik Desal air laut RO dan beroperasi selama 20 tahun dengan kapasitas 100.000 m³/hari di Agadir, 45 km dari kota itu. Biaya modal senilai € 82 juta.

Oman membangun pabrik RO air laut dengan kapasitas 45.460 m³/hari di Barka pada November 2013, dibangun di bawah kontrak BOO, memperluas fasilitas yang ada untuk kapasitas 136.000 m³/hari. Proyek BOO lain adalah Al Ghubrah, sebuah pabrik RO dengan kapasitas 190.000 m³/hari beroperasi komersial dari September 2014. Pabrik air laut Desal Salalah dibuka bulan Mei 2013, dengan kapasitas 69.000 m³/hari dengan generasi menembakkan gas 445 MWe. Kedua, pabrik air laut RO dengan kapasitas 57.000 m³/hari, direncanakan di pada tahun 2015. Power & Water Pengadaan Perusahaan Oman (OPWP) telah siap pada bulan April 2016 menandatangani perjanjian dengan perusahaan patungan Oman Spanyol-untuk mengembangkan proyek air independen (IWP) dengan kapasitas 250.000 m³/hari di Sohar.

Pakistan membangun sebuah pabrik RO dengan kapasitas 10,000 m³/hari seharga US \$ 3 juta telah ditugaskan di provinsi Sindh ketika ada kekeringan, di mana pemerintah memasang 300 pabrik RO dengan kapasitas sekitar 40 m³/hari. Sebuah pabrik dengan kapasitas 2000 m³/hari dibangun pada tahun 2015 di Karwat, untuk kota Gwadar, Balochistan.

Qatar telah mempertimbangkan tenaga nuklir dan desalinasi untuk kebutuhannya yang mencapai sekitar 1,3 juta m³/hari pada tahun 2010. Sebuah pabrik air laut Desal MSF Ras Abu Fontas A2 dengan kapasitas 144.000 m³/hari yang dibangun oleh Mitsubishi Corporation senilai \$ 504 juta dibangun pada tahun 2015, seperti Ras Abu Fontas A3 proyek pabrik RO dengan kapasitas 164.000 m³/hari juga dibangun oleh Mitsubishi adalah karena beroperasi dari akhir tahun 2016, pabrik RO besar pertama di negara itu. Bulan Mei 2015, Listrik dan Air Corporation Qatar (QEWC, Kahramaa) yang dipilih konsorsium Jepang Mitsubishi Corporation dan Tokyo Electric Power Company (Tepco), bernama K1 Energy, untuk membangun pabrik listrik dan air terdiri dari fasilitas desalinasi dengan kapasitas 590.000 m³/hari dan stasiun bakar gas listrik 2,4 GW di Umm Al Houl, 20 km selatan dari Doha.

Rusia sedang membangun pabrik air laut RO baru dengan kapasitas 10.000 m³/hari di lepas pantai dekat Vladivostok, untuk kebutuhan tahun 2011-12. Hal ini dirancang untuk kondisi iklim yang parah.

Saline Air Conversion Corporation Arab Saudi (SWCC) meningkatkan produksi air desalinasi tahun 2014 sebesar 10%, lebih dari 1,1 miliar meter kubik. Hal ini dilakukan dengan memperluas pabrik desalinasi Yanbu untuk memasok wilayah Madinah. Tahap 1 adalah pabrik hibrida dengan kapasitas 146.000 m³/hari, sebagian besar MSF menggunakan panas pulih dari pembangkit listrik turbin gas, tetapi dengan dua unit RO. Tahap 2 mengembangkan pabrik ini dan menambahkan pabrik MED dengan kapasitas 68.000 m³/hari dari Doosan menggunakan panas dari pembangkit listrik 690 MWe terkait, semua biaya lebih dari \$ 1 miliar. Ini akan menjadikan MED pabrik terbesar di dunia. Doosan juga akan membangun Yanbu 3, sebuah pabrik MSF dengan kapasitas 550.000 m³/hari dijadwalkan selesai pada tahun 2016. Sebuah pabrik RO dengan kapasitas 600.000 m³/hari direncanakan di Rabigh di barat. Pabrik desalinasi termal terbesar di dunia adalah Ras Al Khair (Ras Azzour) di Arab Saudi dengan kapasitas 1,025,000 m³/hari proyek MSF barat laut dari Jubail, biaya SAR 27 miliar (\$ 7,2 milyar) dan dibangun oleh Doosan. Proyek ini mencakup pembangkit listrik 2,6 Gwe. Fasilitas hybrid desalinasi memiliki kapasitas 727.000 m³/hari penguapan multi-stage (MSF) dan filtrasi membran RO dengan kapasitas 307.000 m³/hari. Ini akan memasok air dari Teluk ke 3,5 juta orang di wilayah Riyadh. Sebelumnya pabrik Shoaiba 3 dengan kapasitas 880.000 m³/hari merupakan yang terbesar. Veolia memiliki kontrak senilai \$ 402 juta untuk membangun pabrik ultrafiltrasi RO dengan kapasitas 178.600 m³/hari untuk Marafiq dengan nilai \$ 19,3 milyar di kompleks petrokimia Sadara, dibangun pada pertengahan-2015. Air akan berada pada dua menara pendingin dan sebagai air umpan boiler. Yang pertama dari tiga tahap inisiatif air dari Raja Abdullah Surya yang diharapkan akan beroperasi pada akhir 2013. Tahap 1 melibatkan pembangunan dua pabrik solar yang akan menghasilkan 10 MW listrik untuk pabrik desalinasi Reverse-Osmosis (RO)

di Al Khafji kapasitas 30.000 m³/hari, dekat perbatasan Kuwait. Tahap 2 akan melibatkan pembangunan pabrik desalinasi berkapasitas 300.000 m³/hari selama tiga tahun. Tahap ketiga bertujuan untuk mengimplementasikan inisiatif Air Surya di seluruh Arab Saudi, dengan target akhirnya melihat semua tanaman desalinasi negara didukung oleh tenaga surya pada tahun 2020. Salah satu tujuan utama dari inisiatif ini di bawah Kota Sains & Teknologi Raja Abdullah (KACST) adalah untuk menghilangkan garam air laut dengan biaya kurang dari Riyal 1,5 / m³ (US \$ 0,40/m³) dibandingkan dengan biaya saat desalinasi termal, yang KACST mengatakan dalam kisaran Riyal 2,0-5,5/m³ (US \$ 0,53-1,47/m³), dan pabrik desalinasi dengan RO, yang dalam Riyal 2,5-5,5/m³ (US \$ 0,67-1,47/m³) untuk pabrik desalinasi memproduksi 30.000 m³/hari. Pembentukan Air Desalinasi Umum Arab Saudi (GEWD) adalah, selama empat tahun hingga 2019, melaksanakan proyek-proyek baru dengan total kapasitas produksi hingga 2,5 juta m³/hari di wilayah Makkah dan provinsi timur.

Di Singapura, pabrik RO kapasitas 318.500 m³/hari, Tuaspring dibangun pada tahun 2013 sebagai pabrik Desal kedua. Sebuah pabrik RO buatan Cina berkapasitas 228.000 m³/hari di Changi akan dibangun pada tahun 2016, dibangun oleh anak perusahaan 80% dari Beijing Enterprises Water Grup secara BOO selama 25 tahun dengan harga tahun pertama dengan biaya SGD 0.276/m³ (US \$ 0,22).

Di Afrika Selatan pabrik air laut Desal Veolia adalah dibangun dengan kapasitas 1.700 m³/hari di Lamberts Bay, Cederberg kota, dapat dikembangkan sampai 5000 m³/hari. Ini akan menjadi pabrik ketujuh sepanjang barat dan pantai selatan Cape diinstal oleh Veolia. Sebuah pabrik dengan kapasitas 450.000 m³/hari pabrik seharga \$ 1,23 milyar direncanakan untuk Koeberg, dekat Cape Town.

Spanyol sedang membangun 20 pabrik RO di tenggara untuk memasok lebih dari 1% dari air di negara itu. Spanyol memiliki 40 tahun pengalaman desalinasi di Canary Islands, di mana ada pabrik dengan kapasitas 1,1 juta m³/hari disediakan.

Tunisia melihat kelayakan dari pabrik kogenerasi (listrik-desalinasi) di tenggara negara itu, diaman air tanah mengandung sedikit garam. Tunisia berencana melaksanakan tender untuk pabrik berkapasitas 150.000 m³/hari di Sfax.

UAE berencana membangun pabrik di Ras Al Kaimah dengan kapasitas 68.000 m³/hari. Sembcorp memperluas pabrik RO Fujairah 1 yang berkapasitas 136.000 m³/hari, untuk membawa UEA sampai ke kapasitas 591.000 m³/hari dengan kapasitas 307.000 m³/hari adalah RO dan 284.000 m³/hari adalah MSF. Juga Shuweihat S2 IPP dan pabrik air laut Desal di Al Ruwais mulai beroperasi penuh pada tahun 2011 dan menyediakan 1.510 MWe dan 454.000 m³/hari oleh MSF. Fujairah 2 pabrik hibrida SWRO-MED menghasilkan 454.600 m³/hari. Pabrik Taweelah A1 kogenerasi menghasilkan 1.430 MWe dan 385.000 m³/hari dan Umm Al Nar menghasilkan 394.000 m³/hari. Pabrik Al Hamriya Desal RO kapasitas 91.000 m³/hari tanaman dengan pembangkit listrik 400 MWe dibuka pada bulan Juni 2014 untuk memasok Sharjah dekat Dubai, sebagai bagian dari kompleks 2500 MWe dan kapasitas 636.000 m³/hari. Pabrik air laut Desal Al Zawra dengan kapasitas 136.400 m³/hari direncanakan di Ajman. GDF Suez memiliki perjanjian listrik dan air supply 25 tahun dengan Abu Dhabi untuk proyek Mirfa, termasuk pembangkit listrik 1.100 MWe pabrik RO baru berkapasitas 136.380 m³/hari, biaya \$ 1,5 miliar, bersama tiga unit MSF berkapasitas 34.095 m³/hari dan pembangkit listrik. Listrik dan Air Authority Federal Emirates (Fewa) mengumumkan pada April 2016 bahwa pihaknya berencana membangun empat fasilitas desalinasi lanjut dengan biaya lebih dari Dh 3 miliar (US \$ 750 juta) untuk menghasilkan 600.000 m³/hari. Pabrik pertama berkapasitas 180.000 m³/hari dan biaya \$ 260 juta akan dibangun di Emirat Umm Al Quwain untuk beroperasi mulai tahun 2020. Yang kedua akan dibangun di Ajman berkapasitas 120.000 m³/hari dengan biaya \$ 170, juga untuk memulai pada tahun 2020 (ini mungkin sama seperti yang disebutkan di atas). ketiga akan sama, di

Ras Al Khaimah untuk beroperasi mulai tahun 2026. Yang keempat direncanakan sebagai berkapasitas 180.000 m³/hari, pabrik senilai \$ 260 juta beroperasi dari 2023 dengan lokasi yang akan ditentukan.

Di Dubai pabrik Jebel Ali M kogenerasi dibuka pada tahun 2013 dengan 6x243 turbin gas MWe dan 8 unit MSF menyediakan 640.000 m³/hari. Sebelumnya, Dubai mengundang tawaran untuk membangun pabrik desalinasi air laut berkapasitas 450.000 m³/hari (165 GL/tahun) sebagai bagian dari proyek listrik swasta Hassyannya, tapi kemudian mengumumkan penangguhannya.

Di Inggris, sebuah pabrik RO berkapasitas 150.000 m³/hari diusulkan untuk muara rendah Thames, memanfaatkan air payau.

USA-Mexico: Pembangunan pabrik air laut Rosarito berkapasitas 375.000 m³/hari di Baja, California, adalah untuk menyediakan air minum di kedua sisi perbatasan. Sebuah pabrik air laut Desal 22.000 m³/hari dikontrak untuk San Quintin, Baja.

USA: San Antonio, Texas, adalah membangun pabrik Desal air payau dari akuifer RO berkapasitas 60.000 m³/hari, untuk beroperasi dari tahun 2016 dan biaya senilai \$ 193 juta. Penambahan direncanakan untuk mencapai kapasitas 150.000 m³/hari pada tahun 2026. Sebuah pabrik air garam Desal berkapasitas 200.000 m³/hari dan biaya \$ 1 miliar pada Carlsbad, California, dibuka pada tahun 2015. Ini akan membutuhkan sekitar 40 MWe beroperasi penuh dan dapat memberikan 10% dari air minum kabupaten San Diego. San Diego telah mendirikan pabrik pengolahan air limbah RO berkapasitas 415.000 m³/hari dengan biaya \$ 3,5 miliar. Hal ini diharapkan dapat memenuhi sepertiga dari kebutuhan air minum sehari-hari di kota ini pada tahun 2035, menjadikannya pabrik air minum terbesar kedua di Amerika Serikat.

Sebagian besar atau semua ini telah meminta bantuan teknis dari IAEA dalam proyek kerjasama teknis pada tenaga nuklir dan desalinasi. Sebuah proyek penelitian IAEA dikoordinasikan dimulai pada tahun 1998 Ulasan desain reaktor ditujukan untuk kopling dengan sistem desalinasi serta teknologi desalinasi canggih. Program ini, yang melibatkan lebih dari 20 negara, diharapkan untuk memungkinkan pengurangan biaya lebih lanjut dari desalinasi nuklir.

16.2 Panas Proses Nuklir untuk Industri

Dua makalah dalam seri ini membahas penerapan energi nuklir untuk Desalinasi dan Hidrogen dalam transportasi. Makalah ini mencakup aplikasi lainnya, tetapi mencakup hidrogen dan metanol produksi. Perhatikan bahwa unit MWt (megawatt termal) sering digunakan, masing-masing 3 MWt sesuai dengan sekitar 1 MWe ketika listrik yang dihasilkan. Penerapan potensi panas nuklir terutama tergantung pada suhu yang diperlukan. Dengan suhu keluaran reaktor hingga 700° C ada berbagai macam aplikasi mungkin, pada 900° C ada kemungkinan lebih lanjut, dan pada 950° C aplikasi penting untuk produksi hidrogen di masa depan terbuka. Sekitar 20% dari konsumsi energi AS masuk ke dalam aplikasi proses panas, dibandingkan dengan 35-40% menjadi listrik. Dalam hal ini 20%, menggantikan bahan bakar fosil dengan panas nuklir menjanjikan banyak dalam keamanan energi, stabilitas harga dan mengurangi risiko regulasi, dan itu adalah satu-satunya pilihan jika emisi karbon dioksida yang harus dihindari.

Departemen Energi AS telah mengejar konsep Next Generation Nuclear Plant (NGNP) sejak tahun 2005, meskipun dengan mengurangi pendanaan. Awalnya ini difokuskan pada produksi hidrogen akhirnya, yang membutuhkan suhu yang sangat tinggi dengan sesuai tantangan teknologi dan biaya. Prospek prototipe beroperasi pada 2021 tampaknya akan surut. Mitra industri dalam usaha, dengan sebelas perusahaan anggota termasuk vendor reaktor Areva dan Westinghouse, utilitas Entergy, dan potensi pengguna akhir dari listrik dan panas proses seperti Dow Chemical dan Conoco Phillips, telah menetapkan pandangan

mereka pada lebih mudah dicapai 750° C suhu outlet untuk proses panas daripada produksi hidrogen khususnya. Sebuah evaluasi oleh Idaho National Laboratory (INL) tahun 2011 untuk pabrik multi-modul khas HTR menunjukkan bahwa suhu tinggi proses panas dan listrik untuk digunakan oleh industri yang intensif energi dapat diproduksi dengan harga energi yang setara dengan gas alam pada kisaran \$ 6 sampai \$ 9/GJ. Perkiraan Areva mendukung ini yang dapat dilihat pada Tabel 16.1

Tabel 16.1 Temperatur Untuk Setiap Proses

Temperatur proses	Sampai 700 ⁰ C	Sampai 900 ⁰ C	Sampai 950 ⁰ C
Produksi listrik	Siklus Rankine(uap)	Siklus Brayton (langsung)	
Aplikasi penggunaan	Desalinasi	H ₂ via pembentukan metan atau elektrolisis temperatur tinggi	Produksi H ₂ secara termokimia
Industri minyak dan kimia	Tar/minyak, petrokimia	Syngas untuk ammonia dan methanol	Produksi H ₂ secara termokimia

16.2.1 Penemuan Kembali Minyak Dari Pasir Tar

Dari sekitar tahun 2003 berbagai usulan telah dibuat untuk menggunakan tenaga nuklir untuk menghasilkan uap untuk ekstraksi deposito minyak dari pasir tar utara Alberta dan listrik juga untuk infrastruktur besar yang terlibat. Saat ini banyak gas alam digunakan - hingga 30 meter kubik per barel minyak. Dengan proyeksi dari tiga juta barel per hari pada tahun 2016, banyak gas yang digunakan dan biaya meningkat secara dramatis. Bahkan, gas alam Kanada tidak memadai untuk memasok ekspansi yang diantisipasi dalam hasil minyak pasir dan penggunaannya memiliki implikasi CO₂ utama yang menciptakan perhatian publik, sekitar 20% dari energi dalam minyak diperlukan untuk memproduksinya dan sekitar 80 kg CO₂ per barrel dilepaskan. Gas tersebut digunakan sebagai sumber energi untuk membuat uap untuk mencairkan aspal, memungkinkan pemisahan, dan untuk menghasilkan listrik untuk pertambangan dan pengobatan. Institute Research Energy Kanada memprediksi tiga kali lipat produksi aspal bruto pada tahun 2020. Salah satu usulan dari Energy Alberta Corp menyarankan bahwa satu reaktor CANDU 6 (sekitar 1800 MWt) dikonfigurasi untuk menghasilkan 75% uap dan 25% listrik akan menggantikan 6 juta meter kubik per hari gas alam dan mendukung produksi 175-200,000 barel per hari minyak. Hal ini juga akan menghemat emisi 3,3 juta ton CO₂ per tahun. Tokoh pendukung lainnya dari Pebble Reaktor Modular B (PBMR) mengkonfirmasi bahwa setiap 100 MWt akan memungkinkan produksi 10.000 barel per hari. Perbedaan utama antara gas alam dan uap generasi nuklir adalah bahwa proses boros bahan bakar diganti dengan sesuatu yang padat modal, tanpa emisi karbon.

16.2.2 Penyulingan Minyak

Memisahkan komponen yang berbeda dari minyak mentah oleh dua proses distilasi, kilang minyak biasanya memecah residu hidrokarbon berat atau rantai panjang dalam catalytic cracker dengan menambahkan hidrogen. Hidrogen yang dihasilkan dari gas alam, dan memecah hidrokarbon rantai panjang untuk menghasilkan sintetik minyak mentah (sekitar 5 kg digunakan per barel). hidrogenasi ini minyak mentah berat adalah penggunaan

utama dari hidrogen dewasa ini. Secara keseluruhan, sekitar 15-20% dari nilai energi dari minyak mentah yang digunakan dalam memproduksi produk olahan. Produksi hidrogen adalah dengan pembentukan uap gas alam, dan menimbulkan banyak karbon dioksida. Tenaga nuklir bisa membuat uap dan listrik dan menggunakan listrik untuk elektrolisis suhu tinggi untuk produksi hidrogen. (Air berat dan oksigen merupakan produk berharga dari elektrolisis)

16.2.3 Batubara Untuk Cairan (CTL)

Berbagai proses yang digunakan. pencairan tidak langsung bagi sebagian besar produksi dunia, sekitar 260,000 barrels/41,000 m³ per. gasifikasi batubara untuk syngas dan produk disintesis baik untuk diesel dan bahan bakar jet, atau bensin (Mobil atau proses MTG methanol). Proses pencairan langsung lewat langkah syngas dan baik hidrogenasi atau pirolisis dan karbonisasi. Proses awalnya Fischer-Tropsch (F-T) dikembangkan di Jerman pada tahun 1920, dan memberikan banyak bahan bakar untuk Jerman selama Perang Dunia Kedua. Ini kemudian menjadi dasar bagi produksi minyak banyak di Afrika Selatan oleh Sasol, yang kini mensuplai sebagian besar BBM diesel negara itu. Namun, itu adalah pengguna yang signifikan dari hidrogen, mengkatalisis reaksi dengan karbon monoksida. Hidrogen sekarang diproduksi dengan CO oleh gasifikasi batubara, bagian dari aliran gas mengalami reaksi pergeseran air. Gasifikasi batubara menghasilkan baik CO dan H₂ bahan untuk F-T, dan reaksi pergeseran air mengubah beberapa CO menjadi CO₂ dan lebih banyak H₂, kedua tahap menggunakan air. Dalam F-T itu sendiri hidrogen ditambah CO dikonversi ke hidrokarbon alkana menggunakan katalis.

Di Erdos, Mongolia Dalam, Shenhua Coal Liquefaction Corp China menghasilkan 20.000 barel/3000 ton minyak per hari dari hampir 10.000 ton batubara dari lapangan batubara Shenfu-Dongsheng, menggunakan teknologi AS. Pabrik Erdos CTL senilai \$ 2,06 milyar ditugaskan pada tahun 2010 dan pada tahun 2013 itu memproduksi 866.000 ton produk minyak. Ini memiliki total kapasitas desain 1,08 juta ton, yang terdiri dari diesel (621.000 ton/tahun), naptha (321.000 ton/tahun) dan LPG (70.000 ton/tahun). Pasokan air merupakan kendala pada operasi, dan membutuhkan 7-12 ton air segar untuk memproduksi satu ton produk, tergantung pada apakah pencairan langsung atau tidak langsung (berdasarkan FT), bersama dengan 9 ton CO₂ dan 4,8 ton limbah terkontaminasi air menurut kritikus. Menggunakan hidrogenasi batubara pada suhu tinggi dan tekanan dengan katalis. Shenhua mengusulkan pabrik senilai \$ 7 miliar dalam Ningdong, Ningxia, Cina, pabrik Shenhua CTL untuk menghasilkan 80.000 barel/13.000 m³/hari, menggunakan teknologi pencairan tidak langsung Sasol, berdasarkan F-T. Sasol telah ditarik dari usaha itu.

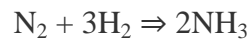
Proses Hidrogenasi (Bergius) membutuhkan hidrogen bereaksi langsung dengan batubara pada suhu tinggi dan tekanan. proses pirolisis dan karbonisasi memberikan kurang **yield**, dan yang biasanya membutuhkan pemurnian. Mereka tidak komersial untuk CTL. Sebuah sumber nuklir hidrogen ditambah dengan panas proses nuklir akan menghasilkan lebih dari dua kali lipat jumlah hidrokarbon cair dari batubara dan menghilangkan sebagian besar emisi CO₂ dari proses. Menggunakan hanya batubara hitam di pabrik Sasol-jenis, 14.600 ton menghasilkan 25.000 barel "minyak" synfuel (dengan 25.000 ton CO₂). Sebuah sistem hybrid menggunakan listrik nuklir untuk elektrolisa air untuk hidrogen. Sebanyak 4400 ton gasifikasi batubara menggunakan oksigen dari elektrolisis untuk menghasilkan karbon monoksida yang diumpankan ke pabrik Fischer-Tropsch dengan hidrogen untuk menghasilkan 25.000 barel "minyak" synfuel. Sangat sedikit hasil CO₂, dan ini didaur ulang untuk gasifier.

16.2.4 Hidrogen Untuk Pupuk Pertanian

Tenaga nuklir memiliki potensi peran utama di bidang pertanian. Menurut Norman Borlaug, 1970 pemenang Nobel dan "kakek dari revolusi hijau", nitrogen organik dalam tanah di dunia ini hanya cukup untuk memberi makan sepertiga dari populasi saat ini. Sisanya harus berasal dari penambahan anorganik. Sebagian besar pupuk nitrogen di dunia yang dibuat menggunakan proses Haber, menggabungkan nitrogen atmosfer berlimpah dengan hidrogen. Amonia yang dihasilkan kemudian dioksidasi menjadi nitrat. Tapi hidrogen harus dibuat dari bahan bakar fosil, terutama metana, yaitu gas alam. Ini adalah mahal dan menimbulkan emisi karbon dioksida yang cukup besar (dalam beberapa langkah, tapi secara keseluruhan: $\text{CH}_4 + \text{O}_2 \Rightarrow \text{CO}_2 + 2\text{H}_2$, sehingga setiap ton hidrogen menimbulkan 11 ton CO_2).

16.2.5 Proses Haber

Ilmuwan Jerman Fritz Haber menemukan proses untuk menggabungkan nitrogen atmosfer dengan hidrogen pada tahun 1909. dan menerima Hadiah Nobel untuk kimia pada tahun 1918 untuk menciptakan "sarana yang sangat penting untuk meningkatkan standar pertanian dan kesejahteraan umat manusia", yang sekarang terlihat seperti kurang diperhatikan.



Proses Haber menghasilkan sekitar 100 juta ton pupuk nitrogen per tahun dan mengkonsumsi sekitar 3-5% dari produksi gas alam dunia untuk membuat hidrogen untuk itu. Jika hidrogen dapat dibuat hanya dari air, CO_2 dapat dihindari dan bahan baku kimia organik berharga tidak dihabiskan. Tenaga nuklir dapat menghasilkan hidrogen dengan elektrolisis, terutama elektrolisis suhu tinggi, dan di masa depan mungkin akan dibuat secara termokimia seperti dijelaskan di atas. Berlimpah murah hidrogen akan sangat meningkatkan produktivitas pertanian dunia melalui peningkatan ketersediaan pupuk nitrogen.

16.2.6 Produksi Etanol Berbasis Biomassa

Produksi etanol skala komersial dari selulosa dalam biorefinery membutuhkan masukan energi. Dua proses dapat digunakan: fermentasi biokimia, atau konversi termokimia. Masukan energi yang dibutuhkan untuk memproduksi etanol dari bahan selulosa (seperti kayu) adalah setara dengan 25-38% dari hasil, sebagian besar sebagai uap (meskipun proses termokimia juga memerlukan suhu tinggi). Membakar kadar lignin dari bahan baku, energi secara mudah dapat dipasok oleh pembangkit nuklir sebagai kogenerasi, secara bebas karbon. Di masa depan, lignin dapat dikonversi menjadi bahan bakar cair, mungkin oleh hidrogenasi. Dalam hal ini, hasil bahan bakar cair dari biomassa dapat ditingkatkan dengan sekitar setengah, per unit hasil. Banyak masukan energi nuklir adalah sebagai uap suhu rendah, pada dasarnya merupakan produk sampingan dari pembangkit listrik, dan karenanya murah.

16.2.7 Produksi Metanol Berbasis CO_2

Menghindari kebutuhan untuk memakai tanah yang subur untuk biomassa seperti jagung, atau pertumbuhan kayu, produksi metanol (CH_3OH) yang terkenal surplus CO_2 , dapat menggunakan panas nuklir serta hidrogen nuklir yang dihasilkan. Pada tahun 2015 kapasitas metanol global mencapai 118 juta ton dan diperkirakan akan mencapai 184 Mt tahun 2020, menurut GlobalData. Kebanyakan produksi saat ini adalah dari gas sintesis (karbon monoksida dan hidrogen) yang berasal dari biomassa atau bahan bakar fosil, biasanya dengan steam reforming gas alam. Sebagian besar penggunaan metanol adalah untuk membuat plastik. Sekitar 14% dari itu digunakan sebagai aditif bensin, dengan jumlah yang terus meningkat, dan 7% untuk membuat dimetil eter (DME).

16.2.8 Energi Nuklir Untuk Produksi Hidrogen

Tenaga nuklir sudah menghasilkan listrik sebagai pembawa energi utama. Hal ini baik ditempatkan untuk menghasilkan hidrogen baik untuk mengkonversi CO₂ menjadi metanol (CH₃OH), atau jika hidrogen itu sendiri menjadi pembawa energi utama juga, selain peran dalam penyulingan minyak dan produksi pupuk. Evolusi peran energi nuklir dalam produksi hidrogen dipandang lebih mungkin selama tiga dekade:

- Elektrolisis air, menggunakan kapasitas off-peak (perlu 286 kJ/mol),
- Penggunaan panas nuklir untuk membantu pembentukan uap gas alam,
- Suhu tinggi elektrolisis (HTE) uap, menggunakan panas dan listrik dari reaktor nuklir, kemudian
- Suhu tinggi produksi termokimia menggunakan panas nuklir.

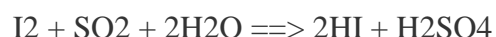
Pembentukan uap metana memerlukan suhu lebih dari 800° C untuk menggabungkan metana dan uap untuk menghasilkan hidrogen dan karbon monoksida. Sebuah sumber panas nuklir akan mengurangi konsumsi gas alam sekitar 30% (yaitu bahwa sebagian dari konsumsi yang hanya akan untuk panas), dan menghilangkan emisi buang CO₂. Terpisah dari ini, efisiensi dari keseluruhan proses (panas utama untuk hidrogen) bergerak dari dari sekitar 25% dengan reaktor saat mengemudi elektrolisis (33% untuk reaktor x 75% untuk sel) ke 36% dengan reaktor yang lebih efisien melakukannya, sampai 45% untuk elektrolisis suhu tinggi uap, sekitar 50% atau lebih dengan produksi termokimia langsung. Karena kebutuhan untuk kompres hidrogen, ditambah inefisiensi sel bahan bakar, dari hidrogen ke penggerak listrik hanya 30-40% efisien pada tahap ini, memberikan 15-20% keseluruhan panas utama untuk roda, dibandingkan dengan 25-30% untuk PHEV. Elektrolisis suhu rendah menggunakan listrik nuklir dilakukan pada skala yang cukup kecil saat ini, membutuhkan sekitar 50 kWh per kilogram yang dihasilkan. Namun, biaya hidrogen dari itu adalah lebih tinggi (satu sumber mengatakan: \$ 4-6 per kg, dibandingkan dengan \$ 1,00-1,50 dari gas alam, tetapi sumber lain mengatakan biaya akan sama seperti listrik @ 4c / kWh ketika gas alam adalah US \$ 9.50 / GJ - cf \$ 7 Juli 2005). Suhu tinggi elektrolisis (pada 800° C atau lebih) telah dibuktikan, dan menunjukkan hasil yang cukup baik. Hal ini membutuhkan energi sekitar kurang sepertiga pada suhu rendah elektrolisis. Penelitian AS di Idaho National Laboratory dalam hubungannya dengan Ceramtec.

16.2.9 Hidrogen Dari Panas Nuklir

Beberapa proses termokimia langsung sedang dikembangkan untuk memproduksi hidrogen dari air. Untuk produksi ekonomi, suhu tinggi diperlukan untuk memastikan hasil yang cepat dan efisiensi konversi yang tinggi. Dalam setiap proses termokimia memerlukan suhu tinggi (800-1000° C), tekanan rendah endotermik (menyerap panas) dekomposisi asam sulfat menghasilkan oksigen dan sulfur dioksida:



Ada kemudian beberapa kemungkinan. Dalam proses yodium-sulfur (IS) yodium digabungkan dengan SO₂ dan air untuk menghasilkan hidrogen iodida yang kemudian memisahkan hidrogen dan yodium. Ini adalah reaksi Bunsen dan eksotermis, terjadi pada suhu rendah (120° C):



HI kemudian berdisosiasi menjadi hidrogen dan yodium pada sekitar 350° C, secara endotermis:



Hal ini dapat memberikan hidrogen pada tekanan tinggi. Menggabungkan semua ini, reaksi bersih kemudian:



Semua reagen selain air di daur ulang, tidak ada limbah. Japan Atomic Energy Authority (JAEA) telah menunjukkan skala laboratorium dan memproduksi hidrogen dengan proses IS, hingga 30 liter/jam. Sandia National Laboratory di Amerika Serikat dan CEA Perancis juga mengembangkan proses IS dengan maksud untuk menggunakan reaktor suhu tinggi untuk itu. General Atomics memulai pekerjaan laboratorium awal pada produksi termokimia lengkap tahun 2006. Sebuah pabrik percontohan hidrogen 10 MW menggunakan panas fosil itu kemudian akan dibangun, diikuti oleh produksi termokimia nuklir pada tahun 2015. Produksi hidrogen secara ekonomi tergantung pada efisiensi metode yang digunakan. Siklus IS digabungkan ke reaktor suhu tinggi modular diharapkan untuk menghasilkan hidrogen pada \$ 1,50 sampai \$ 2,00 per kg. Oksigen hasil sampingan juga memiliki nilai. Untuk proses termokimia efisiensi keseluruhan lebih besar dari 50% diproyeksikan. Dikombinasikan siklus pabrik memproduksi baik H₂ dan listrik dapat mencapai efisiensi 60%.

16.2.10 Persyaratan Reaktor Produksi Untuk Proses Panas

Tiga konsep reaktor berpotensi yang cocok telah diidentifikasi, meskipun hanya yang pertama adalah cukup berkembang dengan baik untuk bergerak maju dengan:

- Reaktor Suhu tinggi gas-cooled (HTR), baik tempat tidur kerikil atau heksagonal jenis blok bahan bakar. Modul hingga 285 MWe akan beroperasi pada 950° C tetapi dapat lebih panas.
- Reaktor suhu tinggi Lanjutan (AHTR), reaktor modular menggunakan dilapisi-partikel bahan bakar grafit-matrix dan dengan garam fluorida cair sebagai pendingin primer. Hal ini mirip dengan HTR tetapi beroperasi pada tekanan rendah (kurang dari 1 atmosfer) dan suhu yang lebih tinggi, dan memberikan transfer panas yang lebih baik. Ukuran 1000 MWe/2000 MWt.
- Lead-cooled reaktor cepat, meskipun ini beroperasi pada suhu lebih rendah dari HTRs - yang terbaik yang dikembangkan adalah reaktor BREST Rusia yang berjalan hanya pada 540° C. Sebuah proyek US adalah STAR-H2 yang akan memberikan 780° C untuk produksi hidrogen dan suhu yang lebih rendah untuk desalinasi.

Untuk produksi hidrogen, suhu tinggi 750-1000° C, diperlukan, dan pada 1000° C efisiensi konversi adalah tiga kali daripada 750° C. Pabrik kimia perlu diisolasi dari reaktor terdekat, untuk alasan keamanan, mungkin menggunakan helium menengah atau lingkaran fluoride cair. Untuk suhu di luar 750°C, garam fluorida cair adalah cairan pilihan antarmuka antara sumber panas nuklir dan pabrik kimia. Industri peleburan aluminium memberikan pengalaman substansial dalam mengelola yang aman. Garam cair panas juga dapat digunakan dengan helium sekunder listrik pembangkit pendingin melalui siklus Brayton, dengan efisiensi termal sebesar 48% pada 750° C hingga 59% pada 1000° C. Masih ada tantangan yang signifikan dalam mencapai suhu untuk produksi hidrogen komersial.

16.2.11 Reaktor Suhu Tinggi Untuk Proses Panas

Proyek HTR paling canggih adalah HTR-PM China, berdasarkan sukses prototipe HTR-10. Unit demonstrasi yang dibangun di Shidaowan berhubungan dengan unit 250MWt dengan dengan suhu keluar 750° C untuk turbin uap 210 MWe. Di Amerika Serikat Departemen Energi sejak tahun 2005 telah memiliki program untuk mengembangkan Next Generation Nuclear Plant (NGNP) yang menjadi HTR mampu menghasilkan hidrogen, listrik atau proses panas. NGNP dilisensikan oleh NRC dan akan dibangun di Idaho dengan substansial biaya pangsa dimaksudkan dari industri. Fokusnya adalah pada aplikasi panas proses, sehingga memperluas basis pengguna akhir untuk energi nuklir.

Awal tahun 2012 Industri Aliansi NGNP mengumumkan bahwa mereka telah memilih 625 MWt desain Areva HTR, atau 'konsep reaktor Gen IV', yang dikenal sebagai Antares,

untuk pengembangan lebih lanjut. Ini akan dijalankan dengan helium sebagai pendingin primer pada 750° C dan siklus uap sekunder dua loop. Industri Aliansi NGNP bekerja sama dengan Eropa Cogeneration Industrial Initiative (NC2I) dalam menetapkan target untuk membangun dan menunjukkan instalasi HTR di industri yang intensif energi lebih dari satu dekade dari tahun 2014. Pada tahun 2006 Dewan PBMR Afrika Selatan memformalkan konsep suatu Proses Suhu Tinggi PBMR Panas Plant (PHP) dengan suhu keluaran reaktor 950° C. Pabrik pertama dipertimbangkan tahun 2016 dan aplikasi akan menjadi produksi pasir minyak dan industri petrokimia (proses steam), pembentukan gas metana untuk hidrogen dan akhirnya produksi hidrogen termokimia. Setiap modul 600 MWt akan menghasilkan sekitar 200 ton hidrogen per hari, yang juga cocok dengan skala permintaan industri saat ini untuk hidrogen. Pada tahun 2011 program ini dibatalkan karena kurangnya dana.

Di Korea Selatan proyek nuklir Pengembangan & Demonstrasi Hidrogen (NHDD) difokuskan pada teknologi HTR baik untuk produksi hydrogen maupun hidrokarbon cair. Ini diluncurkan pada tahun 2006 sebagai program utama yang didukung oleh MOST. Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI) sebelumnya mengajukan desain Reaktor Suhu Sangat Tinggi (VHTR) untuk International Forum Generasi IV. VHTR adalah untuk menghasilkan hidrogen dalam skala besar, dengan 300 modul MWt masing-masing memproduksi 30.000 ton hidrogen per tahun. KAERI mengharapkan desain teknik yang harus dilakukan pada tahun 2014, konstruksi mulai 2016 dan pengoperasian reaktor demonstrasi pada tahun 2020, dengan komersialisasi sekitar tahun 2025. R & D fokus pada pengembangan bahan-suhu tinggi tahan korosi dan komponen dan bahan bakar dilapisi partikel tahan api. KAERI juga memiliki kemitraan penelitian dengan University China Tsinghua berfokus pada produksi hidrogen, berdasarkan reaktor HTR-10 China. Sebuah Pusat Pengembangan Bersama Hidrogen Nuklir Korea Selatan-AS yang melibatkan General Atomics didirikan pada tahun 2005.

16.2.12 Bergerak Maju Pada Hidrogen

Sebuah evaluasi oleh JAEA tahun 2004 menunjukkan bahwa pada tahun 2010 itu diharapkan untuk mengkonfirmasi keselamatan reaktor suhu tinggi dan membangun teknologi operasional untuk pabrik IS untuk membuat hidrogen secara termokimia. Pada bulan April 2004 suhu pendingin outlet 950° C dicapai dalam Suhu Tinggi Teknik Uji Reaktor (HTTR) yang pertama di dunia, dan membuka jalan bagi produksi hidrogen termokimia secara langsung. Sementara pabrik proyek uji pilot yang memproduksi hidrogen dengan kapasitas 30 m³/jam dari helium dipanaskan dengan 400 kW sedang berlangsung untuk menguji kelayakan rekayasa proses IS. Setelah tahun 2010 pabrik IS memproduksi 1.000 m³/jam (90 kg/jam, 2t/hari) hidrogen dihubungkan dengan HTTR untuk mengkonfirmasi kinerja sistem produksi yang terintegrasi, dipertimbangkan untuk tahun 2020.

JAEA telah mengembangkan desain konseptual untuk unit GTHTR300C 600 MWt untuk hidrogen kogenerasi menggunakan langsung turbin gas siklus untuk listrik dan IS proses untuk hidrogen, dengan suhu keluar helium dari 950° C dan helium sekunder pada 900° C, penggelaran unit pertama setelah 2020. Tenaga panas yang disediakan untuk sistem hidrogen dapat ditingkatkan menjadi 170-370 MW jika diperlukan, pada tingkat yang lebih rendah 202 MWe listrik diproduksi, dengan turbin gas suhu inlet dari 850° C. Ini bisa menghasilkan hidrogen sebesar 24.000 m³/jam. Sistem hidrogen IS di luar penukar panas menengah pada kelas non-nuklir, sejalan dengan fasilitas produksi hidrogen lainnya. Sebanyak 30 unit GTHTR300C bisa menghasilkan hidrogen untuk beroperasi pada 5,9 juta kendaraan sel bahan bakar (pada 170 MW) atau sampai dengan 12,6 juta pada 370 MWt.

Produksi termokimia hidrogen secara ekonomi terlihat baik. General Atomics sebelumnya memproyeksikan US \$ 1,53/kg berdasarkan pada HTR 2.400 MWt beroperasi pada 850° C, dengan 42% overall efisiensi, dan \$ 1.42/kg pada 950° C dan efisiensi 52% (keduanya pada tingkat diskonto 10,5%). Pada tahun 2003 harga pembentukan uap hasil gas alam hidrogen adalah US \$ 1,40/kg, dan penyerapan CO₂ akan mendorong ini untuk \$ 1,60/kg. Seperti pabrik yang bisa menghasilkan 800 ton hidrogen per hari, "cukup untuk 1,5 juta mobil sel bahan bakar" (@ 1 t/hari untuk 1800 mobil).

Sementara itu, hidrogen dapat diproduksi dengan elektrolisis air, menggunakan listrik dari sumber manapun. sumber-sumber non-fosil, termasuk yang terputus-putus seperti angin dan matahari, kemungkinan penting (dengan demikian memecahkan masalah yaitu tidak bisa menyimpan listrik dari sumber-sumber). Namun, efisiensi yang lebih besar dari elektrolisis pada suhu tinggi diperoleh dengan sumber nuklir untuk keduanya yaitu panas dan listrik. Pada tahun 2013 sebuah laporan IAEA mengatakan bahwa "hidrogen yang dihasilkan nuklir memiliki potensi keuntungan yang penting melebihi dari sumber-sumber lain yang akan dipertimbangkan untuk pangsa hidrogen berkembang dalam ekonomi energi dunia masa depan. Namun, ada ketidakpastian teknis dalam proses hidrogen nuklir yang perlu ditangani melalui penelitian dan pengembangan usaha yang kuat. masalah keamanan serta penyimpanan hidrogen dan distribusi merupakan wilayah penting dari penelitian yang akan dilakukan untuk mendukung ekonomi hidrogen sukses di masa depan. "

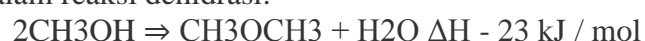
16.2.13 Produksi Metanol Menggunakan Hidrogen, DME

Tindak lanjut dari produksi hydrogen secara termokimia, dan mempertimbangkan penyimpanan dan portabilitas tantangan hidrogen itu sendiri, serta perubahan radikal untuk mobil sel bahan bakar, perhatian telah berubah mengarah ke metanol. Seperti disebutkan di atas: penyimpanan hidrogen portable sulit, terutama untuk penggunaan otomotif. Bahan bakar masa depan untuk mobil perlu bersaing dengan bensin pada 32 MJ/L atau solar di 39 MJ/L dan tidak lebih sulit untuk menyimpan dan mengisi bahan bakar dari LPG. LNG memiliki masalah yang sama dengan hidrogen, etanol berasal dari biomassa, tapi metanol dapat dibuat dari CO₂ dan hidrogen. Jika hidrogen diproduksi secara nuklir, dan CO₂ adalah masalah karena kelimpahan, bahan bakar kendaraan bermotor dapat berlaku selamanya, menggunakan teknologi mesin dewasa ini. Untuk mesin diesel, dimetil eter (CH₃-O-CH₃) lebih baik, dan ini dibuat oleh dehidrasi beberapa molekul metanol. Ini adalah gas tetapi dapat disimpan di bawah tekanan rendah sebagai cairan, seperti LPG. Keduanya memiliki kepadatan energi dari 18-19 MJ/L, sehingga kurang dari bahan bakar berbasis minyak, tetapi dapat digunakan dan mudah disimpan. Masa depan pasca-minyak mungkin berbasis metanol. Juga, metanol dapat digunakan dalam sel bahan bakar, jika ini lebih disukai daripada mesin pembakaran internal.

Metanol, dan dimetil eter (DME) yang berasal dari keduanya, adalah pembawa energi yang baik, dan DME khususnya dapat menggantikan bahan bakar diesel. Metanol hari ini diproduksi dalam berbagai cara, tetapi idealnya akan dihasilkan dari CO₂ di atmosfer berlimpah diregenerasi dengan hidrogen yang dihasilkan oleh energi nuklir menggunakan energi nuklir lebih dalam proses konversi.

$\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \Rightarrow \text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \Delta H - 49,5 \text{ kJ / mol}$ pada 25 ° C, - 58 pada 225 ° C, eksotermis (Yang endotermik sebaliknya CO_2 reaksi pergeseran air + $\text{H}_2 \Rightarrow \text{CO} + \text{H}_2\text{O}$ akan terjadi pada saat yang sama, bersama dengan: $\text{CO} + 2\text{H}_2 \Rightarrow \text{CH}_3\text{OH} \Delta H - 91$ untuk - 98 kJ / mol - eksotermis)

Dimetil eter dibuat dalam reaksi dehidrasi:



Di Islandia, produksi metanol sudah dilakukan dengan menggunakan CO₂ yang ditangkap dari gas buang dan hidrogen dari elektrolisis yang menggunakan energi terbarukan.

Perusahaan Daur Ulang Karbon International didirikan pada tahun 2006 untuk memproduksi Methanol Terbarukan untuk penggunaan otomotif dan juga biodiesel.

DME sudah digunakan sebagai pengganti propana, dan kapasitas produksi dunia adalah lebih dari 10 juta ton per tahun. China sendiri bertujuan untuk menghasilkan 20 juta ton per kapasitas DME tahun 2020. Swedia memproduksi BioDME dari lindi hitam. Metanol, bersama-sama dengan turunan dimetil eter (DME), dapat digunakan sebagai: (i) media penyimpanan energi yang mudah; (ii) bahan bakar mudah diangkut dan dibuang untuk mesin pembakaran internal dan compression ignition (Diesel) mesin dengan sedikit perubahan rekayasa; (iii) untuk sel bahan bakar; dan (iv) sebagai bahan baku untuk hidrokarbon sintetis dan produk mereka, termasuk bahan bakar, polimer dan bahkan protein sel tunggal (untuk pakan ternak dan / atau konsumsi manusia). Produksi metanol dan DME adalah pada suhu relatif rendah (dibandingkan dengan produksi hidrogen termokimia), dari 230 sampai 350° C.

16.3 Reaktor Nuklir dan Radioisotop untuk Angkasa

Setelah jeda beberapa tahun, ada kebangkitan kepentingan dalam penggunaan tenaga fisi nuklir untuk misi ruang angkasa. Sementara Rusia telah menggunakan lebih dari 30 reaktor fisi dalam ruang angkasa, Amerika Serikat telah menerbangkan hanya satu - SNAP-10A (Sistem Nuklir Auxiliary Power) pada tahun 1965.

Awalnya, selama kurun waktu 1959-1973 ada program roket nuklir AS, Mesin Nuklir untuk Aplikasi Rocket Vehicle (Nerva), yang berfokus pada tenaga nuklir menggantikan roket kimia untuk tahap terakhir dari peluncuran. Nerva menggunakan reaktor grafit-core pemanasan hidrogen dan membuangnya melalui nozzle. Sebanyak 20 mesin diuji di Nevada dan menghasilkan daya dorong hingga lebih dari setengah dari peluncur pesawat ruang angkasa. Sejak itu, "roket nuklir" telah digunakan sebagai propulsi ruang angkasa, bukan peluncuran. Penerus Nerva hari ini adalah roket termal nuklir (NTR).

Ide awal lainnya adalah Project Orion AS, yang akan meluncurkan pesawat ruang angkasa yang cukup besar,- sekitar 1000 ton, dari bumi menggunakan serangkaian ledakan nuklir kecil untuk mendorong pesawat. Proyek ini dimulai pada tahun 1958 oleh General Atomics dan dibatalkan pada tahun 1963 ketika Atmospheric Test Ban Treaty membuatnya ilegal, tapi kejatuhan radioaktif bisa menjadi masalah besar. Ide Orion masih hidup, sebagai cara lain untuk menghasilkan pulsa pendorong yang masih dipertimbangkan.

PBB memiliki Kantor Outer Space Affairs (UNOOSA) * mengimplementasikan keputusan dari Komite Penggunaan Damai Antariksa (COPUOS) didirikan pada tahun 1959 dan sekarang dengan 71 negara anggota. UNOOSA mengakui "bahwa untuk beberapa misi di luar angkasa sumber tenaga nuklir sangat cocok atau bahkan penting karena kekompakan mereka, umur panjang dan atribut lainnya" dan "bahwa penggunaan sumber tenaga nuklir di luar angkasa harus fokus pada aplikasi tersebut yang mengambil keuntungan sifat tertentu sumber tenaga nuklir. "Ini telah mengadopsi prinsip asset yang berlaku" untuk sumber tenaga nuklir di luar angkasa yang ditujukan untuk menghasilkan tenaga listrik pada benda ruang angkasa, untuk tujuan non-pendorong, "termasuk keduanya sistem radioisotop dan reaktor fisi.

16.3.1 Sistem Radioisotop – RTGS

Sejauh ini, generator termoelektrik radioisotop (RTG) telah menjadi sumber daya utama untuk ruang angkasa AS selama lebih dari 50 tahun, sejak tahun 1961. Tingginya peluruhan panas Plutonium-238 (0.56 W/g) memungkinkan penggunaannya sebagai sumber listrik di RTGS dari pesawat ruang angkasa, satelit, beacon navigasi, dll dan proses peluruhan yang intens alpha dengan radiasi gamma diabaikan untuk perlindungan minimal. Amerisium-241, dengan 0,15 W/g, merupakan sumber energi lain, disukai oleh European Space Agency, meskipun memiliki tingkat relatif tinggi dari radiasi gamma energi rendah. Panas dari bahan

bakar oksida dikonversi menjadi listrik melalui elemen statis termolistrik (solid-state termokopel), dengan tidak adanya bagian yang bergerak. RTGS aman, handal dan bebas perawatan dan dapat menyediakan panas atau listrik selama beberapa dekade di bawah kondisi yang sangat keras, terutama di mana tenaga surya tidak layak.

Pentingnya sumber daya seperti digambarkan oleh misi Badan Antariksa Eropa Rosetta yang berhasil mendaratkan probe Philae pada komet 67P/Churyumov-Gerasimenko pada tahun 2014. Dilengkapi dengan baterai dan panel surya, posisi di mana Philae datang untuk beristirahat di komet permukaan - terlindung dari sinar matahari oleh tebing - berarti bahwa pendarat tidak mampu memanfaatkan energi matahari dan hanya mampu mengirim senilai 64 jam 'data sebelum daya baterai habis. Sejauh ini 45 RTGS telah member daya 25 kendaraan luar angkasa AS termasuk Apollo, Pioneer, Viking, Voyager, Galileo, Ulysses dan New Horizons misi ruang angkasa serta banyak satelit sipil dan militer. Pesawat ruang angkasa Cassini membawa tiga RTG menyediakan 870 watt dari 33 kg plutonium oksida karena mengeksplorasi Saturnus. Ini diluncurkan pada tahun 1997, memasuki orbit Saturnus pada tahun 2004, dan diperkirakan akan berfungsi sampai setidaknya tahun 2017. Voyager pesawat ruang angkasa yang telah mengirimkan gambar dari planet yang jauh telah beroperasi selama lebih dari 35 tahun sejak tahun peluncuran 1977 dan diharapkan untuk mengirim kembali sinyal bertenaga oleh RTG mereka sampai tahun 2025. Galileo, diluncurkan pada tahun 1989, membawa 570-watt RTG. Viking dan Rover pendarat di Mars pada tahun 1975 bergantung pada sumber daya RTG, seperti halnya Mars Science Laboratory Rover diluncurkan pada 2011. Tiga RTGS (masing-masing dengan 2,7 gram plutonium-238 dioksida) yang digunakan sebagai sumber panas pada Pathfinder Mars robot pendarat diluncurkan pada tahun 1996, memproduksi 35 watt. Masing-masing memproduksi sekitar satu watt panas. (Kendaraan penjelajah 10,5 kg Pathfinder pada tahun 1997 dan dua kendaraan penjelajah Mars beroperasi tahun 2004-2009 menggunakan panel surya dan baterai, dengan kekuatan dan kehidupan yang terbatas.). RTG bertenaga plutonium terbaru adalah sistem 290-watt dikenal sebagai GPHS RTG. Tenaga panas untuk sistem ini adalah dari 18 unit General Purpose Sumber Panas (GPHS). Setiap GPHS berisi empat keramik pelet bahan bakar iridium berlapis Pu-238, tinggi 5 cm, luas 10 cm persegi dan berat 1,44 kg. Multi-Mission RTG (MMRTG) menggunakan delapan unit GPHS dengan total 4,8 kg plutonium oksida memproduksi 2 kW thermal yang dapat digunakan untuk menghasilkan sekitar 110 watt daya listrik, 2,7 kWh/hari. Hal ini sedang digunakan di penjelajah besar Mars Science Laboratory, penjelajah Curiosity, yang massanya 890 kg adalah sekitar lima kali massa penjelajah Mars sebelumnya. Satu lagi dijadwalkan akan diluncurkan pada tahun 2020.

Pesawat ruang angkasa New Horizons terbang ke Pluto bulan Juli 2015 memiliki GPHS RTG 250 watt, 30 volt yang akan telah meluruh sekitar 200 watt pada saat yang terbang melintas Pluto (diluncurkan tahun 2006). Menggunakan 10,9 kg Pu-238 oksida dan dirancang kurang kuat dari awalnya, karena penundaan produksi. Ada 16 Aerojet pendorong mengendalikan lintasan dan sikap pesawat yang bermassa 478 kg. Empat dari pendorong menghasilkan 4,4 N, sedangkan 12 menghasilkan 0,9 N gaya dorong. Bahan bakar untuk ini adalah 65 kg hidrazin. Stirling Radioisotop Generator (SRG) didasarkan pada konverter listrik 55 watt didukung oleh satu unit GPHS. Ujung panas dari Stirling converter mencapai 650° C dan helium dipanaskan oleh piston di alternator linier, panas ditolak pada akhir dingin mesin. AC kemudian dikonversi menjadi 55 watt DC. Mesin Stirling ini menghasilkan sekitar empat kali lebih banyak tenaga listrik dari bahan bakar plutonium dari sebuah RTG. Jadi setiap SRG akan memanfaatkan dua unit converter Stirling dengan sekitar 500 watt tenaga panas dipasok oleh dua unit GPHS dan akan memberikan 130-140 watt tenaga listrik dari sekitar 1 kg Pu-238. SRG dan Advanced SRG (ASRG) telah diuji secara luas namun belum diterbangkan.

NASA berencana untuk menggunakan dua ASRGs untuk probe untuk bulan Saturnus, Titan (Titan Mare Explorer - waktu) atau yang ke komet Wirtanen, meskipun misi ini telah ditunda mendukung misi Mars Insight pada tahun 2016. Pada November 2013 NASA mengatakan untuk menghentikan pengembangan ASRG karena keterbatasan anggaran dan fakta bahwa itu cukup Pu-238 untuk MMRTGs. NASA juga mengatakan bahwa produksi Pu-238 sedang menggenjot produksinya hingga 1,5 kg/tahun, meskipun ini belum menjadi jelas. Sejak tahun 1990-an Amerika Serikat telah mengandalkan pasokan Rusia Pu-238 diproduksi di Mayak, dan telah membeli 16,5 kg itu. Namun, Rusia tidak lagi memproduksi atau menjual itu. Rusia telah mengembangkan RTGS menggunakan Po-210, dua masih di orbit satelit navigasi Cosmos pada tahun 1965. Tetapi berkonsentrasi pada reaktor fisi untuk sistem tenaga listrik ruang angkasa. Chang'e 3 pendarat bulan China tampaknya menggunakan RTGS dengan Pu-238. Americium-241 dapat digunakan untuk RTGS. Ini memiliki sekitar seperempat dari energi dari Pu-238, tetapi lebih murah dan tersedia dari saham plutonium sipil di Inggris. Ini juga memiliki usia paruh 432 tahun, bukan 88 tahun. Namun ia memiliki aktivitas gamma jauh lebih tinggi (8,48 mSv/jam/MBq) dan telah diabaikan karena alasan tersebut. Namun European Space Agency berencana untuk menggunakannya dan membeli Am-241 dari plutonium sipil Inggris yang dihasilkan oleh Laboratorium Nuklir Nasional yang akan digunakan untuk RTGS-nya. Badan ini berencana untuk menggunakannya dan membeli Am-241 dari plutonium sipil Inggris yang dihasilkan oleh Laboratorium Nuklir Nasional yang akan digunakan untuk RTGS-nya.

Seperti RTGS, Radioaktif Heater Unit (RHUs) digunakan pada satelit dan pesawat ruang angkasa untuk menjaga instrumen cukup hangat untuk berfungsi secara efisien. Hasilnya hanya sekitar satu watt dan mereka kebanyakan menggunakan Pu-238 - biasanya sekitar 2.7g. Dimensinya sekitar 3 cm panjang dan diameter 2,5 cm, dengan berat 40 gram. Sekitar 240 telah digunakan sejauh ini oleh Amerika Serikat dan dua berada di shut-down Rusia Lunar Rovers di bulan. Delapan dipasang pada masing-masing US Mars Rovers Spirit dan Opportunity, yang mendarat pada tahun 2004, untuk menjaga baterai fungsional. Penjelajah bulan China Yutu Chang'e 3 ternyata menggunakan beberapa RHUs.

Idaho National Laboratory (INL) Pusat untuk Ruang Angkasa Penelitian Nuklir (CSNR) bekerja sama dengan NASA sedang mengembangkan sebuah kendaraan gerbong bertenaga RTG untuk eksplorasi Mars. Ketika stasioner kendaraan akan mempelajari daerah sekitar sambil perlahan menghisap karbon dioksida dari atmosfer dan pembekuan itu, setelah kompresi oleh mesin Stirling. Sementara itu inti berilium akan menyimpan energi panas yang dibutuhkan untuk penguapan bahan peledak yang dibutuhkan untuk gerbong berikutnya. Ketika siap untuk gerbong berikutnya, panas nuklir dengan cepat akan menguapkan karbon dioksida, menciptakan jet kuat untuk mendorong pesawat hingga 1000 meter ke dalam 'udara'. Sebuah gerbong kecil bisa menutupi 15 km pada satu waktu, mengulangi ini setiap beberapa hari selama sepuluh tahun. Gerbong bisa membawa muatan sampai 200 kg dan mengeksplorasi wilayah yang tidak terjangkau dengan Rovers. INL menunjukkan bahwa beberapa lusin gerbong bisa memetakan permukaan Mars dalam beberapa tahun, dan mungkin menyampaikan sampel batuan dari seluruh permukaan Mars untuk pesawat yang akan membawa mereka ke Bumi.

Keduanya RTGS dan RHUs dirancang untuk bertahan hidup peluncuran utama dan masuk kembali utuh, seperti SRG tersebut.

16.3.2 Sistem Fisi – Panas

Untuk kebutuhan daya yang lebih tinggi, sistem fisi memiliki keuntungan biaya yang berbeda atas RTGs. SNAP-10A AS diluncurkan pada tahun 1965 adalah reaktor fisi nuklir termal 45 KWT untuk menghasilkan 650 watt dengan moderator ZRH (atau bahan bakar UZrH) dan eutektik pendingin NaK dengan panel converter termolistrik. Reaktor beroperasi

selama 43 hari dan menghasilkan 590 watt, namun ditutup karena tegangan regulator (tidak reaktor) mengalami kerusakan. Reaktor tetap di orbit. Inisiatif reaktor ruang angkasa AS terakhir adalah program bersama NASA-DOE-Departemen Pertahanan mengembangkan unit reactor cepat SP-100 - 2 MWt reaktor dan sistem termolistrik memberikan hingga 100 kWe sebagai power supply multi guna untuk mengorbit misi atau sebagai pembangkit listrik lunar/ permukaan Martian. Ini telah dihentikan pada awal 1990-an setelah menyerap hampir \$ 1 miliar. Reaktor yang digunakan mempunyai bahan bakar nitrida uranium dan berpendingin lithium.

Ada juga konsep reaktor Timberwind di bawah program listrik ruang angkasa Departemen Pertahanan Multi-Megawatt (MMW) selama tahun 1980-an, bekerja sama dengan DOE. Ini memiliki kebutuhan daya di luar program ruang angkasa sipil. Antara tahun 1967 dan 1988 bekas Uni Soviet meluncurkan 31 reaktor fisi bertenaga rendah di Radar Samudera Reconnaissance Satelit (RORSATs) dari misi Cosmos. Mereka menggunakan konverter termolistrik untuk menghasilkan listrik, seperti dengan RTGs. Reaktor Romashka yang sumber tenaga nuklir awal mereka, reaktor grafit spektrum cepat dengan 90% bahan bakar uranium karbida diperkaya beroperasi pada suhu tinggi. Kemudian reaktor cepat Bouk menghasilkan 3 kW sampai dengan 4 bulan. Kemudian reaktor, seperti pada Cosmos-954 yang kembali masuk atas Kanada pada tahun 1978, memiliki batang bahan bakar U-Mo dan layout yang mirip dengan reaktor heatpipe US dijelaskan di bawah.

Ini diikuti oleh reaktor Topaz dengan sistem konversi termionik, menghasilkan sekitar 5 kWe listrik untuk penggunaan di atas pesawat. Ini adalah ide US dikembangkan selama tahun 1960-an di Rusia. Dalam Topaz-2 masing-masing pin bahan bakar (96% diperkaya UO₂) dilapisi emitor dikelilingi oleh kolektor dan ini membentuk 37 elemen bakar yang menembus silinder moderator ZRH. Hal ini pada gilirannya dikelilingi oleh reflektor berilium neutron dengan 12 drum kontrol berputar di dalamnya. NaK pendingin mengelilingi setiap elemen bakar. Topaz-1 diterbangkan pada tahun 1987 di Cosmos 1818 & 1867. Itu mampu memberikan daya untuk 3-5 tahun untuk pengawasan laut. Kemudian Topaz bertujuan untuk menghasilkan daya 40 kWe melalui proyek internasional yang dilakukan sebagian besar di Amerika Serikat dari tahun 1990. Dua reaktor Topaz-2 (tanpa bahan bakar) dijual ke Amerika Serikat pada tahun 1992. Pembatasan anggaran tahun 1993 yang memaksa pembatalan dari Program Uji Penerbangan Ruang Angkasa Propulsion Listrik Nuklir terkait dengan hal ini.

Pengembangan fisi kecil sistem tenaga permukaan untuk bulan dan Mars diumumkan oleh NASA pada tahun 2008. Sistem 40 kWe bisa memanfaatkan salah satu dari dua konsep desain untuk konversi daya: Pertama, oleh Sunpower Inc., dari Athens, Ohio, menggunakan dua mesin piston berlawanan digabungkan dengan alternator yang menghasilkan 6 kilowatt masing-masing, atau total 12 kilowatt listrik. Kedua, oleh Barber Nichols Inc. dari Arvada, Colorado, adalah untuk pengembangan mesin siklus tertutup Brayton yang menggunakan turbin kecepatan tinggi dan kompresor digabungkan dengan alternator berputar yang juga menghasilkan 12 kilowatt listrik. NASA sendiri akan mengembangkan sistem pembuangan panas dan menyediakan fasilitas simulasi ruang angkasa. Pada pertengahan tahun 2012 NASA melaporkan tes sukses konversi daya dan komponen radiator sistem 40 kWe ini, yang didasarkan pada reaktor fisi kecil panas dan sirkulasi campuran pendingin logam cair natrium dan kalium. Perbedaan panas antara ini dan suhu luar akan mendorong dua mesin pelengkap Stirling untuk menghidupkan generator 40 kWe. Radiator 100 meter persegi akan memberikan proses panas ke ruang angkasa.

Pada Desember 2014 Glenn Pusat NASA mengumumkan kemajuan dengan proyek 4 KWT/1 kWe KiloPower, menggunakan uranium diperkaya konsentrasi tinggi sistem daya heatpipe dan mesin Stirling untuk menghasilkan listrik. NASA mengajukan banding ke Administrasi Keamanan Nuklir Nasional AS (NNSA) untuk membiarkannya melanjutkan.

Berikut sukses pembuktian konsep dilakukan pengujian di situs Keamanan Nasional Nevada NNSA tahun 2012 bekerja sama dengan NASA, percobaan kritis menggunakan inti yang dijadwalkan akan dilakukan pada tahun fiskal 2017 di bawah Departemen Program Keselamatan Kekritisitas Energi bekerja sama dengan NASA. Bahan bakar yang optimal untuk reaktor akan menjadi paduan HEU dengan 7% molibdenum. Sebuah reflektor berilium oksida akan mengelilingi ini, dengan delapan pipa panas antara bahan bakar dan reflektor.

16.3.3 Sistem Fisi - Ruang Propulsi

Untuk propulsi pesawat ruang angkasa, setelah diluncurkan, beberapa pengalaman telah diperoleh dengan sistem propulsi nuklir termal (NTR) yang dikatakan berkembang dengan baik dan terbukti. Fisi nuklir memanaskan propelan hidrogen yang disimpan sebagai cairan dalam tangki yang didinginkan. Gas panas (sekitar 2500°C) dikeluarkan melalui nozzle untuk memberikan dorongan (yang dapat ditambah dengan suntikan oksigen cair ke dalam knalpot hidrogen supersonik). Ini lebih efisien daripada reaksi kimia. versi bimodal akan menjalankan sistem listrik di dalam pesawat ruang angkasa, termasuk radar yang kuat, serta menyediakan propulsi. Dibandingkan dengan sistem plasma listrik nuklir, ini memiliki lebih banyak gaya dorong untuk jangka pendek dan dapat digunakan untuk peluncuran dan pendaratan. Namun, perhatian kini beralih ke sistem listrik nuklir, di mana reaktor nuklir adalah sumber panas untuk drive ion listrik membuang plasma dari nozzle untuk mendorong pesawat ruang angkasa ketika sudah di ruang angkasa. Sel magnetik superkonduktor mengionisasi xenon (atau hidrogen), memanaskan sampai suhu sangat tinggi (jutaan $^{\circ}\text{C}$), dan menggunakan tegangan yang sangat tinggi untuk mempercepat dan mendorongnya dengan kecepatan yang sangat tinggi (misalnya 30 km/s) untuk memberikan dorongan. Sementara dorong yang sangat kecil relatif terhadap roket, penerapannya dalam ruang angkasa dalam jangka panjang (misal dalam tahun) dapat menyebabkan kecepatan tinggi pesawat ruang angkasa.

Pesawat ruang angkasa NASA Dawn yang beroperasi antara Mars dan Jupiter sejak tahun 2007 menggunakan pendorong ion, seperti yang dilakukan lebih dari 100 satelit komunikasi orbit geosynchronous Bumi. Kedua planet memperpanjang hidup operasi satelit dan mengurangi peluncuran dan biaya operasi. Xenon digunakan karena mudah terionisasi dan memiliki massa atom relatif tinggi, serta menjadi lambat dan memiliki kepadatan penyimpanan yang tinggi. Pesawat misi ruang angkasa pertama NASA dengan pendorong ion adalah dari tahun diluncurkan dari tahun 1998 sampai 2001. Sistem propulsi ion Solar Technology Application Readiness NASA (NSTAR) mengaktifkan misi Deep Space 1, pesawat ruang angkasa pertama didorong terutama oleh propulsi ion, melakukan perjalanan lebih dari 260 juta kilometer dan membuat penerbangan dari asteroid Braille dan komet Borelly. NASA Evolusioner Xenon Thruster (NEXT) dan annular Mesin merupakan pengembangan dari program ini. NEXT adalah sistem propulsi ion berdaya tinggi yang dirancang untuk mengurangi biaya misi dan waktu perjalanan, beroperasi pada kondisi tiga kali tingkat kekuatan NSTAR. Annular Engine NASA dipatenkan memiliki potensi untuk melebihi kemampuan kinerja NEXT dan desain pendorong penggerak listrik lainnya, dengan luas berkas keseluruhan (annular) dua kali lebih besar.

Penelitian untuk satu versi, Variable Specific Impulse Magnetoplasma Rocket (VASIMR) mengacu pada bahwa untuk tenaga fusi magnetis-terbatas (tokamak) untuk pembangkit listrik, tapi di sini plasma sengaja dibocorkan untuk memberikan dorongan. Sistem ini bekerja paling efisien pada dorongan rendah (yang bisa dipertahankan), dengan aliran plasma kecil, tapi operasi dorongan tinggi lebih pendek adalah mungkin. Hal ini sangat efisien, dengan konversi 99% dari listrik menjadi energi kinetik, meskipun hanya 70% diklaim untuk pembakaran dorongan pendek. Sebuah versi 200kW, VX200, sedang diuji pada tahun 2015 dengan tujuan untuk penyebaran misi ruangangkasa untuk propulsi listrik

nuklir. Hal ini juga dapat digunakan untuk menghilangkan puing-puing ruang angkasa, mendorong ke orbit rendah untuk pembakaran.

Reaktor Heatpipe Power System (HPS) adalah reaktor cepat kompak memproduksi hingga 100 kWe selama sepuluh tahun untuk daya pesawat ruang angkasa atau kendaraan permukaan planet. Reaktor telah dikembangkan sejak tahun 1994 di Los Alamos National Laboratory sebagai sistem risiko teknis yang kuat dan rendah dengan penekanan pada keandalan yang tinggi dan keamanan. Mereka menggunakan pipa panas untuk mentransfer energi dari inti reaktor untuk menghasilkan listrik menggunakan siklus konverter Stirling atau Brayton. Pipa panas adalah perangkat perpindahan panas dengan menggabungkan konduktivitas termal dengan perubahan fasa. Pada akhir panas cairan vapourises dibawah tekanan rendah dan di ujung lain mengembun, melepaskan panas laten dari penguapan. Cairan tersebut kemudian kembali ke ujung panas, baik oleh gravitasi ataupun sifat kapiler, untuk mengulangi siklus. (Jika menggunakan gravitasi, mereka kadang-kadang disebut thermosiphons dua fase, tapi sistem kapiler 'memompa' menggunakan tegangan permukaan adalah mekanisme utama yang digunakan.)

Energi dari fisi dirambatkan dari pin bahan bakar ke pipa panas yang diisi dengan uap natrium yang membawanya ke penukar panas dan dari situ ke sistem konversi daya dalam gas panas untuk menghasilkan listrik. Komposisi gas adalah 72% helium dan 28% xenon. Reaktor itu sendiri mengandung sejumlah modul pipa panas dengan bahan bakar. Setiap modul memiliki pipa panas yang berada di pusat dengan rhenium lengan bahan bakar diatur di sekitarnya. Modul-modul tersebut memiliki diameter yang sama dan mengandung 97% bahan bakar uranium nitrida diperkaya, semua dalam cladding modul. Modul membentuk heksagonal inti kompak. Kontrol adalah dengan enam berilium drum stainless steel berlapis masing-masing berdiameter 11 atau 13 cm dengan boron karbida membentuk busur 120 derajat pada setiap. Drum sesuai dalam enam bagian dari reflektor radial neutron berilium sekitar inti, dan memutar untuk efek kontrol, memindahkan boron karbida kedalam atau keluar. Perisai tergantung pada misi atau aplikasi, namun lithium hidrida dalam kaleng stainless steel adalah perisai neutron utama.

Reaktor fisi ruang angkasa SAFE-400 (Safe Affordable Fission Engine) adalah HPS 400 KWt memproduksi 100 kWe untuk daya kendaraan ruang angkasa yang menggunakan dua sistem tenaga Brayton, berupa turbin gas didorong langsung oleh gas panas dari reaktor. Temperatur keluar penukar panas adalah 880° C. Reaktor memiliki 127 modul pipa panas identik terbuat dari molibdenum, atau niobium dengan 1% zirkonium. Masing-masing memiliki tiga pin bahan bakar diameter 1 cm, bersama-sama masuk ke inti heksagonal kompak penampang 25 cm. Pin bahan bakar panjang 70 cm (panjang yang berisi bahan bakar adalah 56 cm), panjang total pipa panas adalah 145 cm, diperpanjang 75 cm di atas inti, di mana mereka digabungkan dengan penukar panas. Inti dengan reflektor memiliki diameter 51 cm. Massa inti adalah sekitar 512 kg dan masing-masing massa penukar panas adalah 72 kg. SAFE juga telah diuji dengan penggerak ion listrik. Sebuah versi yang lebih kecil dari jenis reaktor adalah HOMER-15, Heatpipe-Operated Mars Exploration Reactor. Ini adalah sebuah unit termal 15 kW mirip dengan model SAFE yang lebih besar, dan berdiri tegak 2,4 meter termasuk penukar panas dan 3 mesin kWe Stirling. Beroperasi hanya pada temperatur 600 ° C dan karena itu dapat menggunakan stainless steel untuk pin bahan bakar dan pipa panas, yang berdiameter 1,6 cm. Ini memiliki 19 modul natrium pipa panas dengan 102 pin bahan bakar yang terikat pada modul, 4 atau 6 per pipa, dan memiliki total 72 kg bahan bakar. Pipa panas panjang 106 cm dan tinggi bahan bakar 36 cm. Inti adalah heksagonal (diameter 18 cm) dengan enam pin Beo di sudut-sudut. Massa total sistem reaktor adalah 214 kg, dan diameter 41 cm. Tabel 16.2 menunjukkan karakteristik untuk setiap Sistem Daya Reaktor Ruang Angkasa.

Tabel 16.2 Sistem Daya Reaktor Ruang Angkasa

Jenis Reaktor	SNAP-10 AS	SP-100 AS	Romashka Russia	Bouk Russia	Topaz-1 Russia	Topaz-2 Russia-AS	SAFE-400 AS
Tahun	1965	1992	1967	1977	1987	1992	2007?
kWt	45.5	2000	40	<100	150	135	400
kWe	0.65	100	0.8	<5	5-10	6	100
Konverter	termolistrik	termolistrik	termolistrik	termolistrik	termoionik	termoionik	termolistrik
Bahan bakar	U-ZrH _x	UN	UC ₂	U-Mo	UO ₂	UO ₂	UN
Mass reaktor ((kg)	435	5422	455	<390	320	1061	512
Spektrum neutron	termal	cepat	cepat	cepat	termal	termal/epitermal	cepat
Kontrol	Be	Be	Be	Be	Be	Be	Be
Pendingin	NaK	Li	none	NaK	NaK	NaK	Na
Temperatur inti max (°C)	585	1377	1900	?	1600	1900?	1020

Pada 1980-an program ERATO Perancis mempertimbangkan tiga sistem turbolistrik tenaga 20 kWe untuk ruang angkasa. Semua menggunakan siklus converter Brayton dengan campuran helium-xenon sebagai fluida kerja. Sistem pertama adalah reaktor cepat yang berbahan bakar UO₂ berpendingin natrium beroperasi pada 670° C, kedua adalah reaktor berpendingin gas (spektrum neutron termal atau epitermal) bersuhu tinggi yang bekerja pada 840 ° C, yang ketiga reaktor cepat berpendingin lithium berbahan bakar UN bekerja pada suhu 1150° C.

Pada tahun 2010 Komisi Presidensial Rusia pada Modernisasi dan Teknologi Pengembangan Ekonomi Rusia mengalokasikan dana federal untuk merancang unit propulsi listrik tenaga nuklir (NPPU) di rentang daya megawatt, mampu memberi daya pada jarak jauh misi antarplanet. Secara khusus, SC Rosatom adalah untuk mendapatkan RUR 430 juta dan Roskosmos (Federal Space Agency Rusia) RUR 70 juta untuk mengembangkan Transportasi dan Modul Energi berdasarkan NPPU, meskipun dilaporkan bahwa Roskosmos tidak termasuk proyek dalam anggaran program ruang angkasanya untuk 2016-2025. NA Dollezhal NIKIET (Research & Development Institute for Power Engineering) di Moskow ditunjuk sebagai kontraktor tunggal untuk NPPU, berdasarkan perkembangan sebelumnya termasuk mesin roket nuklir. Pada bulan November 2015 NIKIET melaporkan bahwa desain rekayasa reaktor itu selesai, dan telah dilakukan tes "konfirmasi integritas bejana reaktor" dan diperiksa untuk kebocoran dan deformasi. Tes juga telah memvalidasi "keandalan perhitungan desain" untuk menentukan kemampuan kapal untuk menahan stres. Prototipe propulsi Reaktor untuk aplikasi ruang angkasa diharapkan akan siap pada tahun 2018. Total biaya proyek dari penggerak dan kekuatan modul berdasarkan reaktor propulsi diperkirakan RUR 17 miliar (US \$ 266 juta) dengan bagian reaktor itu RUR 7 miliar.

Korporasi Roket S.P.Korolyov dan Energi Ruang Angkasa Rusia mulai bekerja pada tahun 2011 pada modul ruang angkasa standar dengan sistem propulsi bertenaga nuklir, awalnya melibatkan 150 sampai 500 sistem kilowatt. Sebuah desain konseptual pada tahun

2011 menyebabkan dokumentasi desain dasar dan desain rekayasa. Ide sekarang sedang dikejar oleh Keldysh Pusat Penelitian Rusia adalah kapal roket dengan menggunakan reaktor fisi kecil berpendingin gas untuk mengubah turbin dan generator set dan dengan demikian menghasilkan listrik untuk mendorong plasma. Unit reaktor harus dikembangkan sekitar tahun 2015, maka tes layanan hidup yang direncanakan untuk 2018. Peluncuran pertama, yang dipertimbangkan untuk sekitar 2.020. Direktur Roskosmos mengatakan bahwa pengembangan sistem tenaga ruang angkasa nuklir untuk pesawat ruang angkasa kelas megawatt berawak sangat penting jika Rusia ingin mempertahankan keunggulan kompetitif dalam perlombaan ruang angkasa, termasuk eksplorasi bulan dan Mars. Proyek ini akan membutuhkan dana dari beberapa RUR 17 miliar (\$ 540.000.000). Energia sebelumnya mengatakan bahwa pihaknya siap untuk merancang sebuah stasiun tenaga nuklir berbasis ruang angkasa dengan masa kerja 10-15 tahun, untuk awalnya ditempatkan di bulan atau Mars. Hal ini juga bekerja pada sebuah konsep peluncuran ruang angkasa bertenaga nuklir, yang dapat digunakan untuk meluncurkan satelit.

16.3.4 Proyek Prometheus 2003

Pada tahun 2002 NASA mengumumkan Sistem Inisiatif Nuklir yang untuk proyek-proyek ruang angkasa, dan pada tahun 2003 ini berganti nama menjadi Project Prometheus dan diberi peningkatan pendanaan. Tujuannya adalah untuk memungkinkan perubahan langkah besar dalam kemampuan misi ruang angkasa. Penjelajahan ruang angkasa bertenaga nuklir mungkin akan jauh lebih cepat daripada sekarang, dan akan memungkinkan misi berawak ke Mars. Salah satu bagian dari Prometheus, yang merupakan proyek NASA dengan keterlibatan substansial oleh DOE di daerah nuklir, adalah untuk mengembangkan Multi-Misi Generator Termolistrik dan Generator Stirling Radioisotop dijelaskan di bagian RTG atas. Sebuah tujuan yang lebih radikal dari Prometheus adalah untuk menghasilkan sistem reaktor fisi ruang angkasa seperti yang dijelaskan di atas untuk keduanya daya dan propulsi yang akan aman untuk memulai dan yang akan beroperasi selama bertahun-tahun dengan kekuatan yang lebih besar daripada RTGS. Kekuatan 100 kW ini dipertimbangkan untuk sistem propulsi listrik nuklir didorong oleh plasma.

Proposal anggaran TA 2004 adalah \$ 279 juta dengan \$ 3 miliar akan dihabiskan lebih dari lima tahun. Ini terdiri dari \$ 186 juta (\$ 1 miliar selama 5 tahun) membangun alokasi TA 2.003 ditambah \$ 93 juta (\$ 2 miliar selama lima tahun) terhadap misi penerbangan pertama ke Jupiter, Jupiter Icy Bulan Orbiter, diharapkan untuk dimulai tahun 2017 dan mengeksplorasi untuk dasawarsa. Namun, Project Prometheus hanya menerima \$ 430 juta dalam anggaran tahun 2005 dan ini menyusut sebesar \$ 100 juta pada tahun 2006, yang sebagian besar adalah untuk mengimbangi pembatalan kontrak, sehingga efektif tertahan..

Pada tahun 2003 Project Prometheus berhasil menguji mesin ion High Power Electric Propulsion (HiPEP). Mesin ini beroperasi dengan ionisasi xenon dengan oven microwave. Pada bagian belakang mesin adalah sepasang grid logam persegi panjang yang dimuati dengan 6.000 volt potensial listrik. Kekuatan medan listrik ini memberikan sebuah gaya tarik elektrostatis yang kuat pada ion xenon, mempercepat mereka dan menghasilkan dorongan yang mendorong pesawat ruang angkasa. Tes itu sampai dengan 12 kW, meskipun dua kali yang dibayangkan. Pendorong ini dirancang untuk umur hidup 7 sampai 10 tahun dengan efisiensi bahan bakar yang tinggi, dan akan didukung oleh reaktor nuklir kecil.

16.3.5 Radiasi Di Ruang Angkasa

Misi ruang angkasa tahun 2011-12 bantalan Mars Science Laboratory – Penjelajah Curiosity, radiasi diukur dalam perjalanan. Pesawat ruang angkasa itu terkena rata-rata 1,8 mSv/hari nya perjalanan 36 minggu ke Mars. Ini berarti bahwa astronot akan terkena sekitar 660 mSv pada perjalanan pulang. Dua bentuk radiasi menimbulkan risiko kesehatan potensial untuk astronot

di luar angkasa. Salah satunya adalah galaksi kosmik sinar (GCRS), partikel yang disebabkan oleh ledakan supernova dan kejadian energi tinggi lain di luar tata surya. Yang lain, yang kurang jadi perhatian, adalah partikel energik surya (SEP) terkait dengan flare matahari dan pelepasan massa coronal dari matahari. Salah satu cara untuk mengurangi eksposur awak yang akan menggunakan propulsi nuklir, adalah mengurangi waktu transit. Dosis radiasi di Stasiun Antariksa Internasional yang mengorbit Bumi adalah sekitar 100 mSv selama enam bulan.

16.4 Radioisotop Dalam Industri

Teknik nuklir semakin meningkat digunakan dalam ilmu pengetahuan, industri dan pengelolaan lingkungan. Analisis terus menerus dan respon cepat dari teknik nuklir, banyak melibatkan radioisotope, berarti bahwa aliran handal dan data analitik dapat terus-menerus tersedia. Hal ini menghasilkan penurunan biaya yang sejalan dengan peningkatan kualitas produk.

16.4.1 Teknik Analisis Neutron

Neutron dari reaktor riset dapat berinteraksi dengan atom dalam sampel menyebabkan emisi sinar gamma yang, jika dianalisis untuk karakteristik dan intensitas energi, akan dapat digunakan untuk mengidentifikasi jenis dan jumlah elemen yang ada. Dua teknik utama adalah Tangkapan Neutron Termal (TNT) dan Hamburan Inelastik Neutron (HIN). TNT terjadi segera setelah neutron rendah energi diserap oleh inti, sementara HIN berlangsung seketika saat sebuah neutron cepat bertabrakan dengan inti. Kebanyakan analisa komersial menggunakan sumber neutron californium-252 bersama-sama dengan detektor natrium iodida yang pada umumnya peka terhadap reaksi TNT. Penggunaan lainnya sumber Am-Be-241 dan detektor germanate bismuth, yang dapat digunakan baik TNT maupun HIN. Reaksi HIN sangat berguna untuk elemen seperti C, O, Al dan Si yang memiliki penampang tangkapan terhadap neutron yang rendah. Peralatan tersebut digunakan untuk berbagai analisis secara langsung dan lengkap di industri semen, mineral dan batubara.

Sebuah aplikasi tertentu HIN adalah di mana probe yang mengandung sumber neutron dapat diturunkan ke dalam lubang bor di mana radiasi tersebar oleh tabrakan dengan tanah sekitarnya. Karena hidrogen (komponen utama air) adalah merupakan sejauh ini sebagai penghambur atom terbaik, jumlah neutron yang kembali ke detektor di probe adalah fungsi dari kepadatan air dalam tanah.

Untuk mengukur kepadatan tanah dan kadar air, perangkat portabel dengan kombinasi amerisium-241-berilium menghasilkan sinar gamma dan neutron yang melewati sampel tanah untuk detektor. (neutron dihasilkan dari partikel alpha yang berinteraksi dengan Be-9.) Sebuah aplikasi yang lebih canggih dari ini adalah pada logging sumur bor.

16.4.2 Teknik Analisis Sinar Gamma dan Sinar X

Transmisi atau hamburan Sinar Gamma dapat digunakan untuk menentukan kadar abu batubara yang terdapat pada ban berjalan. Interaksi sinar gamma bergantung pada nomor atom, dan abu lebih tinggi pada nomor atom dari materi yang mudah terbakar oleh batubara. Juga spektrum energi gamma yang mengalami hamburan inelastik dari batubara dapat yang diukur (Compton analisis profil) menunjukkan kadar abu. Sinar-X dari unsur radioaktif dapat menghasilkan sinar X fluorescent dari bahan yang tidak radioaktif lainnya. Energi dari sinar X fluorescent yang dipancarkan dapat mengidentifikasi elemen yang ada dalam material, dan intensitas mereka dapat menunjukkan jumlah masing-masing elemen yang ada. Teknik ini digunakan untuk menentukan konsentrasi elemen dalam proses aliran konsentrator mineral. Probe yang mengandung radioisotop dan detektor ditenamkan langsung ke dalam aliran mineral. Sinyal dari probe diproses untuk memberikan konsentrasi unsur-unsur yang

dipantau, dan dapat memberikan ukuran kerapatan aliran. Elemen yang terdeteksi dengan cara ini termasuk besi, nikel, tembaga, seng, timah dan timah. Difraksi sinar-X (XRD) adalah teknik lebih lanjut untuk analisis selanjutnya tapi tidak menggunakan radioisotop.

16.4.3 Radiografi Gamma

Gamma radiografi bekerja dalam banyak cara yang sama seperti layar sinar-X yang dilakukan terhadap bagasi di bandara. Alih-alih mesin besar yang diperlukan untuk menghasilkan sinar-X, semua yang diperlukan untuk menghasilkan sinar gamma yang efektif adalah pelet kecil bahan radioaktif dalam titanium kapsul tertutup.

Kapsul ditempatkan pada salah satu sisi objek yang sedang diputar, dan beberapa film fotografi ditempatkan di sisi lain. Sinar gamma, seperti Sinar-X, melewati objek dan membuat gambar pada film. Sama seperti Sinar-X menunjukkan patahan di tulang, sinar gamma menunjukkan kelemahan dalam coran logam atau sambungan yang dilas. Teknik ini memungkinkan komponen-komponen penting yang harus diperiksa untuk cacat internal tanpa kerusakan.

Sumber gamma biasanya lebih portabel daripada peralatan Sinar-X sehingga memiliki keunggulan yang jelas dalam aplikasi tertentu, seperti di daerah terpencil. Juga sementara sumber Sinar-X memancarkan pita lebar radiasi, sumber gamma memancarkan sering beberapa panjang gelombang diskrit. Sumber Sinar gamma memancarkan energi yang jauh lebih tinggi daripada semua tapi yang paling mahal adalah peralatan Sinar-X, dan karenanya memiliki keuntungan untuk banyak radiografi. Bahan yang dilas dibuat dalam sebuah pipa minyak atau gas, film khusus ditempelkan di atas las di sekitar bagian luar pipa. Sebuah mesin yang disebut 'pipa crawler' membawa sumber radioaktif terlindung bawah bagian dalam pipa untuk posisi las. Disana sebuah sumber radioaktif ditempatkan jarak jauh, dan gambar radiografi dari bahan yang dilas diproduksi pada film. Film ini kemudian dikembangkan dan diperiksa untuk tanda-tanda kelemahan dalam melas.

Set atau peralatan Sinar-X dapat digunakan saat listrik tersedia dan objek yang akan dirontgen dapat diambil untuk sumber Sinar-X dan diradiografi. Radioisotop memiliki keuntungan tertinggi dalam bahwa mereka dapat dibawa ke situs ketika pemeriksaan diperlukan, dan tidak ada daya yang dibutuhkan. Namun, mereka tidak bisa hanya dimatikan, sehingga harus dilindungi dengan baik saat digunakan dan pada waktu lain. Pengujian non-destruktif merupakan perpanjangan dari radiografi gamma, digunakan pada berbagai produk dan bahan. Misalnya, tes baja ytterbium-169 hingga ketebalan 15 mm dan paduan logam alloy ringan sampai 45 mm, sedangkan iridium-192 digunakan pada baja ketebalan 12-60 mm l dan paduan logam alloy ringan 190 mm.

16.4.4 Pengukur

Radiasi yang berasal dari radioisotop intensitasnya berkurang jika ditempatkan antara sumber radioaktif dan detektor. Detektor digunakan untuk mengukur pengurangan ini. Prinsip ini dapat digunakan untuk mengukur ada atau tidaknya, atau bahkan untuk mengukur kuantitas atau kepadatan, bahan yang ditempatkan antara sumber dan detektor. Keuntungan dalam menggunakan bentuk penaksiran atau pengukuran adalah bahwa tidak ada kontak dengan bahan yang diukur. Banyak industri proses memanfaatkan alat pengukur untuk memantau dan mengendalikan aliran material dalam pipa, kolom distilasi, dll, biasanya dengan sinar gamma. Ketinggian batubara pada suatu gerbong dapat ditentukan dengan menempatkan sumber gamma energi tinggi pada berbagai ketinggian sepanjang satu sisi dengan fokus kolimator mengarahkan balok seluruh beban. Detektor ditempatkan berlawanan sumber menghalangi berkas sinar dan karenanya dapat menentukan tingkat ketinggian batubara dalam gerbong. Pengukur tingkat tersebut antara penggunaan industri yang paling umum dari radioisotop. Beberapa mesin yang memproduksi plastik menggunakan film

mengukur radioisotop dengan partikel beta untuk mengukur ketebalan film plastik. Film ini berjalan pada kecepatan tinggi antara sumber radioaktif dan detektor. Kekuatan sinyal detektor digunakan untuk mengontrol ketebalan film plastik. Dalam pembuatan kertas, alat pengukur beta digunakan untuk memantau ketebalan kertas dengan kecepatan hingga 400 m/s. Ketika intensitas radiasi dari radioisotop sedang berkurang oleh materi dalam berkas, beberapa radiasi tersebar kembali ke sumber radiasi. Jumlah radiasi 'backscattered' berhubungan dengan jumlah bahan dalam berkas, dan ini dapat digunakan untuk mengukur karakteristik material. Prinsip ini digunakan untuk mengukur berbagai jenis ketebalan lapisan.

16.4.5 Sterilisasi Gamma

Radiasi sinar gamma banyak digunakan untuk mensterilkan produk medis, untuk produk lainnya seperti wol, dan untuk makanan. Membunuh bakteri dan tidak merusak kemasan. Cobalt-60 adalah isotop utama yang digunakan, karena merupakan emitor gamma energik. Hal ini dihasilkan dalam reaktor nuklir, kadang-kadang sebagai produk sampingan dari pembangkit listrik. Fasilitas iradiasi skala besar untuk sterilisasi gamma digunakan untuk persediaan medis sekali pakai seperti jarum suntik, sarung tangan, pakaian dan alat-alat, banyak yang akan rusak oleh sterilisasi panas. Fasilitas tersebut juga memproses produk massal seperti wol mentah untuk ekspor dari Australia, dokumen arsip dan bahkan kayu, untuk membunuh parasit. Saat ANSTO di Australia melakukan sterilisasi hingga 25 juta buah Queensland terhadap kepompong lalat per minggu untuk Pertanian NSW dengan iradiasi gamma. Iradiator gamma yang lebih kecil digunakan untuk mengobati darah untuk transfusi dan untuk aplikasi medis lainnya. Mereka sering menggunakan cesium-137, dengan sinar gamma sekitar setengah energik kobalt ini. Pengawetan makanan adalah sebuah aplikasi yang semakin penting, dan telah digunakan sejak tahun 1960-an. Pada tahun 1997 iradiasi daging merah telah disetujui di Amerika Serikat. Beberapa 41 negara telah menyetujui iradiasi lebih dari 220 makanan yang berbeda, untuk memperpanjang umur simpan dan untuk mengurangi risiko penyakit yang ditularkan melalui makanan.

16.4.6 Penggunaan Pelacak Secara Ilmiah

Radioisotop digunakan sebagai pelacak di banyak bidang penelitian. Kebanyakan sistem fisika, kimia dan biologi memperlakukan bentuk radioaktif dan non-radioaktif dari unsur dengan cara yang persis sama, sehingga sistem dapat diselidiki dengan jaminan bahwa metode yang digunakan untuk penyelidikan sendiri tidak mempengaruhi sistem. Berbagai bahan kimia organik dapat diproduksi dengan atom tertentu atau atom dalam struktur mereka diganti dengan yang setara radioaktif yang tepat. Menggunakan teknik pelacak, penelitian juga dilakukan dengan berbagai radioisotop yang terjadi secara alami di lingkungan, untuk menguji dampak dari aktivitas manusia. Bahkan jumlah yang sangat kecil bahan radioaktif dapat dideteksi dengan mudah.

Properti ini dapat digunakan untuk melacak kemajuan beberapa bahan radioaktif melalui lintasan kompleks atau lewat gejala dalam suatu material. Dalam semua investigasi penelusuran ini, usia paruh pelacak radioisotop dipilih yang cukup panjang untuk memperoleh informasi yang diperlukan. Tidak ada sisa radioaktif sesudah proses. Limbah dari muara laut dapat ditelusuri untuk mempelajari dispersi. Kebocoran kecil dapat dideteksi dalam sistem yang kompleks seperti pembangkit listrik penukar panas. Laju aliran cairan dan gas di pipa dapat diukur secara akurat, demikian juga tingkat aliran sungai besar. Efisiensi pencampuran dari blender industri dapat diukur dan aliran internal bahan dalam tanur diperiksa. Luasnya kutu rayap dalam suatu struktur dapat ditemukan dengan memberi makan serangga dengan kayu pengganti radioaktif, kemudian mengukur sejauh mana radioaktivitas disebarkan oleh serangga. Pengukuran ini dapat dibuat tanpa merusak struktur apapun

sebagai radiasi yang mudah dideteksi melalui bahan bangunan. Pengukuran tingkat jejak radioaktif dari uji coba senjata nuklir di tahun 1950-an dan 60-an sekarang sedang digunakan untuk mempelajari gerakan tanah dan degradasi. Hal ini dianggap lebih penting dalam studi lingkungan dari dampak pertanian.

16.4.7 Menggunakan Ilmiah - Penentuan Umur

Menganalisis kelimpahan relatif tertentu radioisotop yang terjadi secara alamiah sangat penting dalam menentukan umur batuan dan bahan lainnya yang menarik untuk ahli geologi, ahli antropologi dan arkeolog. Teknik penentuan umur meliputi: K-Ar (potassium-argon dan yang lebih varian terbaru Ar-40 / Ar-39), Rb-Sr (rubidium-strontium), Sm-Nd (samarium-neodymium), Lu-Hf (lutetium-hafnium), dan U-Pb (uranium-lead dan varian Pb-Pb). Salah satu aplikasi umum adalah dalam menentukan usia bahan yang mengandung karbon sampai sekitar 20.000 tahun dengan mengukur kelimpahan karbon-14, atau penandaan beta. Ini adalah radioisotop terjadi secara alamiah terbentuk di bagian atas atmosfer oleh sinar kosmik mengkonversi nitrogen ke dalam C-14, juga dikenal sebagai radiokarbon. Organisme hidup terus menggabungkan CO₂ dengan C-14 ini ke dalam tubuh mereka bersama dengan isotop karbon lainnya (kebanyakan C-12). Ketika organisme mati, mereka berhenti menggabungkan baru C-14, dan konstituen C-14 mulai untuk kembali menjadi N-14 oleh peluruhan beta. Penentuan umur karbon dari air tanah cara kerjanya sama, peluruhan waktu awal ketika air dengan CO₂ terlarut meninggalkan atmosfer. Waktu paruh dari C-14 adalah 5730 tahun. Usia air yang diperoleh dari membor bawah tanah dapat diperkirakan dari tingkat alami radioisotop di dalam air. Informasi ini dapat menunjukkan apakah air tanah yang digunakan lebih cepat daripada tingkat pengisian.

16.4.8 Generator Termolistrik Radioisotop

Generator Radioisotop Termolistrik (GRT) telah menjadi sumber daya utama untuk AS dan banyak kerja ruang angkasa lainnya selama lebih dari 50 tahun, sejak 1961. Tingginya peluruhan panas plutonium-238 (0.56 W/g) khususnya memungkinkan penggunaannya sebagai sumber listrik dalam GRT dari pesawat ruang angkasa, satelit, beacon navigasi, dll dan proses peluruhan alfa yang intens dengan radiasi gamma diabaikan untuk perlindungan minimal. Panas dari bahan bakar oksida dikonversi menjadi listrik melalui elemen statis termolistrik (solid-state termokopel), dengan tidak ada bagian yang bergerak. GRT aman, handal dan bebas perawatan dan dapat menyediakan panas atau listrik selama beberapa dekade di bawah kondisi yang sangat keras, terutama di mana tenaga surya tidak layak.

16.4.9 Baterai Rendah Daya

Tritium dan nikel-63 dapat digunakan untuk sel beta-volta, yang memiliki daya rendah tetapi umur panjang. Mereka dapat digunakan dalam alat pacu jantung atau sebagai catu daya untuk satelit. Rusia sedang melaksanakan proyek untuk mengembangkan sumber daya nikel-63. Proyek ini melibatkan beberapa perusahaan di bawah pengawasan Gabungan Pertambangan dan Kimia di Zheleznogorsk.

16.5 Reaktor Riset

Reaktor riset terdiri dari berbagai reaktor nuklir sipil dan komersial yang umumnya tidak digunakan untuk pembangkit listrik. Istilah ini digunakan di sini untuk memasukkan reaktor tes, yang lebih kuat daripada yang kebanyakan. Tujuan utama dari reaktor riset adalah untuk menyediakan sumber neutron untuk penelitian dan keperluan lainnya. Hasil reaktor (berupa berkas neutron) dapat memiliki karakteristik yang berbeda tergantung pada penggunaan. Reaktor ini relatif kecil dibandingkan dengan reaktor daya yang fungsi utamanya adalah untuk menghasilkan panas untuk menghasilkan listrik. Reaktor pada dasarnya merupakan

pengguna energi bersih. Daya didisain dalam megawatt (atau kilowatt) termal (MWth atau MWt), tetapi di sini kita akan menggunakan hanya MW (atau kW). Kebanyakan jangkauan hingga 100 MW, dibandingkan dengan 3000 MW (yaitu 1.000 MWe) untuk reaktor daya khusus. Bahkan daya total 240 reaktor riset di dunia sedikit lebih dari 3000 MW.

Reaktor riset lebih sederhana dari reaktor daya dan beroperasi pada suhu yang lebih rendah. Memerlukan bahan bakar jauh lebih sedikit, dan produk fisi jauh lebih membangun sebagai bahan bakar yang digunakan. Di sisi lain, bahan bakar mereka membutuhkan uranium yang diperkaya lebih tinggi, biasanya hingga 20% U-235, meskipun beberapa yang lebih tua menggunakan 93% U-235. Reaktor juga memiliki kepadatan daya yang sangat tinggi di inti, yang membutuhkan fitur desain khusus. Seperti reaktor daya, inti membutuhkan pendinginan, meskipun hanya reaktor uji bertenaga tinggi perlu pendinginan paksa. Biasanya membutuhkan moderator untuk memperlambat neutron dan meningkatkan fisi. Produksi neutron adalah fungsi utama mereka, sebagian besar reaktor riset juga perlu reflektor untuk mengurangi kehilangan neutron dari inti.

Pada April 2016 database IAEA menunjukkan bahwa ada 243 reaktor operasional penelitian (89 dari mereka di negara-negara berkembang), 7 dalam pembangunan, 11 direncanakan (8 di negara berkembang), 134 secara permanen ditutup (ditambah sementara 19) dan 352 ditutup (sebagian besar yang terakhir dua kategori di negara maju). Sekitar setengah reaktor riset operasional berusia lebih dari 40 tahun.

16.5.1 Tipe Reaktor Riset

Ada yang jauh lebih luas dari desain digunakan untuk reaktor riset daripada reaktor daya, di mana 80% dari instalasi nuklir di dunia adalah hanya dua jenis yang sama. Mereka juga memiliki modus operasi yang berbeda, menghasilkan energi yang mungkin stabil atau berdenyut. Sebuah desain umum (67 unit) adalah reaktor tipe kolam renang, di mana intinya adalah sekelompok elemen bahan bakar duduk di kolam besar air. Di antara unsur-unsur bahan bakar ada batang kendali dan saluran kosong untuk bahan percobaan. Setiap elemen terdiri dari beberapa (misalnya 18) pelat melengkung bahan bakar aluminium terdapat dalam kotak vertikal. Air digunakan baik sebagai moderat maupun sebagai pendingin reaktor, dan grafit atau berilium umumnya digunakan untuk reflektor, meskipun bahan lainnya juga dapat digunakan. Lubang untuk mengakses berkas neutron yang ditempatkan di dinding kolam. Reaktor riset jenis tangki (32 unit) hampir mirip, kecuali bahwa pendinginan lebih aktif.

Reaktor TRIGA adalah desain umum lain (40 unit). Inti terdiri dari 60-100 silinder elemen bakar diameter sekitar 36 mm dengan lapisan aluminium merupakan campuran bahan bakar uranium dan zirkonium hidrida (sebagai moderator). Inti berkedudukan di kolam air dan umumnya menggunakan grafit atau berilium sebagai reflektor. Reaktor semacam ini aman dapat berdenyut untuk tingkat daya yang sangat tinggi (misalnya 25.000 MW) untuk sepersekian detik. Bahan bakar TRIGA memberikan koefisien temperatur negatif yang sangat kuat, dan peningkatan pesat dalam daya cepat tidak sejalan dengan efek reaktivitas negatif dari moderator hidrida.

Desain lain yang dimoderatori oleh air berat (12 unit) atau grafit. Beberapa reaktor cepat, yang tidak memerlukan moderator dan dapat menggunakan campuran uranium dan plutonium sebagai bahan bakar. Jenis reaktor homogen memiliki inti yang terdiri dari larutan garam uranium sebagai cairan, yang terkandung dalam tangki dengan diameter sekitar 300 mm. Desain sederhana membuat mereka populer sejak awal, tetapi hanya sedikit yang sekarang beroperasi, dan semua kecuali dua dari mereka (20 kW), mempunyai daya yang sangat rendah.

Reaktor riset memiliki berbagai kegunaan, termasuk analisis dan pengujian bahan, dan produksi radioisotop. Kemampuan mereka diterapkan dalam berbagai bidang, dalam industri nuklir serta dalam penelitian fusi, ilmu lingkungan, pengembangan bahan maju, desain obat

dan kedokteran nuklir. Daftar IAEA memberikan beberapa kategori klasifikasi yang luas dari reaktor riset. Mereka termasuk 60 perangkat kritis (biasanya daya nol), 23 reaktor uji, 37 fasilitas pelatihan, dua prototip dan bahkan satu menghasilkan listrik. Tapi kebanyakan (160) sebagian besar untuk penelitian, meskipun beberapa juga dapat menghasilkan radioisotop. Karena fasilitas ilmiah mahal, mereka cenderung multi-tujuan, dan banyak yang telah beroperasi selama lebih dari 30 tahun.

Lebih dari 770 reaktor penelitian dan uji telah dibangun di seluruh dunia, 264 di antaranya di Amerika Serikat dan 118 di Rusia. Di Amerika Serikat, 193 beroperasi pada tahun 1950-an dan 1960-an. Pada tahun 2015, Rusia memiliki reaktor yang paling banyak operasional penelitian (63), diikuti oleh Amerika Serikat (42), China (17), Prancis (10), Jepang (8), dan Jerman (8). Banyak negara-negara kecil dan berkembang juga memiliki reaktor riset, termasuk Bangladesh, Aljazair, Kolombia, Ghana, Jamaika, Libya, Thailand dan Vietnam. Sekitar 20 lebih reaktor direncanakan atau di bawah konstruksi, dan hampir 500 telah ditutup dan dihentikan, hampir setengah dari ini di Amerika Serikat. Banyak reaktor riset yang dibangun pada 1960-an dan 1970-an. Jumlah puncak operasi itu pada tahun 1975, dengan 373 di 55 negara.

16.5.2 Penggunaan

Berkas neutron secara unik cocok untuk mempelajari struktur dan dinamika bahan pada tingkat atom. Hamburan neutron digunakan untuk meneliti sampel dalam kondisi yang berbeda seperti variasi tekanan vakum, suhu tinggi, suhu rendah dan medan magnet, pada dasarnya dalam kondisi dunia nyata. Menggunakan analisis aktivasi neutron, adalah mungkin untuk mengukur jumlah yang sangat dari elemen. Atom dalam sampel dibuat radioaktif oleh paparan neutron dalam reaktor. Radiasi karakteristik masing-masing elemen kemudian dimancarkan dapat dideteksi.

Neutron aktivasi juga digunakan untuk memproduksi radioisotop, banyak digunakan dalam industri dan obat-obatan, dengan membombardir elemen tertentu dengan neutron sehingga target inti memiliki kelebihan neutron. Misalnya, yttrium-90 berbentuk bola kecil untuk mengobati kanker hati, yang diproduksi dengan cara membombardir yttrium-89 dengan neutron

Neutron dapat aktivasi dihasilkan oleh fisi. Isotop yang paling banyak digunakan di kedokteran nuklir adalah teknesium-99m, produk peluruhan molibdenum-99 *. Hal ini dihasilkan oleh penyinaran target foil U-235 dengan neutron (selama seminggu atau lebih) dan kemudian memisahkan molybdenum-99 dari produk fisi lainnya di sel panas teh Mo-99 menjadi sekitar 6% dari produk fisi . Kebanyakan produksi Mo-99/Tc-99 telah menggunakan target HEU (High Enriched Uranium), tapi LEU (Low Enriched Uranium) semakin disukai dan HEU sedang dihapus. Generator Teknesium, berupa panci timah yang menutup tabung kaca berisi radioisotop, dipasok ke rumah sakit dari reaktor nuklir di mana isotop yang dibuat. Mereka mengandung molibdenum-99, dengan usia paruh 66 jam, yang meluruh ke teknesium-99m, dengan usia paruh 6 jam. Tc-99 dicuci keluar dari pot timah dibantu oleh larutan garam bila diperlukan. Hal ini kemudian melekat pada protein tertentu untuk diberikan kepada pasien. Setelah dua minggu atau kurang generator dikembalikan untuk pengisian, karena kehilangan 22% dari produknya setiap 24 jam. Reaktor riset juga dapat digunakan untuk industri pengolahan. Neutron transmutation doping (NTD) mengubah sifat silikon, sehingga sangat konduktif listrik. Besar, kristal tunggal silikon dibentuk menjadi **ingots**, disinari dalam bejana reflektor reaktor. Berikut neutron mengubah satu atom silikon dalam setiap miliar menjadi fosfor. Silikon iradiasi diiris menjadi cip dan digunakan untuk berbagai macam aplikasi komputer canggih. NTD meningkatkan efisiensi silikon dalam menghantar listrik, karakteristik penting bagi industri elektronik.

Dalam reaktor pengujian bahan, bahan juga merupakan subjek terhadap pada iradiasi neutron intens untuk mempelajari perubahan. Misalnya, beberapa baja menjadi rapuh, dan paduan logam yang menolak **embrittlement** harus digunakan dalam reaktor nuklir. Proyek internasional untuk membangun reaktor Jules Horowitz 100 MWt di Cadrache di Perancis akan memungkinkan penelitian tentang bahan yang akan penting dalam pembangkit nuklir Generasi IV. Hal ini dirancang untuk menghasilkan fluks neutron yang sangat tinggi. Pekerjaan sipil yang lebih dari 80% selesai pada akhir 2014. Sekarang BR2 di Belgia merupakan reaktor pengujian bahan terbesar di Eropa.

Seperti reaktor daya, reaktor riset dicakup oleh inspeksi keselamatan IAEA dan perlindungan, karena potensi mereka untuk membuat senjata nuklir. Tahun 1974 ledakan India adalah hasil produksi plutonium di reaktor besar, tapi secara internasional tanpa pengawasan, reaktor penelitian ini ditutup pada akhir 2010.

Salah satu reaktor uji lebih menarik dan kuat adalah Plum Brook di Ohio, Amerika Serikat, yang beroperasi untuk NASA selama lebih dari 1961-1973 dan dirancang untuk penelitian tenaga nuklir untuk pesawat, kemudian roket bertenaga nuklir dan pesawat ruang angkasa. Itu adalah reaktor jenis kolam 60 MW, dengan pendingin dan moderator air ringan, dengan fluks neutron yang sangat tinggi 420 triliun/cm²/detik.

16.5.3 Bahan Bakar Reaktor

Bahan bakar reaktor riset lebih sangat diperkaya (biasanya sekitar 20% hari ini) dibandingkan dengan bahan bakar reaktor daya. Ini berarti ia memiliki kurang U-238, maka bahan bakar yang digunakan memiliki kurang aktinida dan panas dari peluruhan radioaktif. Proporsi produk fisi tidak jauh berbeda dari bahan bakar reaktor daya yang digunakan.

Perangkat bahan bakar biasanya piring atau silinder uranium-aluminium alloy (U-Al) dilapisi dengan aluminium murni. Mereka berbeda dari pelet UO₂ keramik tertutup dalam lapisan Zircaloy yang digunakan dalam reaktor daya. Hanya beberapa kilogram uranium yang dibutuhkan untuk bahan bakar reaktor riset, meskipun lebih sangat diperkaya, dibandingkan dengan mungkin seratus ton pada reaktor daya. reaktor riset biasanya beroperasi pada suhu rendah (pendingin dibawah 100° C), kondisi operasi yang parah dengan cara lain. Sementara itu bahan bakar reaktor daya beroperasi pada kepadatan kekuatan sekitar 5 kW/cc, bahan bakar reaktor riset mungkin sekitar 17 kW/cc dalam daging bakar. Juga derajat bakar sangat jauh lebih tinggi, sehingga bahan bakar harus menahan kerusakan struktural dari fisi dan menampung produk fisi lebih banyak.

Lima reaktor penelitian yang dirancang Rusia di Rusia menggunakan bahan bakar uranil sulfat cair tinggi diperkaya. Satu di Uzbekistan dihentikan pada 2014 dan bahan bakar diterbangkan ke Mayak. Uranium yang sangat diperkaya (HEU -> 20% U-235) diperbolehkan teras lebih kompak, dengan fluks neutron yang tinggi dan waktu juga lebih lama antara pengisian bahan bakar. Oleh karena itu banyak reaktor hingga akhir 1970-an menggunakannya, dan sebagian besar reaktor negara maju memiliki 93% bahan bakar diperkaya. Sejak awal tahun 1970 masalah keamanan telah tumbuh, terutama karena banyak reaktor riset yang terletak di universitas dan lokasi sipil lainnya dengan keamanan jauh lebih rendah dari segi persenjataan militer di mana jumlah yang jauh lebih besar dari HEU yang ada. Sejak tahun 1978 hanya satu reaktor, FRM-II di Garching di Jerman, telah dibangun dengan bahan bakar HEU, sementara lebih dari 20 telah ditugaskan pada bahan bakar LEU di 16 negara. Reaktor Jules Horowitz di Prancis akan memulai pada bahan bakar silisida uranium yang diperkaya sampai 27%, sejak direncanakan kerapan tinggi bahan bakar U-Mo tidak akan siap pada waktunya untuk itu.

Pertanyaan pengayaan adalah fokus utama dari Evaluasi Siklus Bahan Bakar Nuklir International yang disponsori PBB pada tahun 1980. Hal ini menyimpulkan bahwa untuk menjaga terhadap proliferasi senjata dari bahan bakar HEU kemudian biasa digunakan dalam

reaktor riset, pengayaan harus dikurangi tidak lebih dari 20% U-235. Ini diikuti inisiatif serupa oleh Amerika Serikat pada tahun 1978 ketika program untuk Reduced Enrichment for Research and Test Reactors (RERTR) atau program Mengurangi Pengayaan Reaktor Penelitian dan Uji diluncurkan.

Kebanyakan reaktor riset menggunakan bahan bakar HEU yang disediakan oleh Amerika Serikat dan Rusia, maka upaya inisiatif untuk menangani masalah sebagian besar mereka. Program RERTR berkonsentrasi pada reaktor lebih 1 MW yang memiliki persyaratan bahan bakar yang signifikan. Keseluruhan 129 reaktor dari 207 menggunakan HEU pada tahun 2007 ditargetkan untuk konversi, dan sekitar 20 ton HEU terlibat. Namun, beberapa terkait pertahanan (kebanyakan di Rusia) atau tidak praktis untuk alasan lain. Beberapa memiliki teras seumur hidup yang tidak memerlukan pengisian bahan bakar, sehingga ada sedikit insentif untuk mengkonversi mereka.

16.5.4 Bahan Bakar LEU Baru

Program RERTR ini telah menyebabkan perkembangan dan kualifikasi yang baru, kepadatan tinggi, bahan bakar uranium yang diperkaya yang rendah (LEU). Kepadatan bahan bakar asli uranium adalah sekitar 1,3-1,7 g/cm³. Menurunkan pengayaan berarti bahwa kepadatan harus ditingkatkan. Awalnya ini adalah untuk 2,3-3,2 g/cm³ dengan yang ada jenis bahan bakar U-Al. Sampai September 2009, 67 reaktor riset (17 di Amerika Serikat) telah dikonversi ke bahan bakar silisida uranium kadar rendah atau dimatikan, termasuk reaktor utama di Ukraina, Uzbekistan dan Afrika Selatan. Lain dari 34 reaktor dapat dikonversi menggunakan bahan bakar ini. Sebanyak 28, sebagian besar desain Rusia tetapi termasuk dua reaktor universitas di Amerika Serikat, perlu bahan bakar kerapatan tinggi belum tersedia. Tujuannya adalah untuk mengubah atau menutup 129 reaktor tahun 2018. ekspor HEU AS menurun dari 700 kg/tahun pada pertengahan 1970-an untuk hampir nol pada tahun 1993. Uni Soviet melakukan upaya serupa dari tahun 1978, dan memproduksi bahan bakar 2,5 g/cm³ dengan pengayaan dikurangi dari 90 menjadi 36%. Rusia menghentikan sebagian besar ekspor dari 90% bahan bakar diperkaya pada 1980-an. Tidak ada reaktor riset Rusia yang belum dikonversi ke LEU, dan upaya Rusia telah difokuskan pada reaktor di negara-negara lain.

Namun, Rusia sekarang melihat kelayakan mengkonversi enam reaktor domestik, IR-8, OR, dan Argus di Kurchatov Institute, IRT-MEPHI di Moskow Teknik Fisika Inst, IRT-T di Tomsk Polytechnic Inst, MIR di Dimitrovgrad Penelitian Inst. Sementara yang lain akan membutuhkan bahan bakar kerapatan tinggi. Awal tahun 2012 proyek Rosatom-US NNSA bersama menyelesaikan studi pada mengkonversi dua dari enam reaktor tersebut untuk bahan bakar LEU. Sebanyak 68 reaktor Rusia lain berada di luar lingkup program konversi karena terkait pertahanan mereka atau tujuan khusus. Pada Desember 2010 dibuat sebuah perjanjian dengan DOE AS berkaitan dengan studi kelayakan pada mengkonversi enam reaktor riset Rusia ke LEU.

Generasi pertama bahan bakar LEU baru digunakan uranium dan silikon (U₃Si₂-Al-silisida uranium tersebar di aluminium), dengan kepadatan 4,8 g/cm³. Ada tes sukses dengan kepadatan piring bahan bakar U₃Si-Al hingga 6,1 g/cm³, tapi pembangunan bahan bakar silisida AS ini berhenti pada tahun 1989 dan tidak mulai lagi sampai 1996. Kehadiran silikon membuat pengolahan lebih sulit. Upaya internasional sedang berlangsung untuk mengembangkan, memenuhi syarat dan lisensi bahan bakar kepadatan tinggi berdasarkan U-Mo alloy tersebar di aluminium, dengan kepadatan 6-8 g/cm³. Organisasi utama yang terlibat adalah program AS RERTR di Idaho National laboratorium (INL) sejak tahun 1996, Perancis U-Mo Group (CEA, CERCA, COGEMA, Framatome-ANP dan Technicatome) sejak tahun 1999 dan Komisi Energi Atom Argentina (CNEA) sejak tahun 2000. Pekerjaan pembangunan ini telah dilakukan untuk memberikan bahan bakar yang dapat memperpanjang penggunaan

LEU bagi reaktor mereka yang membutuhkan kepadatan lebih tinggi dari yang tersedia pada dispersi silisida dan untuk menyediakan bahan bakar yang dapat lebih mudah diolah dibandingkan dengan jenis silisida. Persetujuan bahan bakar ini diharapkan pada tahun 2006 tetapi tes sejak tahun 2003 telah gagal untuk mengkonfirmasi kinerja karena pembengkakan yang tidak stabil di bawah iradiasi tinggi, dan target bergerak hingga 2010.

Di Rusia, program RERTR Rusia paralel didanai bersama oleh Rosatom dan program US RERTR telah bekerja sejak tahun 1999 untuk mengembangkan bahan bakar dispersi U-Mo dengan kepadatan 2-6 g/cm³ untuk digunakan dalam penelitian dan uji reaktor yang dirancang Rusia. Namun, ini juga belum memenuhi harapan.

Dalam tahap lanjut pembangunan bakar U-Mo yang telah menjadi prioritas utama, ANL, CEA dan CNEA menguji bahan bakar U-Mo dalam bentuk monolitik-pada dasarnya logam murni, bukan dispersi U-Mo dalam aluminium. Kepadatan uranium adalah 15,6 g/cm³ dan ini akan memungkinkan setiap reaktor riset di dunia untuk mengkonversi dari bahan bakar HEU ke LEU tanpa kehilangan kinerja. Tanggal target ketersediaan diperpanjang hingga 2013 tapi ada keraguan. Semua bahan bakar padat adalah berlapis aluminium.

16.5.5 Bahan Bakar Bekas

Bahan bakar bekas dari reaktor riset biasanya menghasilkan kurang dari 2 kW/m³ peluruhan panas, sehingga digolongkan sebagai limbah tingkat menengah (ILW), meskipun aktivitas mungkin masih cukup tinggi. Bahan bakar U-Al dapat diolah kembali oleh Areva di Perancis, dan bahan bakar U-Mo juga dapat diolah kembali di sana. Bahan bakar U-Si dan TRIGA tidak mudah diolah di fasilitas konvensional. Namun, setidaknya satu operator komersial telah mengkonfirmasi bahwa bahan bakar U-Si dapat diolah kembali di pabrik yang ada jika diencerkan dengan jumlah yang tepat dari bahan bakar lainnya, seperti U-Al.

Untuk menjawab kekhawatiran tentang penyimpanan sementara bahan bakar penelitian akan habis di seluruh dunia, Amerika Serikat meluncurkan program untuk mengambil kembali bahan bakar asal US dihabiskan dengan untuk pembuangan dan hampir setengah ton U-235 dari bahan bakar HEU tersebut telah dikembalikan. Pada saat program ini berakhir dengan bahan bakar habis pada tahun 2006, bahan bakar U-Mo diharapkan akan tersedia. Karena akan diselipkan di target, program mengambil kembali US kini telah diperpanjang selama sepuluh tahun. Pembuangan bahan bakar diperkaya tinggi atau bahkan 20% diperkaya dibutuhkan untuk mengatasi masalah kekritisitas dan membutuhkan penggunaan penyerap neutron atau ditipiskan atau menyebar keluar dalam beberapa cara.

Di Rusia, program trilateral paralel melibatkan IAEA dan Amerika Serikat untuk memindahkan 2 ton HEU dan 2,5 ton LEU menghabiskan bahan bakar untuk pengolahan kompleks Mayak dekat Chelyabinsk selama sepuluh tahun 2012. Ini Program Pegembalian Bahan Bakar Reaktor Rusia (RRR FRT) mempertimbangkan 38 pengiriman (dari keduanya bahan bakar segar dan digunakan) dari sepuluh negara selama dari 2005-08, kemudian 8 + pengiriman dari enam negara untuk menghapus semua bahan bakar HEU habis sebelum reaktor dikonversi ke LEU atau dimatikan. Tujuh belas negara yang telah disediakan Soviet reaktor riset, dan ada 25 reaktor tersebut di luar Rusia, 15 dari mereka masih beroperasi. Sejak Libya bergabung program pada tahun 2004, hanya Korea Utara yang menolak untuk itu. Tahun 2004 program AS-Rusia bersama untuk mengambil bahan bakar bekas dari 14 negara (Belarus, Bulgaria, Hongaria, Vietnam, Jerman, Kazakhstan, Latvia, Libya, Polandia, Rumania, Serbia, Uzbekistan, Ukraina dan Republik Ceko) telah diperpanjang dari 2016 untuk tahun 2024.

DAFTAR ISI

BAB 16 PENGGUNAAN TEKNOLOGI NUKLIR

16.1 Desalinasi Nuklir

- 16.1.1 Desalinasi
- 16.1.2 Teknologi Desalinasi
- 16.1.3 Ketergantungan Terhadap Desalinasi
- 16.1.4 Studi Desalinasi Nuklir
- 16.1.5 Pengalaman Nuklir Terhadap Desalinasi
- 16.1.6 Reaktor Nuklir Kecil Untuk Desalinasi
- 16.1.7 Pengolahan Air Limbah Dan Air Tanah Untuk Irigasi
- 16.1.8 Proyek Desalinasi Baru

16.2 Panas Proses Nuklir untuk Industri

- 16.2.1 Penemuan Kembali Minyak Dari Pasir Tar
- 16.2.2 Penyulingan Minyak
- 16.2.3 Batubara Untuk Cairan (CTL)
- 16.2.4 Hidrogen Untuk Pupuk Pertanian
- 16.2.5 Proses Haber
- 16.2.6 Produksi Etanol Berbasis Biomassa
- 16.2.7 Produksi Metanol Berbasis CO₂
- 16.2.8 Energi Nuklir Untuk Produksi Hidrogen
- 16.2.9 Hidrogen Dari Panas Nuklir
- 16.2.10 Persyaratan Reaktor Produksi Untuk Proses Panas
- 16.2.11 Reaktor Suhu Tinggi Untuk Proses Panas
- 16.2.12 Bergerak Maju Pada Hidrogen
- 16.2.13 Produksi Metanol Menggunakan Hidrogen, DME

16.3 Reaktor Nuklir dan Radioisotop untuk Angkasa

- 16.3.1 Sistem Radioisotop – RTGS
- 16.3.2 Sistem Fisi – Panas
- 16.3.3 Sistem Fisi - Ruang Propulsi

16.4 Radioisotop Dalam Industri

- 16.4.1 Teknik Analisis Neutron
- 16.4.2 Teknik Analisis Sinar Gamma dan Sinar X
- 16.4.3 Radiografi Gamma
- 16.4.4 Pengukur
- 16.4.5 Sterilisasi Gamma
- 16.4.6 Penggunaan Pelacak Secara Ilmiah
- 16.4.7 Menggunakan Ilmiah - Penentuan Umur
- 16.4.8 Generator Termolistrik Radioisotop

16.4.9 Baterai Rendah Daya

16.5 Reaktor Riset

- 16.5.1 Tipe Reaktor Riset
- 16.5.2 Penggunaan
- 16.5.3 Bahan Bakar Reaktor
- 16.5.4 Bahan Bakar LEU Baru
- 16.5.5 Bahan Bakar Bekas

KEPUSTAKAAN

World Nuclear Association. 2016, Registered in England and Wales, number 01215741.
<http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/overview/the-many-uses-of-nuclear-technology.aspx>. Diakses tanggal 26 Agustus 2016.

Main Sources: 16.1 Desalinasi Nuklir

- IAEA 1997, Nuclear Desalination of Sea Water, proceedings of 1997 Symposium.
IAEA 1998, Nuclear heat applications: design aspects and operating experience, IAEA-TECDOC-1056.
Konishi & Misra, Freshwater from the Seas, IAEA Bulletin 43, 2; 2001.
IAEA Nuclear Desalination, paper on web.
International J of Nuclear Desalination, 2003, vol 1, 1.
UN World Water Development Report 2003.
Seneviratne, G 2007, Research projects show nuclear desalination economical, Nuclear News April 2007.
Khamis, I, 2010, [Nuclear Desalination](#)

Main References: 16.2 Panas Proses Nuklir untuk Industri

- Forsberg, C. 2005, What is the initial market for hydrogen from nuclear energy? *Nuclear News* Jan 2005
Bertel, E. et al 2004, Nuclear energy – the hydrogen economy, *NEA News* 22.2
Schultz, K.R. 2004, Use of the modular helium reactor for hydrogen production, *Nuclear Engineer* 45,2
Forsberg, C. 2002, *The advanced high-temperature reactor for hydrogen production*, 15/5/02 GA Workshop
Forsberg & Peddicord, Hydrogen production as a major nuclear energy application, *Nuclear News* 44,10; Sept 2001
Hoffmann, P. 2001, *Tomorrow's Energy – Hydrogen, fuel cells and the prospects of a cleaner planet*, MIT Press
Wade, D.C. et al 2002, *Secure Transportable Autonomous Reactor for Hydrogen Production & Desalination*, ICONE-10 proceedings
Walters, Leon et al 2002, Transition to a nuclear/hydrogen energy system, *The Nuclear Engineer* 43,6
Rio Tinto Review, March 2002
Shiozawa, S. et al 2003, *Status of the Japanese development study of hydrogen production system using HTGR*, KAIF/KNS conference

Schultz, K. et al, 2005, The Hydrogen reaction, *Nuclear Engineering International*, July 2005
Sakaba, N. et al, 2005, JAERI's Hot Stuff, *Nuclear Engineering International*, July 2005
Romm, J.J. & Frank, A.F. 2006, Hybrid Vehicles Gain Traction, *Scientific American* April 2006
Economist Technology Quarterly, 10/6/06
Brown, Russell 2006, *Critical Paths to a Post-Petroleum Age* (ANL paper).
Satyapal, S. et al, 2007, Gassing up with Hydrogen, *Scientific American* April 2007
Barre, B. & Baquis, P-R. 2007, *Oil and Nuclear Energy: Toward a Long-term Symbiosis?*, WNA Symposium
Paterson, A.W. et al 2007, *Beyond Electricity - Nuclear Process Heat*, WNA Symposium
Forsberg, C.W. 2008, Sustainability by combining nuclear, fossil and renewable energy sources, *Progress in Nuclear Energy*.
Greene S.R. et al 2009, Integration of biorefineries and nuclear cogeneration power plants – a preliminary analysis, ORNL/TM-2008/102
Erδος Shenhua project:
http://gcep.stanford.edu/pdfs/wR5MezrJ2SJ6NfF15sb5Jg/16_china_zhangyuzhuo.pdf
Olah, George & Goeppert, Alain, 2009, Beyond Oil and Gas, the Methanol Economy
[Methanol Institute](#) webpages on [renewable methanol \(biomethanol\)](#) and [how methanol is made](#)

Sources: 16.3 Reaktor Nuklir dan Radioisotop untuk Angkasa

Poston, D.I. 2002, Nuclear design of SAFE-400 space fission reactor, *Nuclear News*, Dec 2001.
Poston, D.I. 2002, Nuclear design of HOMER-15 Mars surface fission reactor, *Nuclear News*, Dec 2001.
Vrillon et al, 1990, ERATO article, *Nuclear Europe Worldscan* 11-12, 1990.
US [DOE website](#) – space applications.
space.com 21/5/00, 16/6/00, 22/7/00, 17/1/03, 7/2/03.
www.nuclearspace.com
Delovy Mir 8/12/95.
G. Kulcinski, University of Wisconsin material on web.
Kleiner K. 2003, Fission Control, *New Scientist* 12/4/03.
OECD 1990, Emergency Preparedness for Nuclear-Powered Satellites.
[NASA website](#)
J.A. Angelo & D. Buden, *Space Nuclear Power*, Orbit Book Co., 1985
KiloPower Space Reactor Concept – Reactor Materials Study, May 2014, DOE Los Alamos National Laboratory
NASA [Glenn Research Centre Ion Propulsion](#) website.

Sources: 16.4 Radioisotop Dalam Industri

ANSTO
ANA 2001 conference papers.
Lowenthal & Airey 2001, *Practical Applications of Radioisotopes and Radiation*, Cambridge UP.

Sources: 16.5 Reaktor Riset

IAEA, [Research Reactors database](#)
IAEA, Nuclear Research Reactors in the World, reference data series #3, Sept 2000
Research Reactors: an overview, by Colin West, *ANS Nuclear News*, Oct 1997
IAEA, *Research Reactor Facility Characteristics*, 1985

Research reactors under threat, by W.Krull, Nucl.Eng.Intl. Oct 2000
O.Bukharin, 2002, Making fuel less tempting, Bull. Atomic Scientists, July-Aug 2002
Travelli, A 2002, Progress of the RERTR program in 2001
[Reduced Enrichment for Research and Test Reactors \(RERTR\) Program website](#)
Travelli, A 2002, Status and Progress of the RERTR Program in the Year 2002, RERTR conference November 2002
Snelgrove JL 2003, Qualification and Licensing of U-Mo Fuel, RRFM conference, March 2003
NuclearFuel 17/3/03, 22/11/04, 26/3/07, 20/10/08
Wachs, Daniel, 2010, Reactor Conversion, Nuclear Engineering International January 2010
[National Nuclear Security Administration website](#)
Mark D. Bowles and Robert S. Arrighi, [NASA's Nuclear Frontier – The Plum Brook Reactor Facility, 1941-2002](#), Monographs in Aerospace History Series No. 33, SP-2004-4533, NASA History Division, August 2004
Homogeneous Aqueous Solution Nuclear Reactors for the Production of Mo-99 and other Short Lived Radioisotopes, International Atomic Energy Agency, IAEA-TECDOC-1601, ISBN 9789201097088 (September 2008)
B&W and Covidien to develop U.S. source of key medical isotope, Babcock & Wilcox press release (26 Jan 2009)
