

Studi komparasi reaksi fisi dan fusi pada pembangkit listrik tenaga nuklir masa depan

Indah Rosidah Maemunah, Nining Yuningsih, Dwi Irwanto *

Program Studi Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Institut Teknologi Bandung

*e-mail: dirwanto@fi.itb.ac.id

Abstrak

Konsumsi energi yang terus bertambah membuat banyak manusia memikirkan cara memenuhinya, terlebih 50 tahun mendatang, dunia akan dihadapkan dengan krisis energi global yang begitu dramatis. Saat ini kebutuhan energi dipasok oleh batu-bara dan minyak bumi yang paling banyak menyumbang emisi gas karbondioksida dan ketersediaannya yang mulai terbatas. Disisi lain, terdapat sumbangsih luar biasa dari energi nuklir, baik itu nuklir fisi maupun fusi, yang memiliki kelebihan berupa pengadaan energi yang melimpah, lebih murah, keamanan pada pembangkit listrik yang tinggi, penanganan limbah yang menguntungkan dan ramah lingkungan. Keduanya memiliki keutaman dan tantangan tersendiri yang masih terus berkembang penelitiannya guna untuk mencapai kondisi energi masa depan yang luar biasa besarnya.

Kata kunci : Energi, Fisi, Fusi, Nuklir

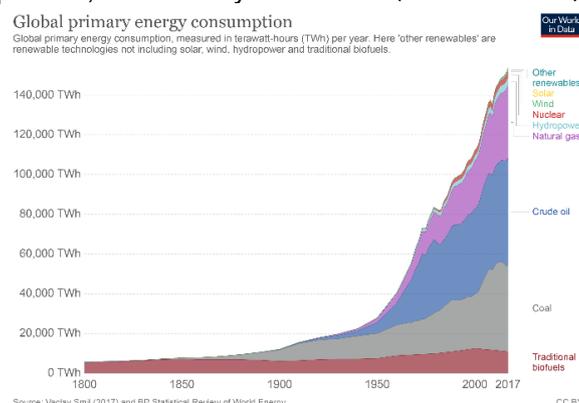
1. Pendahuluan

Kebutuhan energi di setiap negara di dunia selalu mengalami kenaikan, selaras dengan kenaikan penduduk yang semakin meningkat. Berdasarkan data yang disampaikan oleh Vaclav Smil (2017), pada publikasinya mengenai "*Energy Transitions: Global and National Perspectives. & BP Statistical Review of World Energy*", menyebutkan pada tengah abad ke-20, campuran energi terdiversifikasi secara signifikan, dan penggunaan batubara yang meningkat sampai 20 persen, lebih banyak

dibanding dengan minyak bumi dan biofuel. Hal tersebut akan memberikan dampak pencemaran lingkungan yang sangat tinggi. Lengkapnya terlihat pada gambar 1.

Tahun 1960, dimulai penggunaan energi nuklir sebagai energi alternatif, lebih awal dibanding energi terbarukan saat ini yang ada, seperti angin, matahari, dan biofuel.

Pada data yang sama di tahun 2015, dunia mengonsumsi 146.000 TWh, lebih banyak 25 kali lipat dibanding pada tahun 1800 (Vaclav, 2017).



Gambar 1. Tingkat konsumsi energi dunia

Diprediksikan bahwa 50 tahun ke depan, permintaan global terhadap kebutuhan energi, terkhususkan China dan

India, mengalami kenaikan yang dramatis, dimana peningkatan jumlah daya tersebut digunakan untuk pertumbuhan ekonomi

masyarakat dan standar hidup masing-masing di negara tersebut.

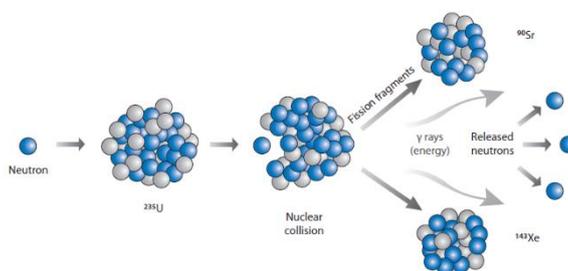
Ditambah saat ini diakui bahwa energi yang dipakai (notabennya dari energi fosil, batu-bara, dll) setidaknya dapat memberikan dampak negatif pada lingkungan. Hal tersebut sekiranya 50% perubahan iklim global. Sehingga reaktor nuklir ini hadir sebagai energi alternatif yang menjanjikan.

Ada dua jenis reaksi nuklir, yaitu: nuklir fisi dan nuklir fusi. Kedua jenis tersebut memiliki pembentukan energi melalui cara yang berbeda. Nuklir fisi dengan pemecahan inti berat, sedangkan nuklir fusi dengan penggabungan inti ringan.

Selain itu, walau dikatakan energi nuklir, namun keduanya memiliki karakter-karakter yang berbeda, yang kemudian menjadi keuntungan dan kerugian yang akan dibahas pada penelitian kali ini.

A. Nuklir Fisi

Fisi nuklir merupakan proses pemecahan atom berat menjadi dua bagian, biasanya terjadi karena adanya tabrakan neutron. Proses ini menghasilkan panas dan juga melepaskan neutron. Neutron ini dapat terus menyebabkan fisi lebih lanjut, yang memungkinkan terdapat reaksi berantai (*Nuclear Energy Agency Organization for Economic Co-Operation and Development, 2012*).



Gambar 2. Reaksi Fisi

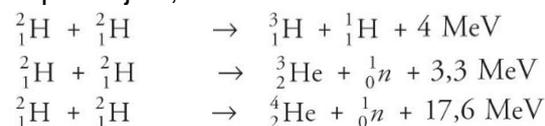
Fragmen fisi, juga disebut produk fisi, memiliki energi kinetik sangat tinggi yang menyebabkan bahan di sekitarnya memanas akibat bertabrakan dengan atom tetangga. Di stasiun tenaga nuklir, energi panas ini kemudian ditransfer dari bahan bakar ke turbin dengan menggunakan cairan pendingin. Produk fisi juga termasuk radioaktif dan radioaktivitas ini menghasilkan panas yang cukup besar. Meskipun panas ini hanya sebagian kecil yang dihasilkan relatif terhadap daya, namun masih dapat menyebabkan kerusakan parah pada reaktor jika tidak dikelola dengan hati-hati, seperti yang terjadi di Reaktor Fukushima (Francis Livens and Aiden Peakman, 2014).

Dalam kondisi tertentu, reaksi fisi dapat menimbulkan reaksi berantai, di mana neutron yang dipancarkan oleh satu fisi dapat menghasilkan fisi tambahan, dengan

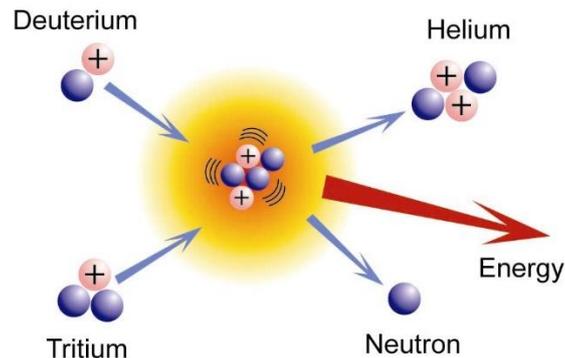
pelepasan energi global yang sangat signifikan (M. Ripani, 2015).

B. Nuklir Fusi

Salah satu energi nuklir yang sekarang ini sedang dikembangkan adalah nuklir fusi. Energi ini berkat penggabungan inti antara atom ringan. Atom-atom ringan tersebut akan membentuk inti yang lebih berat dengan melepaskan sejumlah besar energi. Ada beberapa energi fusi yang dapat terjadi, antara lain:



Namun reaksi penggabungan ini tidak semudah reaksi pemisahan inti (fisi), hal tersebut dikarenakan reaksi penggabungan dunia inti yang sama-sama bermuatan positif, maka dibutuhkan gaya yang dapat melebihi gaya tolak menolak inti yang sangat besar tersebut, lebih jelasnya ditunjukkan pada gambar 3 berikut.



Gambar 3. Reaksi Fusi (Nick Connor, 2019)

Gaya yang dibutuhkan untuk dapat membuat reaksi fusi antara lain dengan memberikan tekanan yang tinggi seperti laser, dan memberikan temperature yang tinggi. Pemberian tekanan dan temperature yang tinggi akan membuat gas terionisasi sehingga menjadi plasma (gas bermuatan). Plasma tersebut akan terus membesar, sehingga perlu dikontrol ukurannya karena panasnya yang tinggi serta muatan didalamnya yang sangat berbahaya jika kontak dengan bagian sekitarnya. Ada dua pilihan bentuk reaktor fusi berdasarkan konsep pembatasan gerak muatan ion dalam plasma tersebut, antara lain: *pertama*, reaktor dengan menekan inti reaksi melalui laser. Laser tersebut berperan untuk membantu mengionisasi partikel netral yang berada di kelereng bahan bakar (fuel bed), dikenal sebagai *initial confinement – fusion reactor*. *Kedua*, dengan menggunakan koil magnetik untuk mengarahkan gerak partikel bermuatan pada reaktor fusi sehingga pergerakannya dibatas pada diameter tertentu. Reaktor ini dikenal dengan *magnetic confinement – fusion reactor* (General Fusion, 2002).

Perkembangan yang paling pesat saat ini adalah reaktor dengan kungkungan koil magnetik, dikarenakan paling mudah diterima dan secara teknis diwujudkan saat ini. Salah satu proyek dunia yang focus mengembangkan reaktor fusi ini adalah ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) yang rencananya akan diselesaikan pada tahun 2050 di Cadarache, France (General Fusion, 2002).

Reaktor fusi ini sangatlah menjanjikan karena dapat menghasilkan energi yang lebih banyak dibanding kebutuhan energi yang saat ini diprediksikan. Misalkan, Uni-

Eropa yang harus mengimpor lebih dari 50% energinya, sehingga membuatnya menghutang lebih dari 240 miliar Euro setiap tahunnya. Semakin diperparah dengan peningkatan permintaan energi di Eropa menjadi 900 juta ton (Fusion for Energy, 2019)

Namun, masih banyak yang mensangsikan proyek ini dengan dalih resiko pengrusakan yang akan diakibatkan olehnya pada lingkungan, bahkan pada keberadaan bumi itu sendiri. Hal tersebut dikuatkan oleh kenyataan bahwa pembentukan fusi ini, layaknya pembentukan matahari dengan radius yang dibatasi.

Sehingga banyak yang beralih mengawinkan konsep fusi dan fisi, menginduksi reaksi fisi ke dalam reaktor fusi agar dapat menghasilkan plasma dan kondisi dimana kecapaian kondisi seimbang dan mandiri dari reaktor fusi itu sendiri. Konsep ini dikenal dengan reaktor hibrida – fisi fusi. Saat ini banyak dikembangkan oleh Russia (Yevgeny, 1977), China, Turkey, dan lainnya.

2. Metode

Dalam penulisan jurnal ini digunakan metode studi pustaka ataupun literatur revidu yang sangat diperlukan untuk mengokohkan landasan ilmu yang akan dipaparkan dalam penelitian ini.

Literatur revidu yang merupakan penjelasan baik dari teori, penemuan, maupun penelitian. Langkah ini lebih banyak dipakai untuk mem-*benchmark* pengetahuan umum agar memperkaya khazanah bahasan per-nuklir-an dalam bahasa Indonesia, selain juga memuat

analisis berupa kritik ilmiah yang didapat dari pembelajaran yang cukup panjang.

Literatur revidi ini banyak membahas ulasan, rangkuman ide dari berbagai penulis dan sumber pustaka yang berfokus pada topik reaktor nuklir. Memuat kelebihan dan kekurangan dari masing-masing tipe reaktor nuklir yang saat ini sedang digandrungi.

3. Hasil dan pembahasan

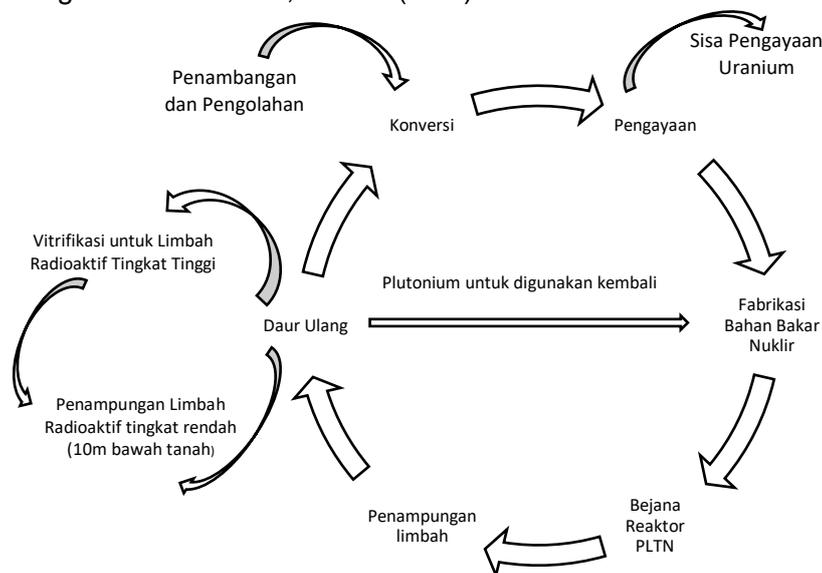
Penelitian ini membahas kelebihan dan kekurangan masing-masing tipe nuklir, sehingga dapat memberikan wawasan mengenai energi alternatif tersebut yang lebih komprehensif/menyeluruh.

a. Ketersediaan bahan bakar

Reaksi fisi lebih banyak menggunakan bahan uranium, seperti yang terlihat pada gambar 1. Proses pemecahan inti berat pada atom tersebut yang diakibatkan oleh tumbukan antara atom dengan neutron, akan menghasilkan produk fisi dan neutron yang lebih banyak lagi. Disampaikan Staf Ahli Menristek Bidang Energi dan Material Maju, Dr. Agus R. Hoetman, Rabu (5/12)

pada Seminar Diseminasi Penelitian dan Arah Kebijakan Penelitian Untuk Ketahanan Pangan dan Energi di Fakultas MIPA, “Kendati begitu pemenuhan kebutuhan energi masih bisa diantisipasi dengan pemanfaatan sumber energi terbarukan, salah satunya adalah uranium yang merupakan sumber energi nuklir. Ketersediaan uranium dunia diprediksikan dapat digunakan untuk memenuhi kebutuhan energi dunia hingga 3.600 tahun mendatang.”

Namun Uranium atau bahan bakar nuklir fisi ini tidak mudah diolah, perlu beberapa tahap fabrikasi yang harus ditempuh untuk menghasilkan bahan bakar fisil, diantaranya: dengan menambah dan mengolah uranium melalui teknik *open cut* atau dengan teknik terowongan, kemudian dikonversi menjadi gas uranium hexafluoride (UF_6), dan dikayakan untuk meningkatkan kadar U^{235} dalam bahan bakarnya. Gambaran visual dari proses tersebut ditunjukkan pada gambar 4 berikut.



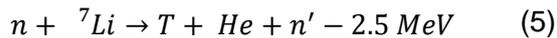
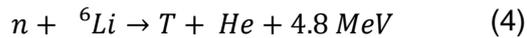
Gambar 4. Siklus bahan bakar nuklir Uranium

Begitu pula untuk reaktor fusi, seperti yang dipaparkan pada persamaan 1-3, bahwa kebanyakan bahan bakar fusi yang dipilih antara lain deuterium dan tritium. Selain karena, kedua atom yang bereaksi ini memiliki luas penampang peneyrapan neutron yang tinggi dibanding atom-atom ringan lainnya, sehingga kemungkinan

pembentukan reaksi fusinya semakin tinggi (Indah, 2015).

70% permukaan bumi yang merupakan air menandakan bahwa ketersediaan deuterium akan selalu ada hingga jutaan tahun lamanya. Sekitar 0,033 gram deuterium dapat diekstrak dari satu liter air (Djiono dkk., 1989). Sedangkan tritium yang kelimpahannya kecil di bumi,

sekitar (10^{-18} dari hidrogen dengan paruh hidup 12.3 tahun (Human Health Fact Sheet, 2001), tidak menjadikannya bahan bakar yang sulit didapatkan. Sudah sejak lama ditemukan bukti bahwa tritium dapat diproduksi dari interaksi antara neutron dan lithium (Marek, 2018). Dengan memanfaatkan lithium ini, tritium dapat dihasilkan dari reaksi berikut:



Pada persamaan 4 dan 5, dua isotop litium yang berinteraksi dengan neutron dapat menghasilkan tritium. Hal tersebut dapat menjadi solusi bagi keterbatasan bahan bakar tritium sebagai bahan bakar fusi. Seperti yang diketahui bahwa litium merupakan material yang mudah ditambang selama beberapa ratus tahun nanti.

Pada umumnya litium ini pun banyak digunakan sebagai komponen baterai di *gadget*, yang mana untuk satu baterai laptop dapat menghasilkan jumlah listrik yang sama dengan 40 ton batubara (IATA, 2019).

Sehingga dapat dipastikan bahwa kekhawatiran pada ketersediaan bahan bakar untuk reaktor nuklir dapat dihilangkan.

Teknik pembiakan tritium sendiri mengalami perkembangan pesat dan menjadi perhatian tersendiri dalam ilmu pengetahuan, salah satunya oleh Eropa untuk mengembangkan DEMO (reaktor fusi komersil yang akan ditargetkan beroperasi pada tahun 2050). Empat desain selimut yang menjadi andalan menjadi kandidat selimut DEMO (R. Lasser, 2006) antara lain:

a. HCLL (*Helium Cooled Lithium Lead*)

Selimut ini menggunakan Helium sebagai pendingin dan pengangkut panas yang lebih baik dibandingkan air, dan PbLi sebagai material pembiak tritium yang juga sekaligus berperan sebagai moderator untuk neutron spektrum tinggi.

b. HCPB (*Helium Cooled Pebble Bed*)

Desain yang menerapkan Helium sebagai pendingin, namun konsep pemampatan material pembiak tritiumnya menjadi bentuk *Pebble*, hal ini diharapkan dapat meningkatkan produk pembiakan tritium dalam selimut dan mudah secara fabrikasi.

c. WCLL (*Water Cooled Lithium Lead*)

Seperti halnya HCLL yang menggunakan PbLi sebagai material pembiak, namun selimut ini menggunakan air sebagai pendingin, hal tersebut ditimbang lebih efektif dalam memoderasi neutron dan mengangkut panas pada selimut.

d. WCPB (*Water Cooled Pebble Bed*)

Menggabungkan pendingin air dengan material keramik padatan sebagai pembiak tritium. Kelebihan dari bentuk *pebble bed* itu sendiri, selain yang dikemukakan sebelumnya pada HCPB, yaitu: tinggi titik termalnya dan mekanis materialnya yang stabil, rendah penyimpanan tritium dalam selimutnya, serta konduktivitas termal yang tinggi sehingga efisien dalam mengangkut panas, dan tidak mudah hancur dikarenakan radiasi.

Selengkapnya semua data keempat modul selimut reaktor fusi tersebut terdapat pada tabel 1 berikut.

Tabel 1. Rencana Material keempat modul selimut reaktor Fusi (S. Ciattaglia, dkk., 2005)

Tes	Model A	Model B	Model C	Model D
Fusion Power (GW)	5.0	3.6	3.4	2.5
Blanket Gain	1.18	1.39	1.17	1.17
Plant Efficiency	0.31	0.36	0.44	0.6
Bootstrap Fraction	0.45	0.43	0.63	0.76
P_{add} (MW)	246	270	112	71
H&CD Efficiency	0.6	0.6	0.7	0.7
DV Peak Load ($\text{MW}\cdot\text{m}^{-2}$)	15	10	10	5
Average neutron wall load	2.2	2.0	2.2	2.4
Major Radius (m)	9.55	8.6	7.5	6.1
Structural Material	Eurofer	Eurofer	Eurofer	SiC/ SiC

Coolant	Water	Helium	LiPb/Helium	LiPb
Breeder	LiPb	Li ₄ SiO ₄	LiPb	LiPb
TBR	1.06	1.12	1.15	1.12
Structural Material	CuCrZr	W Alloy	W Alloy	SiC/ SiC
Armour Material	W alloy	W Alloy	W Alloy	W Alloy
Coolant	Water	Helium	Helium	LiPb
Conversion Cycle	Rankine	Rankine	Brayton	Brayton

b. Energi yang dihasilkan

Salah satu yang membuat energi nuklir menjadi energi alternatif yang menjanjikan adalah energi yang dihasilkan, dibandingkan energi terbarukan lainnya, energi nuklir jauh memberikan kelimpahan energi, bahkan mengalahkan energi fosil berkali-kali lipat.

Energi nuklir fisi dapat menghasilkan energi sebesar 200 MeV. Salah satu reaksi fisi adalah reaksi antara Uranium dan neutron, yaitu



dengan massa reaktan dan produk sebagai berikut:

$m_u = 235,125 \text{ sma}$; $m_n = 1,009 \text{ sma}$, sehingga total massa reaktan $m_{reak} = 236,134 \text{ sma}$. Sedangkan untuk produk, $m_{Ba} = 140,958 \text{ sma}$; $m_{kr} = 91,926 \text{ sma}$; $m_{3n} = 3,027 \text{ sma}$, sehingga massa total produknya $m_{prod} = 235,911 \text{ sma}$. Namun dari total massa reaktan dan produk terdapat perbedaan yang kemudian menjadi energi yang dimanfaatkan pada pembangkit listrik.

$$E = \Delta m \cdot c^2 = (m_{reaktan} - m_{produk}) \cdot c^2, \text{ atau}$$

$$E = (m_{reaktan} - m_{produk})[sma] \cdot 931 \left[\frac{MeV}{sma} \right]$$

$$E = (236,134 - 235,911) \text{ sma} \cdot 931 \left[\frac{MeV}{sma} \right]$$

$$E \approx 207 \text{ MeV}$$

Energi itu berarti energi pembelahan inti yang dihasilkan untuk reaksi 235 gram U²³⁵ yang setara dengan energi yang dihasilkan pada pembakaran 500 ton batubara.

Sedangkan untuk reaksi fusi, lebih banyak energi yang dihasilkan dibandingkan, seperti contoh pada persamaan 3, reaksi DT.

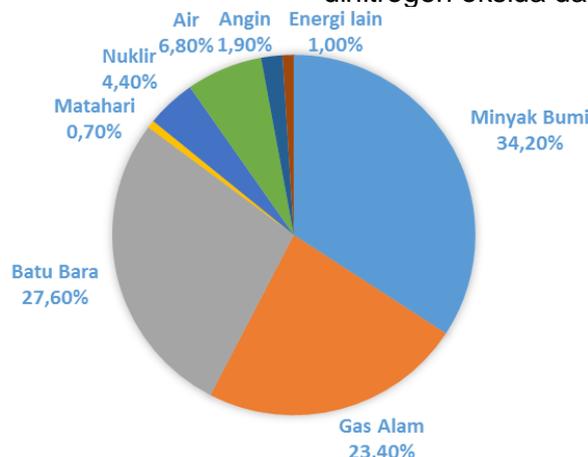
$m_D = 2,014102 \text{ sma}$; $m_T = 3,016049 \text{ sma}$, sehingga massa total reaktannya, $m_{reaktan} = 5,030151 \text{ sma}$. Selain itu, massa produknya, $m_{He} = 4,002602 \text{ sma}$; $m_n = 1,008665 \text{ sma}$, dan massa totalnya, $m_{produk} = 5,011267 \text{ sma}$. Jika dihitung selisih massanya sebesar, $\Delta m = 0,018884 \text{ sma}$. Maka energinya,

$$E = 0,018884 \text{ sma} \times 931 \left(\frac{MeV}{sma} \right) = 17,58 \text{ MeV}$$

Energi fusi yang dihasilkan dari satu kali reaksi sebanyak 17,58 MeV, yang 80% diantaranya atau sekitar 14.1 MeV akan diangkut oleh neutron dan kemudian akan dimanfaatkan sebagai energi pembangkit listriknya. Jumlah energi yang sangat fantastis!

c. Ramah Lingkungan

Dari data terakhir menunjukkan bahwa polusi yang ada di muka bumi ini paling banyak dikontribusikan dari penggunaan bahan bakar fosil, termasuk dinitrogen oksida dan karbon dioksida.



Gambar 5. Konsumsi Energi Global pada tahun 2017

Gambar 5 tersebut menunjukkan tingkat kebergantungan masyarakat dengan minyak bumi dan batubara yang jelas menghasilkan polusi udara yang tinggi.

Namun hal tersebut tidak begitu berbeda dengan reaktor fisi. Semua isotop *fisionabel* dan fisil mengalami sedikit fisi spontan, yang melepaskan beberapa neutron bebas ke bahan bakar nuklir. Selain itu, neutron yang terus diproduksi akan melakukan tumbukan dan mengalami proses fisi berantai yang tidak mudah dikontrol, terlebih jumlahnya dan juga pergerakannya yang begitu cepat yang mencapai 7% kecepatan cahaya.

Hal tersebut diperparah dengan produk fisi yang bersifat radioaktif, seperti Thorium, plutonium. Atom-atom tersebut juga rata-rata mempunyai umur yang panjang, bahkan melebihi umur bumi. Sehingga perlu adanya penanganan dan pengolahan terhadap limbah tersebut.

Berbeda dengan fisi, pembangkit listrik fusi 1000 MW dihasilkan dari bahan bakar sebanyak 100 kg deuterium dan tiga ton litium alami dalam setahun. Daya yang sebesar itu dapat menghasilkan 7000 MWh, yang setara dengan energi listrik yang dihasilkan dari 1.5 juta ton batubara. Di Eropa sendiri untuk konsumsi energi tersebut dapat menyumbangkan emisi gas rumah kaca sebesar 78% (Fusion for Energy, 2019).

Kenyataan di Indonesia saat ini untuk tiga PLTU batubara, yang tersebar di Indramayu, Banten, dan Rembang dapat menghasilkan daya sebesar 1700 MW/tahun serta CO₂ sebesar 16 ribu kTon (Rizki, 2013).

Oleh karena itu, pilihan energi fusi sebagai energi alternatif menjadi pilihan yang baik dikarenakan sedikit menghasilkan limbah, termasuk limbah radioaktif yang biasanya diproduksi oleh reaktor fisi. Tritium sendiri memang merupakan partikel radioaktif, namun Karena memiliki umur hidup yang pendek, sehingga tidak menjadi bahaya yang besar.

d. Tingkat keamanan yang tinggi

Reaktor fusi merupakan pembangkit listrik yang memanfaatkan pembakaran gas untuk menciptakan partikel berionisasi atau bermuatan. Hal tersebut tentunya merupakan bahan bakar dari reaksi fusi

yang harus mencapai wujud fasa plasma. Sistem keamanan yang ada dalam reaktor fusi sangatlah efektif, dimulai dari sistem pendinginan plasma yang mudah, jika adanya kerusakan yang memaksakan reaktor harus dimatikan. Hal tersebut dapat dilakukan karena kepadatan bahan bakar dalam inti reaksi sangat rendah, yaitu sekitar 1 gram bahan bakar deuterium atau tritium dalam kolom ruang 1000 m³. Tindakan semacam ini akan menghentikan situasi kebocoran partikel dalam sistem reaktor.

Bahan bakar deuterium dan litium, serta helium yang dihasilkan dalam reaksi fusi, tidak bersifat radioaktif. Ataupun reaksi fusi sendiri, yang tertera pada persamaan 1-3, tidak menghasilkan partikel gamma seperti reaksi fisi. Adapun tritium sebagai satu-satunya partikel yang radioaktif, namun dikarenakan memiliki perilaku meluruh yang sangat cepat, waktu paruhnya 12.6 tahun, sehingga menghasilkan elektron berenergi rendah (dalam kondisi peluruhan beta, mudah untuk dihalangi dibandingkan dengan partikel gamma). Terlebih dalam reaktor fusi, digunakan desain fabrikasi yang sangat menghindari kemungkinan adanya kebocoran reaktor. Desain fabrikasinya dirincikan sebagai berikut:

Pertama, sistem magnetik yang mengungkung partikel bermuatan untuk bergerak terbatas pada radius tertentu.

Kedua, *cryostat* yang berupa bangunan beton yang dapat mengurangi kemungkinan kebocoran neutron di lingkungan.

Ketiga, sistem selimut yang rumit yang memberikan skema penangkapan neutron dan partikel bermuatan (jika ada) dengan baik, bahkan mengolahnya menjadi bahan bakar fusi.

e. Tidak mengharuskan adanya pengangkutan limbah bahan radioaktif pada pembangkit listrik fusi

Reaktor fusi tidak menghasilkan limbah radioaktif (alasan yang telah dikemukakan sebelumnya), berbeda dengan reaktor fisi, sehingga mengurangi pembiayaan dalam manajemen limbah nuklir serta meningkatkan keamanan reaktor itu sendiri.

f. Partikel radiaktif yang berumur pendek

Neutron yang dihasilkan selama reaksi fusi akan berinteraksi dengan material di sekitar inti reaktor yang mengungkung partikel-partikel di dalamnya. Sehingga dibutuhkan alasan dan penelitian yang komprehensif untuk menemukan formulasi material di sekitar reaktor yang memastikan bertahan pada kondisi ekstrem panasnya plasma dan manajemen penanganan limbah radioaktif yang baik. Pilihan material yang baik ini akan memungkinkan material yang mengelilingi reaktor fusi dapat didaur ulang 100 tahun setelah pembangkit listrik berhenti beroperasi. Sehingga dibutuhkan baja konvensional seperti *cryostat* yang dapat setidaknya mencegah adanya bangunan bocor.

g. Tidak perlunya evakuasi penduduk

Dikarenakan kemungkinan kecil adanya kecelakaan reaktor fusi. Sehingga tidak dibutuhkan sistem evakuasi yang kerap kali ada di reaktor fisi atau sistem pembangkit listrik lainnya.

h. Harga yang ekonomis

Mencari alternatif energi tidak hanya berkenaan ketersediaannya yang melimpah untuk memenuhi kebutuhan energi makhluk yang semakin meningkat seiring dengan peningkatan populasi. Namun, diperlukan juga penggunaan energi yang murah.

Saat ini ada beberapa opsi pembangkit listrik nuklir (PLTN) di Eropa yang paling murah yaitu 2 unit (2136 Mwe) AEO Novovronezh dari Rusia, dan termahal adalah PLTN 2 unit (1000 Mwe) NEK Belene dari Bulgaria. Sedangkan di Amerika Serikat PLTN Bruce Power Alberta 2 unit (1100 Mwe) yang termurah dibandingkan yang lainnya (Mochamad Nasrullah, 2010).

Dari hasil perhitungan pengeluaran energy, untuk Negara Asia, Korea Selatan dan China menghasilkan energi nuklir yang termurah dari energi lain, rata-rata dan tertinggi adalah CGNPC Hongyanhe dari China, yang menunjukkan harga tarif listriknya rata-rata 40 mills/kWh.

Tambahan lainnya, ada beberapa kajian mengenai harga pembuatan bangunan PLTN oleh beberapa instansi, seperti Keystone Center pada tahun 2207 yang menunjukkan bahwa variasi harga

konstruksi PLTN berkisar US\$ 3600-4000/KW dengan harga listrik 8-11 cents/KWH, sedangkan dari Standard and Poor's and Moddy's, menyebutkan biayanya sebesar US\$ 5000-6000/KW (Fahmi, 2014)

Harga bahan bakar menunjukkan kestabilan tingginya dikarenakan bahan bakar uranium (contohnya) tidak mengikuti mekanisme harga pasar. Sedangkan material untuk pembangkit listrik cenderung nai, dikarenakan konstruksi besar-besaran di Negara-negara maju. Namun dari sekian data tersebut, total biaya termurah saat ini masih dimiliki oleh reaktor nuklir.

4. Simpulan

Perbedaan antara energi nuklir fisi dan fusi, baik dalam segi energi, keamanan reaktor, limbah radioaktif reaktor menjadi tantangan bagi masing-masing jenis reaktor, diantaranya:

- Jenis energi, reaksi fisi yang berupa pemecahan inti atom, sedangkan fusi merupakan reaksi penggabungan inti.
- Energi yang dihasilkan dari reaksi fisi untuk 235gram U^{235} sekitar 200 MeV, sedangkan reaksi fusi sekitar 14.1 MeV untuk setiap 1 gram Deuterium.
- Ketersediaan bahan bakar nuklir yang berbeda. Bahan bakar uranium yang cenderung rumit fabrikasinya dibandingkan deuterium (bahan bakar fusi) yang mudah dan melimpah di alam.
- Reaksi fusi membutuhkan skema penghasil bahan bakar sendiri (tritium) yang pada umumnya tidak dimiliki oleh reaktor fisi.
- Partikel gamma yang banyak dihasilkan dalam reaksi berantai fisi, tidak dihasilkan pada reaksi fusi, sehingga reaktor fusi cenderung lebih aman. Satu-satunya partikel radioaktif pada reaktor fusi, tritium, hanya memiliki waktu paruh hidup yang sebentar, sehingga akan meluruh dengan sendirinya, tanpa perlu manajemen yang rumit seperti reaktor fisi.
- Sistem keamanan yang tinggi pada reaktor fusi, sehingga memudahkan dalam sistem evakuasi.

Namun perlu ditekankan mengenai kedua energi nuklir ini yang begitu banyak

menghasilkan energi, melebihi kebutuhan dan bahkan umur bumi itu sendiri. Serta merupakan energi ramah lingkungan yang tidak menghasilkan karbon atau bahan lainnya yang kerap kali menyebabkan efek rumah kaca. Serta keamanan reaktor yang tinggi, keduanya memiliki sistem layar pelindung berlipat-lipat, mulai dari bagian asembli bahan bakar, beton pelindung, dan sebagainya.

Indonesia sendiri perlu saatnya berbenah untuk memulai menggunakan energi nuklir komersial, sehingga dapat menggunakan energinya yang begitu besar untuk memenuhi kebutuhan energi selain dari energi fosil.

Daftar pustaka

- ANL. 2001. *Tritium (Hydrogen-3)*. Human Health Fact Sheet.
- Djiono, dkk. 1989. *Deuterium dan oksigen-18 di dalam air hujan*. Risalah Pertemuan ilmiah tahunan. Pusat Aplikasi Isotop dan Radiasi BATAN. Jakarta: 77-83.
- Fahmi Munawar. 2014. *Potensi Energi Nuklir: Energi Baru dan Terbarukan*. Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Surabaya.
- Florian, dkk. 2019. *Influence of the Electrolyte Quantity on Lithium-Ion Cells*. *Journal of the Electrochemical Society*.
- Indah R. M., Putranto, I., Su'ud, Z. 2015. *Optimization of Tritium Breeding and Shielding Analysis to Plasma in ITER Fusion Reactor*. IOP.
- Rubel, M. 2018. *Fusion Neutrons: Tritium Breeding and Impact on Wall Material and Components of Diagnostic Systems*. *Journal of Fusion Energy*. 315–329.
- Nasrullah, M., Sriyana. 2010. *Harga dan Tarif Listrik PLTN di Dunia*. Pusat Pengembangan Energi Nuklir (BATAN).
- Budi, R. F. S., Suparman. 2013. *Perhitungan Faktor Emisi CO₂ PLTU Batubara dan PLTN*. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*.
- Lasser, R., dkk.. 2006. *Structural Materials for DEMO: Development, Testing,*

and Modelling. European Fusion Development Agreement (EFDA).

Clattaglia, S., dkk. 2005. *Overview of Safety of European Fusion Power Plant Design*. European Fusion Development Agreement (EFDA).

Smil, V. 2017. *Energy Transitions: Global and National Perspectives*. & *BP Statistical Review of World Energy*.

Diambil dari internet :

<https://fusionforenergy.europa.eu/understandingfusion/merits.aspx> (diakses 11 November 2019, pukul: 03:10)

<https://www.periodic-table.org/what-is-conservation-of-energy-in-nuclear-reactions-definition/> (diakses 06 Desember 2019, pukul: 17:48)