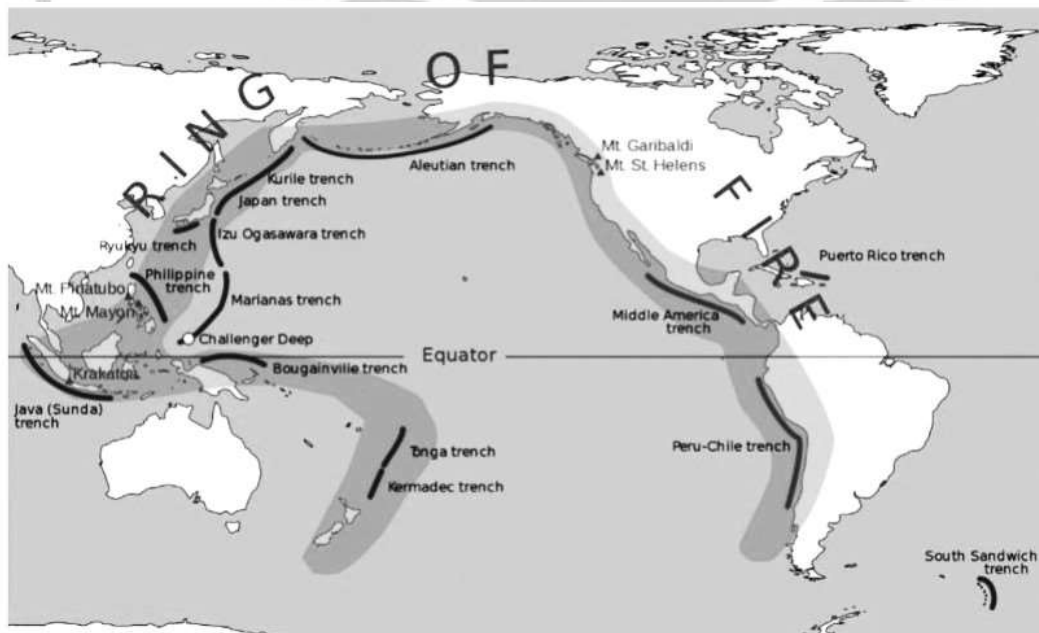


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Status Panas Bumi

Panas bumi adalah salah satu energi bersih dan energi terbarukan yang dapat menjadi salah satu tumpuan untuk mencapai target NZE tahun 2050 dan juga membantu proses dekarbonisasi sektor energi di dunia selain energi terbarukan lainnya seperti tenaga surya, tenaga air, biomassa, tenaga air laut, dan tenaga angin. Pengembangan panas bumi sangat tergantung dari temperatur dari sumber panas bumi (IRENA, 2023). Temperatur panas bumi digolongkan menjadi tiga grup yakni: temperatur tinggi (lebih dari 150 °C), temperatur menengah (90 – 150 °C) dan temperatur rendah (dibawah 90 °C). Panas bumi dengan sumber daya tinggi sangat menjanjikan untuk memproduksi listrik dan sangat layak secara ekonomi. Untuk panas bumi temperatur menengah dapat digunakan untuk keperluan industri (pemanasan dan pendinginan), dan juga untuk sektor pertanian dan perkebunan. Sumber daya panas bumi temperatur tinggi dan menengah yang cocok untuk dikembangkan sebagai Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) umumnya terletak di daerah *ring of fire* seperti di tunjukkan pada Gambar 2.1.



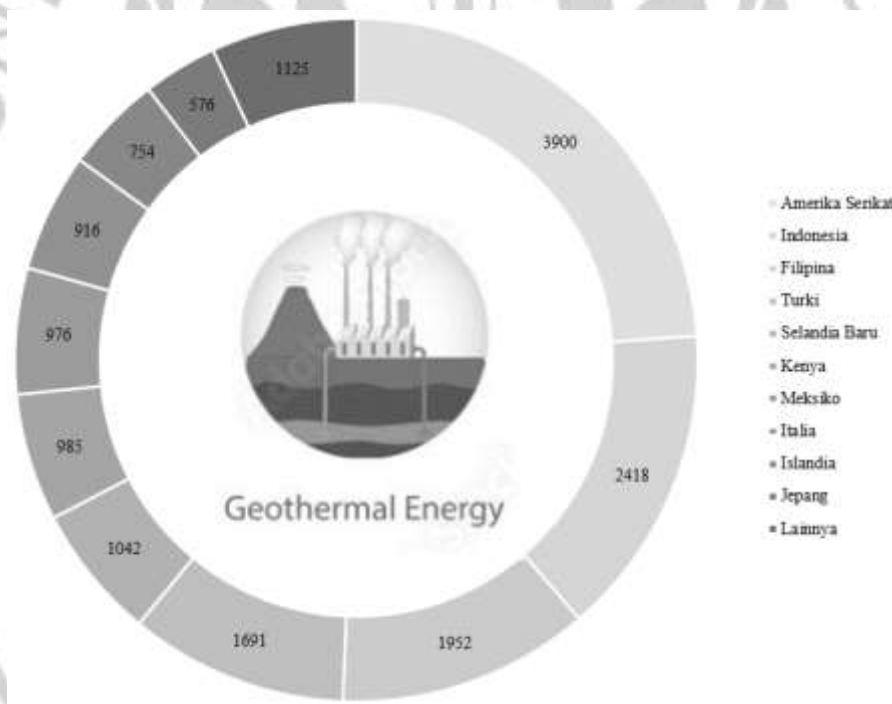
Gambar 2.1 *Ring of Fire* (R. Archer, 2020)

Secara teknis, potensi panas bumi di seluruh dunia adalah sebesar 200 GW (IRENA, 2023). Dari 200 GW tersebut yang sangat potensial untuk dikembangkan menjadi PLTP berkisar antara 70-80 GW yang tersebar di lebih dari 20 Negara (N. A. Pambudi, Dkk., 2023). Hingga pertengahan tahun 2023, total PLTP yang terpasang di seluruh dunia adalah sebesar 16.335 MW. Total kapasitas terpasang pada tahun 2025 diperkirakan sebesar 19.361 MW (Tasnuva Sharmin, Dkk, 2023), sehingga masih ada kekurangan sebesar 3.026 MW untuk mencapai target PLTP di tahun 2025.

Pengembangan potensi panas bumi masih menghadapi banyak tantangan untuk dikembangkan. Tantangan-tantangan yang dihadapi dalam pengembangan panas bumi antara lain:

- **Sosial:** Pada beberapa proyek pengembangan panas bumi mendapat penolakan dari kalangan masyarakat, dan beberapa organisasi masyarakat. Penolakan masyarakat pada umumnya terkait dengan akuisisi dan pemanfaatan lahan, kurangnya informasi terkait PLTP yang ramah lingkungan, masalah kerusakan lingkungan, ketakutan terhadap kontaminasi air konsumsi masyarakat dan polusi gas emisi yang dihasilkan.
- **Finansial:** Secara umum pengembang panas bumi kesulitan mendapatkan akses modal terutama pada tahap awal eksplorasi dimana panas bumi membutuhkan biaya yang cukup besar untuk pengeboran dan juga karena kompleksitas pengembangan dan resiko investasi.
- **Kebijakan dan Peraturan:** Banyak pengembangan dalam studi kelayakan tidak menguntungkan secara investasi. Hal ini membutuhkan kebijakan yang meringankan dan membantu pengembangan PLTP. Dari sisi peraturan banyak kesulitan dalam mendapatkan izin usaha panas bumi dan juga tumpang tindihnya peraturan pemerintah pusat dan pemerintah daerah.
- **Pasar:** Kurang kompetitifnya harga tarif listrik dan kesulitan mendapatkan *Power Purchase Agreement* (PPA) merupakan tantangan yang dihadapi oleh pengembang PLTP.
- **Teknologi:** Pengembangan teknologi dan inovasi diharapkan terus dikembangkan. Diharapkan kedepan dengan penelitian yang ada dapat menurunkan biaya produksi panas bumi dan mengurangi resiko ketersediaan sumber daya sehingga potensi panas bumi dapat dimanfaatkan dengan luas.

Hingga saat ini tercatat ada sepuluh negara yang masuk dalam kategori negara dengan PLTP terbesar di dunia dan lima diantaranya memiliki kapasitas terpasang lebih dari 1.000 MW. Negara-negara dengan kapasitas lebih dari 1.000 MW adalah, Amerika Serikat, Indonesia, Filipina, Turki, dan Selandia Baru (ThinkGeoEnergy, 2023). Kapasitas terpasang PLTP di dunia dapat dilihat pada Gambar 2.2. Walaupun terlihat besar, tetapi pada kenyataannya PLTP sebagai salah satu energi terbarukan hanya menyumbang 0,5% dari total energi terbarukan yang ada di dunia. Tiga besar pembangkit listrik energi terbarukan dunia berturut-turut adalah Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dan Pembangkit Listrik Tenaga Bayu (PLTB). PLTP dalam kurung waktu 20 tahun dari tahun 2000 sampai 2020 hanya tumbuh sebesar 3% (IRENA, 2023). Akan tetapi PLTP sebagai salah satu teknologi yang sudah terbukti diharapkan dapat tumbuh secara cepat. Tabel 2.1 menunjukkan kapasitas pembangkit dari energi terbarukan yang terpasang tahun 2021.



Gambar 2.2 Kapasitas PLTP Dunia (Diadaptasi dari ThinkGeoEnergy, 2023)

Tabel 2.1 Kapasitas Pembangkit Energi Terbarukan Dunia (diadaptasi dari IRENA, 2022)

Tipe Pembangkit	Kapasitas Terpasang (GW)	Persentase Kapasitas (%)
--------------------	--------------------------------	--------------------------------

PLTA	1230,0	40,1%
PLTS	849,5	27,7%
PLTB	824.9	26,9%
Bioenergi	143,4	4,7%
PLTP	16,0	0,5%
Energi Laut	0,5	0,02%

2.1.1 Panas Bumi Indonesia

Panas bumi di Indonesia dimulai sejak tahun awal tahun 1920an di daerah panas bumi Kamojang (E. H. Purwanto, 2019). Hingga saat ini sumur Kamojang ke-3 (KMJ-3) masih menghasilkan uap kering (LIPI, 2014). Pengembangan panas bumi di Indonesia kemudian berhenti dan baru dimulai kembali tahun 1970 an. Kegiatan eksplorasi panas bumi mulai dilakukan secara luas pada awal tahun 1970 dengan bantuan Pemerintah Perancis dan Selandia Baru untuk melakukan survei pendahuluan di seluruh wilayah Indonesia (Prashanti, 2010). Hasil survei tersebut menunjukkan bahwa potensi panas bumi Indonesia terletak pada *ring of fire* jalur vulkanik yang tersebar pada bagian barat pulau Sumatra, selatan pulau Jawa sampai Nusa Tenggara dan kemudian naik ke pulau Sulawesi, dan Maluku. Sebaran panas bumi di Indonesia bisa dilihat pada Gambar 2.3.

Panas bumi di Indonesia secara umum adalah sistem hidrotermal yang mempunyai temperatur lebih dari 225 °C dan hanya sedikit sistem hidrotermal dengan temperatur lebih rendah antara 150 – 225 °C (Nasruddin, Dkk., 2015). Dengan 2418 MW kapasitas terpasang dengan 23.965 MW potensi panas bumi, maka baru 10% dari potensi panas bumi yang dimanfaatkan untuk PLTP. Sama dengan rata-rata kapasitas PLTP yang terpasang secara nasional, pulau Sumatra juga memiliki potensi sebesar 9.460 Mwe dengan kapasitas terpasang hingga saat ini sebesar 982 Mwe atau sebesar 10% dari total potensinya. Pulau Sumatra memiliki potensi panas bumi terbesar di Indonesia. Dengan masih ada 90% potensi panas bumi yang dimiliki, tentu sangat menjanjikan pulau Sumatra sebagai pulau untuk memproduksi Hidrogen hijau.



Gambar 2.3 Potensi Panas Bumi Indonesia (ESDM, 2024)

Pulau Sumatra memiliki potensi cadangan sebesar 7.335 MW dengan rencana pengembangan sebesar 2.987 MW dan hingga pertengahan tahun 2023 kapasitas PLTP yang terpasang sebesar 982,15 MW. Rasio kapasitas terpasang dengan rencana pengembangan hingga saat ini adalah sebesar 33% dan rasio kapasitas terpasang dengan cadangan potensi panas bumi sebesar 13%. Artinya ruang panas bumi untuk dikembangkan di pulau Sumatra sangat terbuka. Potensi panas bumi pulau Sumatra dapat dilihat pada tabel 2.2. Hingga saat ini walaupun panas bumi di Indonesia sudah menjadi teknologi yang terbukti handal dan sangat layak dikembangkan, Indonesia masih dihadapkan kepada berbagai tantangan untuk mengembangkan panas bumi secara cepat.

Untuk pulau Sumatra sendiri tantangan yang ada adalah kebanyakan wilayah kerja atau wilayah potensi panas bumi-nya masuk ke kawasan hutan konservasi dan hutan lindung. Seperti umumnya pengembangan panas bumi juga mengalami tantangan dari isu sosial, penolakan dari komunitas lokal, isu lingkungan hidup dan juga masalah akses terhadap modal dan resiko yang sangat besar untuk pengembangan panas bumi.

Usaha panas bumi memiliki tantangan unik yang pada akhirnya sangat menentukan bagaimana bisnis panas bumi dapat berkembang dan bagaimana pihak-pihak yang terkait dengan usaha panas bumi dapat membuat keputusan. Resiko yang dapat terjadi dalam pengembangan panas bumi, serta karakteristik lainnya yang mempengaruhi industri ini, seperti kebutuhan modal awal yang tinggi hingga dinamika pasar yang sangat dinamis. Macam-macam risiko yang ada pada

bisnis panas bumi, mulai dari tahap eksplorasi hingga operasional. Resiko dalam usaha panas bumi meliputi resiko sumber daya, resiko finansial, hingga regulasi dan tata kelola.

Resiko regulasi yang dapat diidentifikasi dalam pengembangan PLTP antara lain:

- a. Permen ESDM 37/2018. Dalam permen ini diatur tentang perjanjian jual beli listrik (PJBL). Dalam proses negosiasi antara PLN dan pengembang untuk dapat mencapai kata sepakat dalam PJBL dapat memakan waktu yang sangat lama yakni 2-3 tahun. Sebagian besar pengembangan panas bumi menggunakan Lembaga keuangan untuk memberikan pinjaman dan PJBL merupakan salah satu syarat dari lembaga keuangan. Dengan adanya PJBL terdapat jaminan cash flow dari proyek pengembangan Panas Bumi tersebut. PJBL ditentukan setelah pengembang melakukan usaha eksplorasi dimana dalam usaha eksplorasi dibutuhkan biaya yang sangat besar. PJBL diharapkan oleh pengembang dapat ditentukan sebelum usaha eksplorasi dilakukan sehingga diharapkan lembaga pembiayaan dapat berperan dalam usaha eksplorasi. Pengembang juga mengalami kendala dalam menentukan penganggaran (*budgeting*) karena belum adanya PJBL sehingga dalam menentukan rencana anggaran hanya berdasarkan harga asumsi.
- b. Pemenuhan Tingkat Kandungan Dalam Negeri (TKDN). Pemenuhan Tingkat Kandungan Dalam Negeri (TKDN) merupakan salah satu syarat yang harus dipenuhi oleh pengembang dalam Pembangunan pembangkit listrik tenaga panas bumi. Pemenuhan TKDN diatur dalam Pasal 94 Peraturan Pemerintah nomor 7/2017, pengembang diwajibkan mengutamakan penggunaan barang, jasa, teknologi, serta kemampuan rekayasa dan rancang bangun dari dalam negeri. Selain itu kewajiban TKDN untuk PLTP juga diperkuat melalui Permenperin 54/2012. Peraturan yang menyangkut TKDN ini merupakan salah satu risiko bagi para pengembang PLTP, di mana banyak komponen PLTP tidak tersedia di pasar dalam negeri. Hal ini merupakan salah satu tantangan bagi pengembang untuk memenuhi standar TKDN yang ditetapkan. Secara rata-rata, kemampuan pengembang dalam memenuhi TKDN dalam pembangunan PLTP baru mencapai 24% dari proporsi 33% yang telah ditentukan oleh pemerintah.
- c. Perizinan. Seperti lumrahnya yang terjadi dalam pengembangan bisnis di Indonesia adalah masalah perizinan. Masalah klasik terkait proses perizinan yang lama juga terjadi di sektor pengembangan panas bumi. Perizinan yang sangat penting bagi pengembangan panas bumi,

seperti persetujuan lingkungan, KKPR (Kesepakatan Kerjasama Pemanfaatan Ruang), dan Persetujuan Penggunaan Kawasan Hutan (PPKH). Para pengembang sektor panas bumi mempunyai total waktu 7 tahun untuk mengembangkan panas bumi termasuk didalamnya kegiatan eksplorasi dan eksploitasi. Dengan semakin rumitnya jalan mendapatkan perizinan berusaha di bidang panas bumi tentu saja akan mempengaruhi kelayakan ekonomi dari proyek panas bumi.

- d. Insentif Pemerintah. Insentif dari pemerintah dibutuhkan oleh para pengembang karena dengan tarif listrik yang ada saat ini masih belum mencapai harga keekonomiannya. Pemerintah sendiri telah memberikan sejumlah kebijakan fiskal untuk kegiatan panas bumi seperti pengurangan tarif penghasilan, pengurangan pajak bumi dan bangunan dan pembebasan bea masuk untuk komponen-komponen PLTP. Hal ini digunakan untuk menarik minat investor untuk mengembangkan usaha panas bumi di Indonesia.
- e. Tarif listrik. Untuk saat ini tarif listrik panas bumi di atur pada Peraturan Presiden nomor 112 tahun 2022. Tarif yang ada saat ini masih belum layak secara ekonomi. Harga patokan tertinggi PLTP di tahun pertama hingga sepuluh tahun dengan kapasitas sampai dengan 10 MW senilai USD Sen 9,76/KWh, sedangkan di atas 100 MW senilai USD Sen 7,65/KWh. Saat ini perhitungan keekonomian panas bumi lebih dari USD Sen 10/Kwh.

Tabel 2.2 Potensi Panas Bumi Sumatra (diadaptasi dari ESDM, 2017)

	Potensi (MWe)					Kapasitas Terpasan g (MWe)	Rencana Pengembangan	
	Sumber Daya (MWe)		Cadangan (MWe)				Tahun	Mwe
	Spekulatif	Hipotesis	Terduga	Mungkin	Terbukti			
PROVINSI ACEH								
WKP GEUREUDONG	100		160				2025	55
WKP JABOI	75		50				2019	10
WKP SEULAWAH AGAM		63	282				2024/2025	110
POTENSI ALUE LONG - BANGGA	100							
POTENSI ALUR CANANG	25							
POTENSI BRAWANG BUAYA	25							
POTENSI DOLOK PERKIRAPAN	25							
POTENSI G. KEMBAR			107					
POTENSI KAFI	25							
POTENSI KALOI	10	15						
POTENSI LOKOP		45						
POTENSI MERANTI	25							
POTENSI SILIH NARA	100							
POTENSI SIMPANG BALIK	100							
POTENSI TANGSE	25							
PROVINSI SUMATERA UTARA								
WKP SORIK MARAPI - ROBURAN - SAMPURAGA			200			188,95	2017-2026	240
WKP SIPOHOLON RIA RIA	25		147				2023	20
WKP SIMBOLON SAMOSIR			150				2025	110
WKP GUNUNG SIBUAL-BUALI		100	576	160	310	330	2016-2018	330
WKP GUNUNG SIBAYAK – GUNUNG	25	34	15	20	20	12	1998-2008	12
POTENSI DOLOK MARAWA	36		52					
POTENSI PINCURAK	50							
POTENSI SIBUBUHAN	100							
PROVINSI SUMATERA BARAT								
WKP BONJOL		140	200				2025	60
WKP GUNUNG TALANG - BUKIT KILI		24	66				2022	20
WKP LIKI PINANGAWAN - MUARALABOH			73		60	85	2019/2024	220
POTENSI CUBADAK			70					
POTENSI KOTA BARU MERAPI	25							
POTENSI LUBUK SIKAPING	100							
POTENSI MANINJAU	25							
POTENSI PANTI			25					
POTENSI PARIANGAN			25	31				
POTENSI SIMISUH			40	57				
POTENSI SITUJUJUH	25							
POTENSI SUMANI	48		52					
POTENSI SURIAN	75							
POTENSI TALAGO BIRU		27						
POTENSI TALU		8						
PROVINSI RIAU								
POTENSI KEPANASAN	10							
POTENSI PASIR PANGARAIAN	25							
POTENSI SAHILAN	5							
POTENSI SUNGAI PINANG	5							

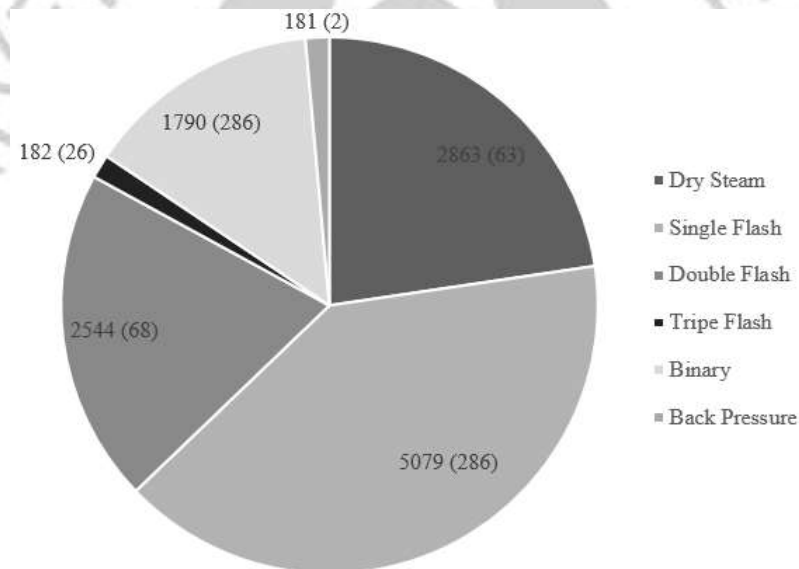
	Potensi (MWe)					Kapasitas Terpasan g (MWe)	Rencana	
	Sumber Daya (MWe)		Cadangan (MWe)				Pengembangan Tahun	Mwe
	Spekulatif	Hipotesis	Terduga	Mungkin	Terbukti			
PROVINSI JAMBI								
WKP GRAHO NYABU	225		200				2025	110
WKP SUNGAI PENUH			308	145	60		2020-2023	145
POTENSI GERAGAI	2	3						
POTENSI G. KACA	25							
POTENSI G. KAPUR	36							
POTENSI SUNGAI BETUNG	100							
POTENSI SUNGAI TENANG		74						
PROVINSI BENGKULU								
WKP KEPAHIANG	74		180				2025	110
WKP HULUAIS	225	223	350	180	70		2019-2025	340
POTENSI SUBAN AYAM	25							
PROVINSI BANGKA BELITUNG								
POTENSI TERAK	5							
POTENSI BUDING	5							
POTENSI DENDANG	10							
POTENSI NYELANDING	5							
POTENSI PEMALI	5							
POTENSI PERMIS	10							
POTENSI SUNGAI LIAT/PELAWAN	25							
PROVINSI SUMATERA SELATAN								
WKP DANAU RANAU			210				2022	40
WKP LUMUT BALAI - MARGABAYUI	225	386	544	130	120	55	2018-2024	285
WKP RANTAU DEDAP		193	13		92	91,2	2020/2026	220
WKP TANJUNG SAKTI			70				2025	55
POTENSI WAI SELABUNG		60	70					
PROVINSI LAMPUNG								
WKP GUNUNG RAJABASA			58	225				
WKP SEKINCAU	25		378				2025	220
WKP WAY RATAI	225		105				2022	55
WKP GUNUNG WAYPANAS		156	380		185	220	2012-2017	220
POTENSI NATAR	25							
POTENSI FAJAR BULAN	100							
POTENSI SUOH ANTATAI		163	300					
POTENSI WAI UMPU		40	14					
			5470	948	917			
				7335		982,15		2987

2.2 Teknologi PLTP WKP. XYZ

Energi panas bumi yang dimanfaatkan menjadi listrik merupakan energi listrik yang ramah lingkungan dan tidak menimbulkan emisi karbon. Emisi karbon dioksida dari pembangkit listrik tenaga baru bara 12 kali lebih besar dari PLTP dan pembangkit listrik tenaga gas lebih tinggi 6 kali dari PLTP (Ngangkham M., 2012). Keuntungan lain dari PLTP adalah kemampuannya untuk memproduksi listrik secara berkesinambungan karena produksi bahan baku panas bumi yang tidak tergantung pada cuaca.

Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) saat ini terdiri dari empat pilihan teknologi yang umum dikembangkan, yakni *Dry Steam* PLTP, *Flash* PLTP, *Binary* PLTP, dan *Combined-cycle* PLTP (P. Amelia Nisa, 2010). Gambar 2.4 menunjukkan persentase energi yang dihasilkan dari teknologi PLTP dan jumlah unit yang terpasang.

Panas bumi di Indonesia didominasi oleh sistem dua fasa yang merupakan sistem dominasi uap atau sistem dominasi air. Sistem dominasi uap merupakan sistem yang jarang dijumpai (P. Amelia Nisa, 2010). WKP. XYZ juga merupakan sistem dua fasa dimana untuk sistem ini teknologi *Flash* PLTP, dan *Combined-cycle* PLTP merupakan teknologi yang memungkinkan untuk dipakai.

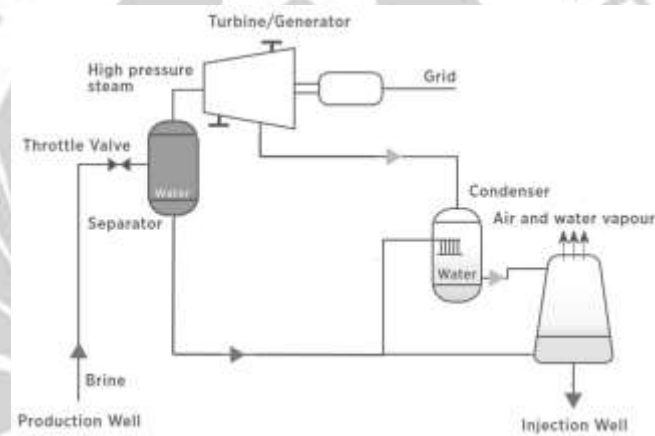


Gambar 2.4 Kapasitas PLTP Terpasang dan Jumlah Unit (C.O. Colpan, Dkk., 2021)

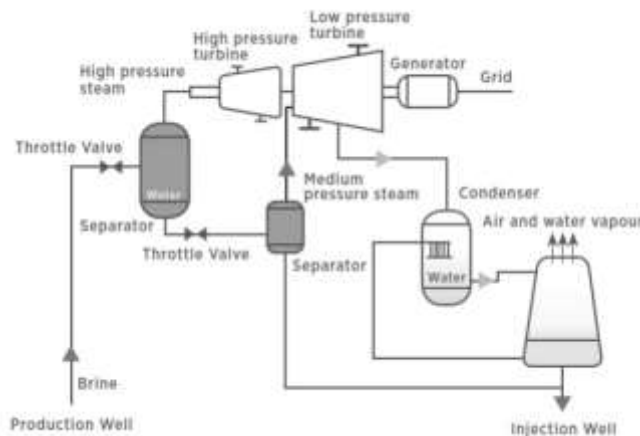
2.2.1 *Flash steam* PLTP

Tipe teknologi ini merupakan teknologi yang paling banyak dipakai di dunia saat ini. Kebanyakan tipe fluida panas bumi yang ada di dunia dan Indonesia pada khususnya adalah fluida dua fasa yang merupakan campuran antara uap dan air (*brine*). Terdapat dua tipe *flash steam* PLTP, yakni *Single-flash* PLTP dan *Double-flash* PLTP (R. DiPippo, 2007). Karena fluida yang keluar dari perut bumi mempunyai tipe dua fasa, maka campuran antara uap dan air memerlukan pemisahan. Pemisahan uap dan air dilakukan pada bejana tekan yang dinamakan *separator*. Setelah terjadi pemisahan antara uap dan air *brine*, maka proses selanjutnya dari uap panas akan

sama dengan sistem dari *dry steam* PLTP. Air *brine* dari *separator* yang masih panas akan diinjeksikan kembali pada perut bumi. Pada tipe *flash-steam* PLTP akan ada dua tipe sumur injeksi yakni sumur injeksi panas dan sumur injeksi dingin. Pada system *Double-flash* PLTP, terdapat dua kali pemisahan uap dan air yakni pemisahan tekanan tinggi pada *separator* pertama dan *brine* yang keluar dari *separator* pertama akan dipisahkan kembali uap dan *brine* nya pada *separator* tekanan rendah. Perbedaan utama dari *single-flash* PLTP dan *double-flash* PLTP adalah terdapat tambahan *separator* tekanan rendah pada *Double-flash* PLTP dan juga input masukan uap tekanan rendah pada turbin uap (T. Parikhani, Dkk., 2021). Skema dari *Single-flash* dapat dilihat pada Gambar 2.5 dan *Double-flash* PLTP dapat dilihat pada Gambar 2.6.



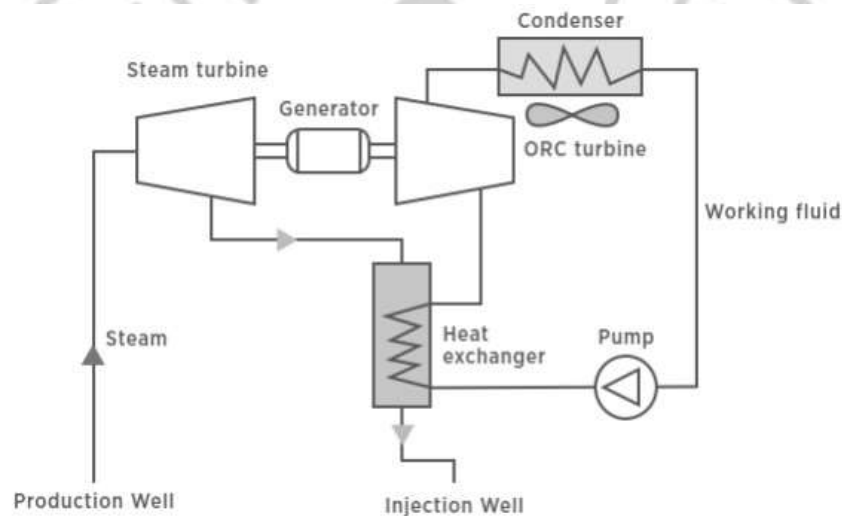
Gambar 2.5 Skema *Single-flash* PLTP (IRENA, 2017)



Gambar 2.6 Skema *Double-flash* PLTP (IRENA, 2017)

2.2.2 Combined-cycle PLTP

Beberapa PLTP di dunia menggunakan *Combined-cycle* PLTP dimana sistem *flash* PLTP atau *dry steam* PLTP di kombinasikan dengan *Binary* PLTP (Ceyhun Yilmaz, Dkk., 2015). Secara prinsip pemisahan fluida uap dan *brine* dilakukan seperti sistem *flash*, uap akan digunakan untuk untuk memutar turbin uap untuk menghasilkan listrik dan *brine* yang ada akan digunakan untuk system pada *Binary* PLTP (I. Bombarda, Dkk, 1998). Kombinasi dari dua teknologi PLTP ini digunakan untuk meningkatkan efisiensi dari PLTP. Skema dari *Combined-cycle* PLTP dapat dilihat pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Skema *Combined-cycle* PLTP (IRENA, 2017)

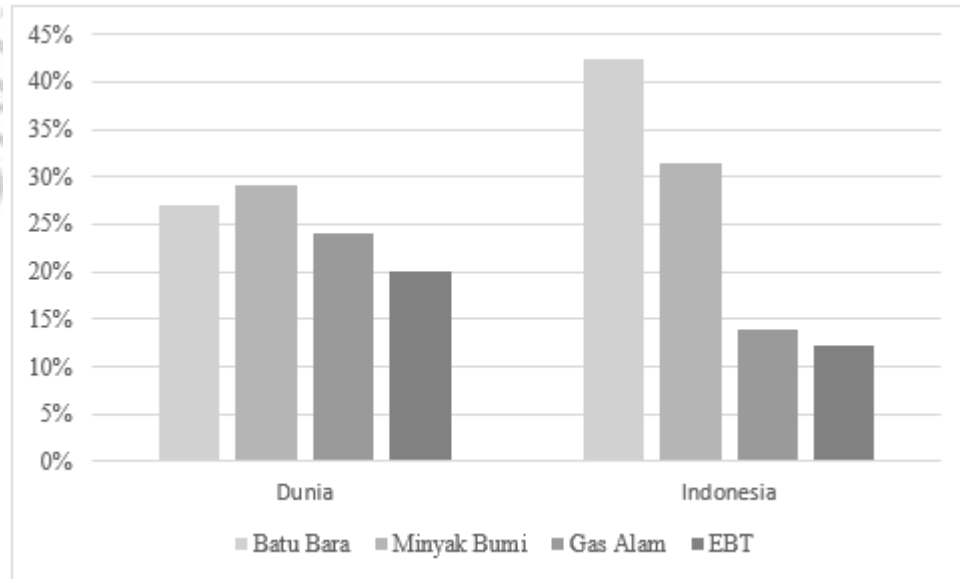
Hidrogen dapat dihasilkan dari proses elektrolisis air menggunakan energi listrik. Hidrogen yang dihasilkan dari energi listrik yang bersumber dari energi baru dan terbarukan merupakan hidrogen hijau dan akan menjadikan hidrogen yang dihasilkan sebagai sumber energi hijau yang dapat mengurangi emisi gas rumah kaca.

2.3 Status Hidrogen

Banyak negara di dunia, terutama untuk negara-negara berkembang, sangat bergantung pada energi fosil, tetapi juga merasakan dampak luar biasa terhadap lingkungan dan juga sumber daya fosil yang sangat terbatas (Bina, dkk, 2016). Pengembangan energi baru dan terbarukan diharapkan dapat mengatasi ketergantungan negara-negara terhadap energi fosil. Tidak seperti energi fosil, energi baru dan terbarukan (EBT) tidak menimbulkan polusi yang berdampak pada lingkungan,

rendah karbon dan dengan kemajuan teknologi saat ini, memungkinkan untuk dikembangkan (Mohammad-Ebrahim R., dkk, 2016).

Energi baru dan terbarukan di dunia dan Indonesia belum dikembangkan secara maksimal. Energi fosil masih merupakan sumber energi terbesar yang di manfaatkan. Hal ini tercermin dalam bauran energi dunia, dimana hingga tahun 2021, minyak bumi, batu bara, EBT dan gas bumi masing-masing sebesar 29%, 27%, 24% dan 20% (IEA, 2023). Untuk Indonesia sendiri bauran energi juga masih didominasi oleh energi fosil dimana batu bara yang mempunyai emisi gas buang paling besar masih mendominasi. Bauran energi Indonesia secara berturut-turut didominasi oleh batu bara, minyak bumi, gas alam dan EBT sebesar 42,3%, 31,4%, 13,92 % dan 12,3% (ESDM, 2023). Bauran energi dunia dan Indonesia dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Bauran Energi (IEA, 2023 dan ESDM, 2023)

Dari data yang ada, menunjukkan pengembangan EBT di Indonesia secara rata-rata masih jauh tertinggal. Indonesia mempunyai target bauran energi EBT sebesar 23% pada tahun 2025 (DEN, 2023). Target bauran EBT sepertinya tidak dapat tercapai pada tahun 2025. Perlu adanya komitmen yang besar dari Pemerintah untuk dapat mewujudkan capaian EBT dalam upaya untuk mencapai target bauran EBT dan NZE pada tahun 2060.

Hidrogen hijau mulai dikembangkan oleh beberapa negara sebagai upaya untuk mencapai target *Net Zero Emission* (NZE) pada tahun 2050-2060. Hidrogen memegang peranan penting

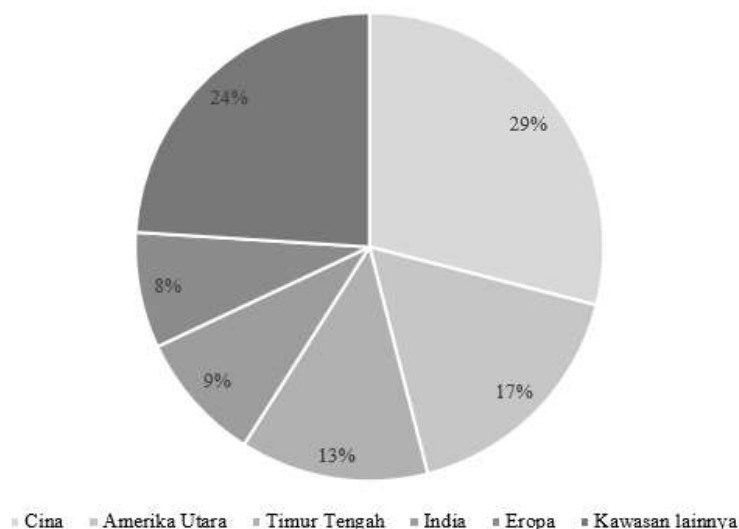
untuk membatasi pemanasan global 1,5 derajat C pada tahun 2050 (Hidrogen Council, 2021). Target NZE merupakan komitmen Bersama-sama dari seluruh negara untuk dapat menghindari dampak perubahan iklim dan juga mengurangi emisi gas rumah kaca (GRK). Hidrogen dapat diproduksi pada skala industri tanpa bergantung pada kondisi lingkungan yang terjadi pada beberapa energi terbarukan seperti, tenaga angin, tenaga surya dan tenaga energi laut (Li C., Dkk, 2022). Keunggulan lain dari hidrogen adalah dapat diproduksi dengan berbagai teknologi sehingga dapat menyesuaikan dengan kondisi tiap-tiap negara. Oleh karena itu hidrogen diprediksi akan berkembang pesat di masa yang akan datang dan akan sangat berdampak pada perkembangan peradaban manusia (Phuoc-Anh Le, Dkk, 2023).

Di masa yang akan datang hidrogen akan menjadi revolusi energi yang dapat mengganti energi fosil. Perubahan pemakaian energi dari energi fosil menjadi energi baru dan terbarukan merupakan respon atas tantangan perubahan iklim dan dampak terhadap lingkungan. Dari banyak studi, hidrogen dianggap sebagai komponen utama dalam rencana pengembangan energi yang berkelanjutan yang dapat secara signifikan dapat mengurangi polusi udara, perubahan iklim dan pemanasan global (Yue M., Dkk, 2020).

2.3.1 Kebutuhan Hidrogen

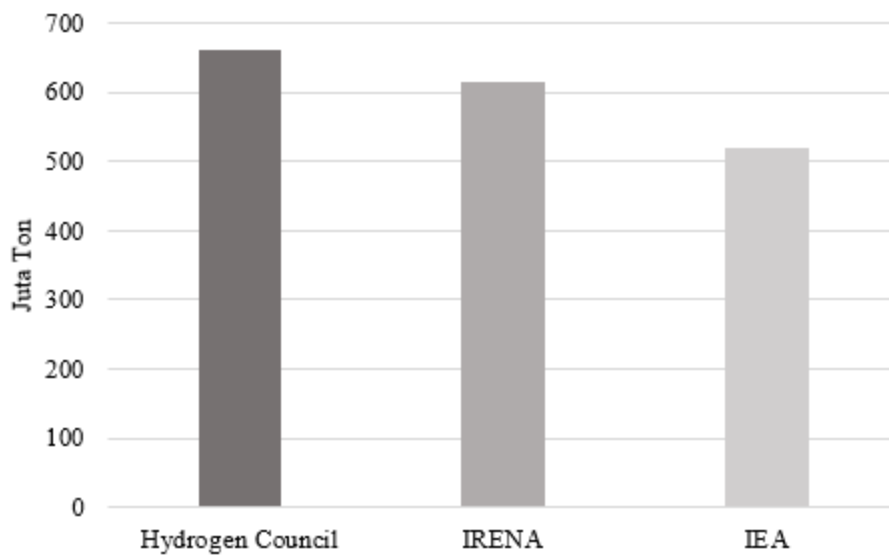
Kebutuhan hidrogen di seluruh dunia mencapai 95 Mt pada tahun 2022 dan masih terus tumbuh walaupun dengan adanya pandemi Covid-19 dan perlambatan pertumbuhan ekonomi dunia (IEA, 2023). Cina merupakan pangsa pasar terbesar pada tahun 2022, diikuti dengan kawasan Amerika Utara, Timur tengah dan kawasan lainnya. Hampir semua kawasan mengalami peningkatan kebutuhan hidrogen kecuali dikawasan Eropa. Kebutuhan hidrogen dunia berdasarkan kawasan dapat dilihat pada Gambar 2.9

Kebutuhan Hidrogen Tahun 2022



Gambar 2.9 Kebutuhan Hidrogen Tahun 2022 (IEA, 2023)

Dunia membutuhkan 660 Mt hidrogen untuk mencapai NZE pada tahun 2050 (Hidrogen Council, 2023). Nilai ini meningkat 7,5 kali lipat dibandingkan kebutuhan tahun 2020. Dua lembaga dunia IRENA dan IEA juga memproyeksikan kenaikan yang sangat besar terhadap kebutuhan hidrogen. Proyeksi pasar hidrogen dunia menurut beberapa lembaga pada tahun 2050 dapat dilihat pada Gambar 2.10. Hingga saat ini hidrogen yang ada di dunia didominasi dari energi fosil. 48% hidrogen di dunia di dapatkan dari natural gas, 18% diproduksi dari batu bara, dan 30% di produksi dari minyak bumi. Elektrolisis air dan listrik dipakai untuk memproduksi hidrogen hanya sebesar 4% (Jaradat M., Dkk, 2022). Dengan proyeksi kebutuhan yang meningkat di tahun 2050, kebutuhan hidrogen dari EBT diperkirakan sebesar 70% dari kebutuhan total hidrogen dunia. Dengan sangat besarnya kebutuhan hidrogen bersih yang berasal dari EBT, maka hal ini harusnya sebagai momentum untuk seluruh dunia mengembangkan energi EBT, termasuk didalamnya hidrogen bersih.



Gambar 2.10 Proyeksi Kebutuhan Hidrogen Tahun 2050 (Hydrogen Council, IRENA, IEA, 2023)

Konsumsi hidrogen di Indonesia saat ini sekitar 1,75 juta ton per tahun (IEA, 2022), yang didominasi oleh urea (88%), amonia (4%), dan kilang minyak (2%) (ESDM, 2023). Gas bumi adalah sumber sebagian besar hidrogen yang digunakan industri saat ini. Sektor industri memainkan peran penting dalam pertumbuhan ekonomi, dan 11,2 persen dari produksi gas nasional untuk industri saat ini digunakan sebagai bahan baku industri pupuk untuk memproduksi hidrogen dan amonia (Kemenperin, 2023).

Lima industri yang paling banyak menggunakan gas bumi pada tahun 2022 adalah pupuk, petrokimia, logam, kertas, dan keramik, yang masing-masing membutuhkan 81,5 persen dari total penggunaan gas bumi (ESDM, 2023). Industri pupuk dan petrokimia adalah yang paling banyak menggunakan gas bumi pada tahun tersebut. Gas bumi digunakan untuk membuat hidrogen selain untuk memenuhi kebutuhan energi. Indonesia adalah pengeksport amonia terbesar ketiga di dunia setelah Rusia dan Trinidad dan Tobago (JICA, 2019). Kapasitas produksi amonia Indonesia saat ini sekitar 7 juta ton per tahun, dengan konsumsi domestik sekitar 1,6 juta ton dan ekspor sekitar 1,8 juta ton, sehingga pemanfaatannya sekitar 50%. Dengan demikian, kapasitas produksinya relatif memadai.

Tahun 2024 akan menjadi kunci bagi Indonesia untuk memulai dan mengembangkan produksi hidrogen. Beberapa fakta yang akan mendukung pengembangan industri hidrogen di Indonesia adalah (Jhanesta, W. 2023):

- Proyek produksi hidrokarbon rendah karbon yang diumumkan memiliki kapasitas produksi sebesar 3,18 *million tons per annum* (MTPA) pada akhir 2023 dengan estimasi total investasi sebesar US\$ 35,75 miliar.
- Energi panas bumi menjadi sumber energi terbarukan yang dominan sebagai sumber penghasil hidrogen hijau dengan kapasitas 25% dari total kapasitas produksi yang di umumkan.
- Tiga lokasi utama penghasil hidrogen hijau adalah, Sumatra Utara, Kalimantan Timur dan Sumatra Selatan, dengan kapasitas produksi sebesar 35%, 18%, dan 11%.
- Beberapa penyedia elektrolizer seperti, ThyssenKrupp, Nel, John Cockerill, dan Siemens Energy, telah menyatakan ketertarikan terhadap proyek-proyek tersebut, walaupun belum menandatangani perjanjian.
- Industri ammonia akan memegang peranan penting sebagai konsumen hidrogen dengan proyeksi kebutuhan sebesar 2 MTPA pada tahun 2060.
- Terdapat beberapa peluang untuk ekspor hidrogen dengan kebutuhan hidrogen yang tinggi di negara Singapura, Korea Selatan, Jepang dan negara lainnya.

Pengembangan yang signifikan diharapkan akan terjadi pada tahun 2024 dengan adanya regulasi tentang hidrogen, peta jalan hidrogen, pasar dan kebutuhan hidrogen dunia. Hal ini diharapkan akan dapat menciptakan ekosistem hidrogen di dalam negeri.

2.3.2 Kebijakan Negara

Terminologi warna digunakan untuk membedakan tipe hidrogen berdasarkan metode produksi dan bahan bakunya: hidrogen abu-abu dari gasifikasi baru bara, hidrogen biru dari *steam methane reforming* (SMR), dan hidrogen hijau dari elektrolisis air menggunakan EBT (Noussan, M., Dkk., 2021). Penjelasan mengenai warna-warna hidrogen akan dijelaskan lebih lanjut pada sub bab 2.4.

Transisi energi menuju hidrogen hijau sangat bergantung pada beberapa faktor seperti teknologi, kebutuhan energi, ketersediaan energi dan yang tidak kalah penting adalah strategi sebuah negara dalam mendorong produksi hidrogen hijau dengan mengeluarkan strategi hidrogen dan juga kebijakan-kebijakan yang akan berpihak pada pengembangan energi hidrogen hijau. Hingga Oktober 2021, sudah ada 28 yang mengeluarkan strategi atau visi pengembangan hidrogen (Albrecht, U. Dkk., 2020).

Kebijakan negara-negara dalam mengembangkan hidrogen hijau dikelompokkan menjadi 3 kategori, yakni “nol kebijakan” (tidak ada komitmen), “kembangkan dulu – bersih kemudian” (komitmen masa akan datang), “hidrogen hijau sekarang” (Wenting Cheng, Dkk, 2021). Negara dengan “nol kebijakan” merepresentasikan negara dengan strategi hidrogen tapi belum ada kebijakan atau peraturan khusus negara yang dibikin untuk mendukung produksi hidrogen hijau. Negara dengan “kembangkan dulu – bersih kemudian” adalah negara dengan strategi hidrogen yang memiliki satu atau lebih kebijakan atau peraturan negara yang mendukung produksi hidrogen hijau. Negara dengan “hidrogen hijau sekarang” adalah negara dengan strategi hidrogen dan didukung oleh 3 peraturan yang mendukung hidrogen hijau dan juga peraturan mengenai penghapusan pembangkitan energi dari batu bara. Tabel 2.3 menunjukkan negara-negara dengan penetapan kebijakan terhadap hidrogen hijau.

Tabel 2.3 Kelompok Penetapan Kebijakan Negara untuk Hidrogen Hijau

Pengelompokan Penetapan Kebijakan		Negara
Nol Kebijakan		India, Norwegia, Amerika Serikat
Kembangkan dulu – bersih kemudian	Kelompok Kebijakan Rendah	Australia, Kolombia, Finlandia, Jepang, Paraguay, Polandia, Rusia, Uni Emirat Arab
	Kelompok Kebijakan Menengah	Kanada, Republik Ceko, Uni Eropa, Perancis, Jerman, Hungaria, Maroko, Belanda, Korea Selatan, Slovakia, Ukraina, Inggris Raya

Indonesia pada akhir tahun 2023 melalui Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (KESDM) mengeluarkan Strategi Hidrogen Nasional. Hingga saat ini belum ada peraturan khusus yang dibuat atau didalamnya memuat kebijakan pemerintah tentang hidrogen hijau. Dengan proyeksi kebutuhan hidrogen tahun 2050 lebih dari 6 Mt dan lebih dari 4 Mt hidrogen merupakan hidrogen hijau, maka dibutuhkan kebijakan pemerintah yang dapat memacu produksi hidrogen hijau dari elektrolisis EBT. Tanpa peran dan kebijakan pemerintah, maka sulit untuk mewujudkan target NZE pada 2060 atau lebih cepat untuk Indonesia.

2.4 Warna Hidrogen

Hidrogen dengan donasi elemen kimia huruf H adalah elemen yang paling ringan dalam table periodik (Mohammad-Ebrahim R., dkk, 2016). Pada tekanan atmosfer dan temperatur standar, hidrogen mempunyai sifat tidak berwarna, tidak berbau, dan tidak beracun. Hidrogen sudah banyak dimanfaatkan dalam dunia industri, seperti industri minyak bumi, industri petrokimia, pembangkit listrik, produksi bahan bakar seperti, bensin, diesel, bahan bakar pesawat, minyak tanah yang diolah dari minyak mentah dan methanol (Ramachandran R., Dkk, 1998). Untuk aplikasi yang lebih modern saat ini, hidrogen digunakan pada *fuel cell*, dan jika dikombinasikan dengan EBT seperti sel surya untuk rumah dapat dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik (Binesh M., 2008). Penggunaan bahan bakar hidrogen sebagai sumber energi bersih dengan kandungan energi yang lebih besar dari energi fosil telah dibuktikan oleh banyak penelitian (Phuoc-Anh Le, Dkk, 2023). Hidrogen merupakan pilihan yang tepat untuk sumber energi panas dan listrik. Hidrogen memiliki keunggulan seperti kapasitas penyimpanan yang besar, termasuk energi baru dan terbarukan, kemurnian, dapat dengan mudah dirubah bentuk menjadi energi lainnya, dan rendah emisi (Liu G., Dkk., 2023).

Beberapa perbedaan metode produksi hidrogen tergantung dari asal terbentuknya seperti air, natural gas, minyak bumi, dan batu bara (Jose M. Marín Arcos dan Diogo M. F. Santos, 2023). Hingga saat ini, produksi hidrogen dunia masih didominasi dari bahan baku fosil melalui proses *steam methane reforming* (SMR) dan gasifikasi batu bara (D. Gunawan, 2022). Seperti dijelaskan

sebelumnya, hidrogen adalah gas yang tidak berwarna, tetapi ada beberapa warna yang digunakan untuk mengidentifikasi jenis hidrogen. Warna-warna ini menunjukkan dari mana sumber energi hidrogen berasal, proses produksinya dan emisi karbon yang dihasilkan. Ada lima jenis warna hidrogen yang diidentifikasi pada tulisan ini. Warna-warna hidrogen dapat dilihat pada gambar 2.11.

Jenis Hidrogen	Sumber Energi	Proses Produksi	Emisi Karbon
Hidrogen Hijau	Energi Terbarukan	Elektrolisis	Rendah
Hidrogen Merah Muda	Energi Nuklir	Elektrolisis	Rendah
Hidrogen Pirus	Natural Gas	Pirolisis	Karbon Padat
Hidrogen Biru	Natural Gas / Batu bara	SMR / Gasifikasi dengan CCS	Rendah - Menengah
Hidrogen Abu-Abu	Natural Gas / Batu bara	SMR / Gasifikasi	Tinggi

Gambar 2.11 Warna-warna Hidrogen (IRENA, 2023)

2.4.1 Hidrogen Hijau

Hidrogen hijau, yang disebut juga hidrogen bersih, hidrogen terbarukan, hidrogen rendah karbon, adalah hidrogen yang diproduksi melalui elektrolisis air menggunakan listrik yang berasal dari energi terbarukan (Jose M. Marín Arcos dan Diogo M. F. Santos, 2023). Elektrolisis air dengan menggunakan energi listrik dari energi terbarukan saat ini menjadi perhatian dari seluruh dunia. Kebutuhan hidrogen hijau diproyeksikan tumbuh sebesar 492 Mt pada tahun 2050 (IRENA, 2023). Hingga saat ini produksi hidrogen hijau masih sangat kecil dibandingkan dengan hidrogen dari sumber energi lainnya. Tantangan terbesar dari produksi hidrogen hijau saat ini adalah ongkos produksi yang masih mahal. Komponen utama dari proses produksi adalah, harga listrik dari energi terbarukan, biaya elektrolizer, dan kapasitas produksi. Komponen paling besar dari produksi hidrogen hijau adalah harga listrik dari energi terbarukan yang masih mahal dibandingkan dengan energi dari energi fosil. Oleh karena itu tantangan kedepan adalah bagaimana cara menurunkan harga energi terbarukan sehingga harga akhir dari hidrogen hijau dapat bersaing dengan yang lainnya. Menurunkan biaya elektrolizer dan juga meningkatkan efisiensi dari eletrolizer juga dapat menurunkan biaya produksi hidrogen hijau. Proyeksi kedepan dengan kemajuan teknologi dan

kebutuhan akan hidrogen yang bersih diharapkan dapat membantu dunia dalam mencapai target NZE.

2.4.2 Hidrogen Merah Muda

Hidrogen merah muda adalah hidrogen yang diproduksi dari elektrolisis air yang listriknya berasal dari pembangkit listrik tenaga nuklir. Walaupun nuklir tidak dikategorikan sebagai energi terbarukan, tetapi listrik yang dihasilkan dari energi nuklir adalah bebas karbon sehingga sangat menarik untuk digunakan memproduksi hidrogen bersih (D. Gunawan, 2022). Indonesia sendiri memiliki sumber daya uranium di Kalimantan dan kemungkinan Papua Barat (World Nuclear Association, 2021). Akan tetapi menjadikan tenaga nuklir sebagai alternatif energi di Indonesia masih sangat sulit diwujudkan karena adanya persepsi yang kurang baik di masyarakat dan juga tidak adanya dukungan Pemerintah untuk mewujudkannya.

2.4.3 Hidrogen Pirus

Hidrogen pirus dihasilkan dari proses pirolisis natural gas yang tidak menghasilkan emisi karbondioksida. Hidrogen pirus menggunakan gas metan sebagai bahan bakunya. Hingga saat ini hidrogen pirus masih dalam tahap pengembangan. Tantangan terbesar adalah biaya pembangunan yang besar terutama untuk produksi skala kecil, dan juga umur dari catalis yang rendah dan kemungkinan reaktor yang buntu karena adanya penumpukan karbon.

Proses pirolisis gas metan dapat dilakukan dengan tiga pendekatan, yakni: dekomposisi panas, dekomposisi plasma dan dekomposisi katalik. Teknologi ini merupakan teknologi yang sudah terbukti dan sudah dikenal sejak lama, akan tetapi masih belum menarik minat dari berbagai kalangan untuk memproduksi hidrogen dari teknologi ini (Schneider, S., Dkk., 2020).

2.4.4 Hidrogen Biru

Hidrogen biru adalah hidrogen yang dihasilkan dari energi fosil melalui proses SMR dan gasifikasi batu bara yang memiliki teknologi *carbon capture and storage* (CCS). Jika dibandingkan dengan hidrogen hijau, harga produksi hidrogen biru lebih rendah karena menggunakan energi fosil. Karena tidak adanya karbondioksida yang dihasilkan dari proses produksinya, hidrogen biru dapat dikategorikan sebagai bebas karbon (Jose M. Marín Arcos dan

Diogo M. F. Santos, 2023). Hidrogen biru bisa dikatakan sebagai solusi dalam masa transisi menuju NZE ditahun 2050.

Indonesia sendiri sudah mengembangkan untuk memproduksi hidrogen biru ini. Beberapa perusahaan sudah mulai menerapkan teknologi CCS untuk beberapa pabrik produksi hidrogennya. Hanya saja karena hidrogen biru masih menggunakan energi fosil sebagai sumber energinya maka dapat dikatakan bahwa hidrogen biru adalah energi yang tidak berkelanjutan.

2.4.5 Hidrogen Abu-Abu

Hidrogen abu-abu adalah seperti hidrogen biru akan tetapi tidak ada teknologi CCS didalamnya. Hidrogen abu-abu saat ini merupakan jenis hidrogen yang mendominasi produksi hidrogen di dunia dengan persentase sebesar 93% (IEA, 2023). Hidrogen abu-abu kebanyakan digunakan pada industri pengolahan minyak bumi, produksi amonia, dan sintesa metanol. Hidrogen abu-abu ini sangat memungkinkan untuk berubah menjadi hidrogen biru dengan menambahkan teknologi CCS.

Dalam konteks Indonesia, pabrik produksi hidrogen masih didominasi oleh SMR dan gasifikasi batu bara. Hasil produksi hidrogen abu-abu di Indonesia paling banyak untuk urea, amonia, dan pengolahan minyak bumi. Perlu adanya komitmen yang kuat dari Pemerintah, dan pelaku usaha untuk mulai mengalihkan produksi hidrogen abu-abunya menjadi hidrogen yang lebih ramah terhadap lingkungan.

2.5 Produksi Hidrogen

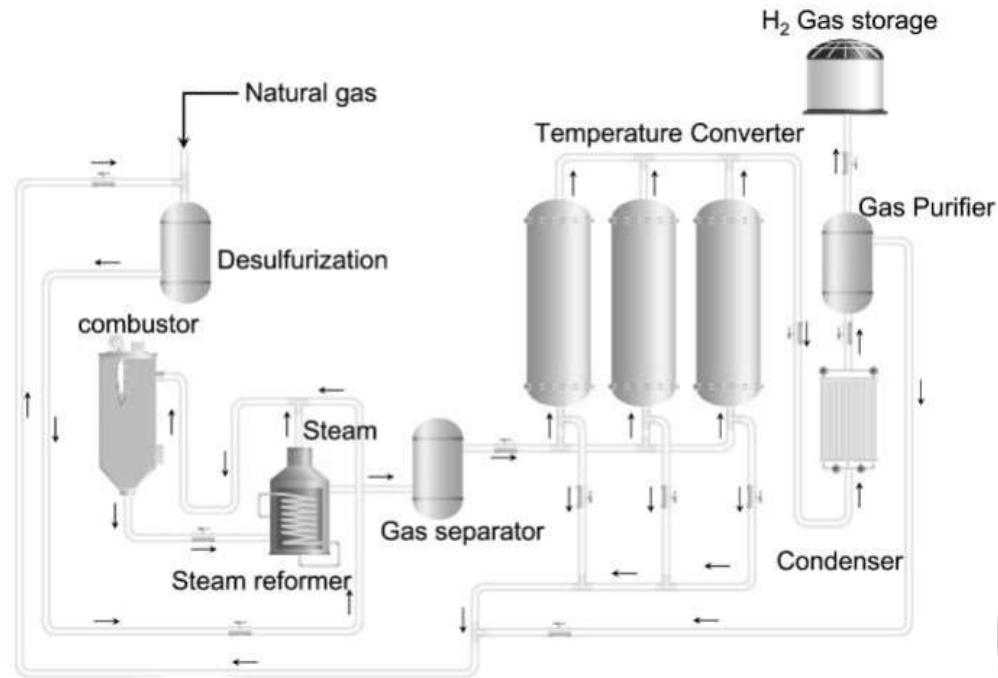
Ada beberapa metode untuk memproduksi hidrogen dimana setiap metode bergantung pada energi yang dipakai, seperti termolisis, pirolisis, elektrolisis dan reforming (M. Mahmoud, Dkk. 2021). Memisahkan air menjadi O_2 dan gas H_2 dengan listrik (listrik dari energi terbarukan seperti biomassa, panas bumi, angin dan energi matahari) adalah proses yang ramah lingkungan (Barbaro dkk. 2009). Hidrogen abu-abu dan hidrogen biru yang diproduksi melalui *steam methane reforming* (SMR), dan gasifikasi batu bara, memiliki keunggulan biayanya yang relatif lebih rendah dibanding metode produksi lainnya. Hidrogen hijau di produksi melalui elektrolisis air yang listriknya berasal dari energi terbarukan.

Komponen biaya terbesar untuk produksi hidrogen adalah harga listrik terbarukan untuk menggerakkan sistem elektroliser. Oleh karena itu, biaya listrik yang rendah diperlukan agar produksi hidrogen ramah lingkungan lebih kompetitif dibandingkan produksi hidrogen lainnya.

2.5.1 *Steam Methane Reforming (SMR)*

Steam reforming adalah teknologi yang digunakan untuk memproduksi hydrogen menggunakan energi fosil seperti methanol, *liquified petroleum gas* (propana dan butana), nafta, bahan bakar jet dan diesel (R. Yukesh Kannah, Dkk, 2021). Natural gas sudah terbukti sebagai bahan baku *steam reforming* yang sangat bisa diandalkan karena ketersediaannya, mudah ditransportasikan dan komposisi homogenitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan energi fosil lainnya. Hampir 95% hidrogen dari *steam reforming* digunakan untuk bahan baku amonia, methanol, dan sintesa bahan bakar cair (Basile, A., Dkk., 2015).

Proses steam reforming melibatkan reaksi antara hidrokarbon dan uap untuk menghasilkan campuran hidrogen dan karbon monoksida, yang dikenal sebagai syngas. Proses ini membutuhkan suhu dan tekanan yang tinggi, mulai dari 700 °C hingga 1000 °C, dan tekanan 5-20 bar, tergantung pada hasil yang diinginkan, reaktor, dan katalis yang digunakan. Proses produksi dari *steam reforming* dapat dilihat pada Gambar 2.12. Harga produksi hydrogen dari SMR sangat bergantung dari harga bahan baku gas. Perbandingan harga produksi hydrogen dari SMR dengan CCS dan tanpa CCS adalah 2,27 USD per kg dan 2,08 USD per kg (Nikolaidis, P., Dkk., 2017). Untuk negara-negara dengan sumber energi natural gas yang besar harga hidrogennya bisa lebih rendah dari 1 USD per kg, seperti negara-negara di Timur Tengah, Amerika Serikat, dan Rusia.



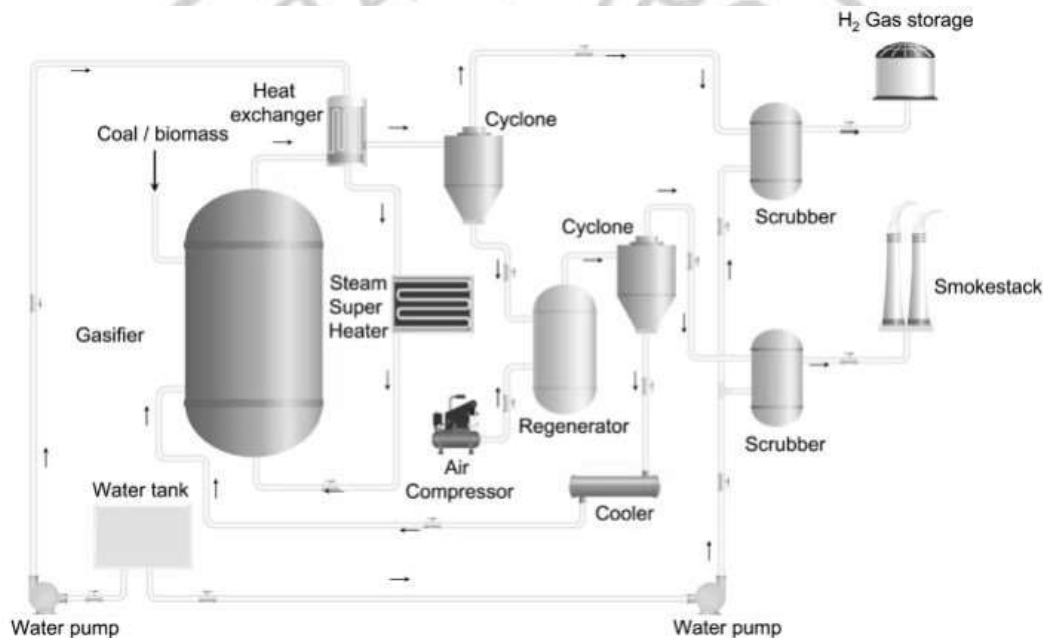
Gambar 2.12 Proses SMR Natural Gas (R. Yukesh Kannah, Dkk., 2021)

2.5.2 Gasifikasi Baru Bara

Gasifikasi dapat dilakukan dengan berbagai macam bahan baku, dan kebanyakan biomassa dan batu bara adalah bahan baku yang paling sering digunakan untuk proses gasifikasi (Medhat A. Nemitallah, Dkk., 2024). Pada proses gasifikasi bahan baku gasifikasi berinteraksi dengan uap suhu tinggi (di atas 750 °C) yang menghasilkan bahan baku gas yang terdiri dari H_2 dan CO (F. Mueller-Langer, Dkk., 2007). Pemurnian gas diperlukan untuk proses selanjutnya untuk menghilangkan kontaminan, partikel, dan zat lainnya yang dapat menurunkan nilai kalori dari gas tersebut. Proses gasifikasi dapat dilihat pada gambar 2.13.

Gasifikasi batu bara adalah salah satu teknologi yang sudah banyak digunakan di seluruh dunia. Terdapat empat tipe batu bara yang umum digunakan yakni, lignit (peringkat rendah), batubara sub-bituminus (peringkat rendah), batubara bituminus (peringkat menengah), dan antrasit (peringkat tinggi) (Andrei, M., 2023). Proses gasifikasi batu bara bisa sangat rumit dan melibatkan proses yang bertingkat. Dibandingkan dengan *steam reforming*, gasifikasi baru bara lebih rumit prosesnya karena ada proses pengolahan bahan baku batu bara seperti penggilingan dan juga pengeringan. Oleh karena prosesnya yang rumit, untuk produksi gasifikasi batu bara skala kecil

tidak layak secara ekonomi. Gasifikasi batu bara menghasilkan emisi karbon yang sangat tinggi dibandingkan dengan metode lainnya. Untuk setiap kilogram hydrogen yang dihasilkan, ada sekitar 20 kg CO₂ yang dilepaskan ke atmosfer (Yu M., Dkk. 2021). Karena alasan tersebut teknologi ini diharapkan dikurangi pemakaiannya dimasa yang akan datang untuk mendukung upaya dekarbonisasi dan mencapai target NZE. Harga rata-rata untuk gasifikasi batu bara adalah USD 1,2 – USD 2 / kgH₂ (IEA, 2022).

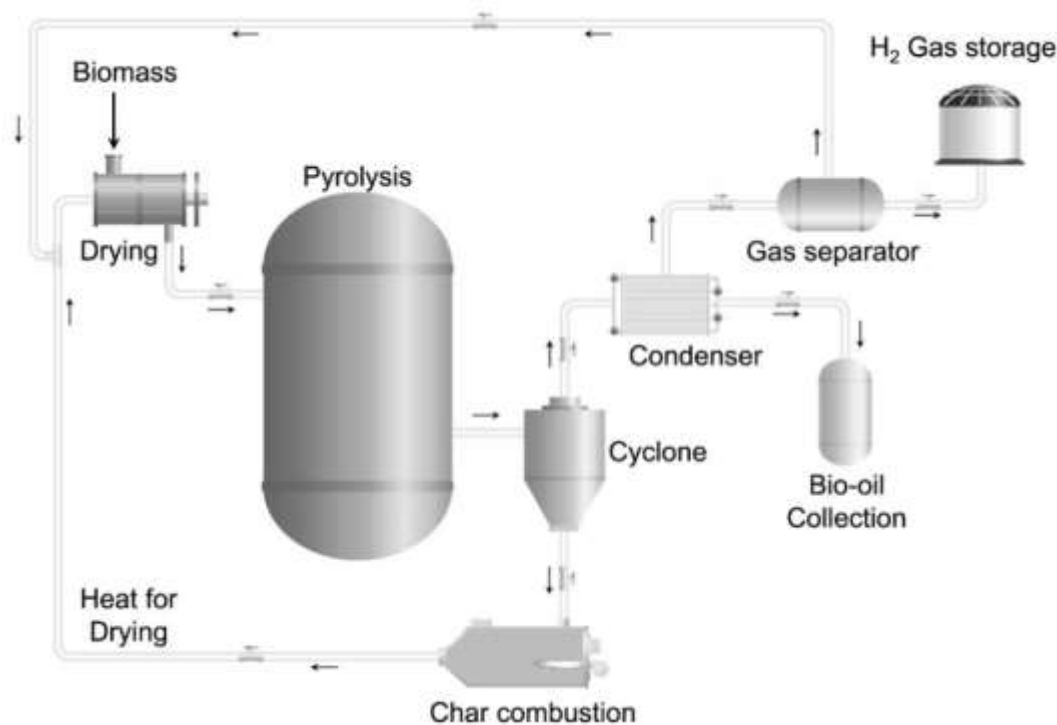


Gambar 2.13 Proses Gasifikasi (R. Yukesh Kannah, Dkk., 2021)

2.5.3 Pirolisis

Pirolisis adalah proses dekomposisi panas yang bertujuan untuk merubah bentuk hidrokarbon cair menjadi hydrogen dan elemen karbon lainnya (Wang S., Dkk., 2017). Proses pirolisis menghasilkan gas metan (CH₄) dan karbon dioksida (CO₂), dimana melalui proses reaksi uap dan pemisahan air dan gas untuk menghasilkan hidrogen. Bahan baku untuk pirolisis dapat berupa cairan *carbon-based-fuel* (CBF) atau biomassa. Pada proses pirolisis, bahan baku dipanaskan sampai lebih dari 300 °C tanpa ada udara untuk menghasilkan gas hydrogen, arang padat, minyak nabati cair, dan gas hidrokarbon (R.Y. Kannah, Dkk., 2021). Pirolisis dapat dibagi menjadi empat tipe, yakni proses pirolisis lambat, proses pirolisis cepat, proses pirolisis vacuum, dan proses pirolisis flash. Proses pirolisis lambat dan cepat adalah teknologi yang paling banyak digunakan untuk memproduksi hydrogen. Pada proses pirolisis lambat, laju pemanasan (5-30

°C/menit) dan waktu dekomposisi yang lebih tinggi menghasilkan biochar. Pada pirolisis cepat, laju pemanasan (10-200 °C/detik) dan waktu dekomposisi yang lebih pendek menghasilkan 60-75% bio-oil, 15-20% biochar, dan 10-20% syngas. (R. Yukesh Kannah, Dkk., 2021). Diantara dua metode pirolisis tersebut, proses pirolisis cepat adalah yang paling banyak digunakan untuk memproduksi hydrogen (Al Arni, 2018). Proses pirolisis dapat dilihat pada gambar 2.14. Harga produksi hydrogen dari proses pirolisis bervariasi antara USD 1,25 – USD 2,2 / kgH₂ (Medhat A. Nemitallah, Dkk., 2024).

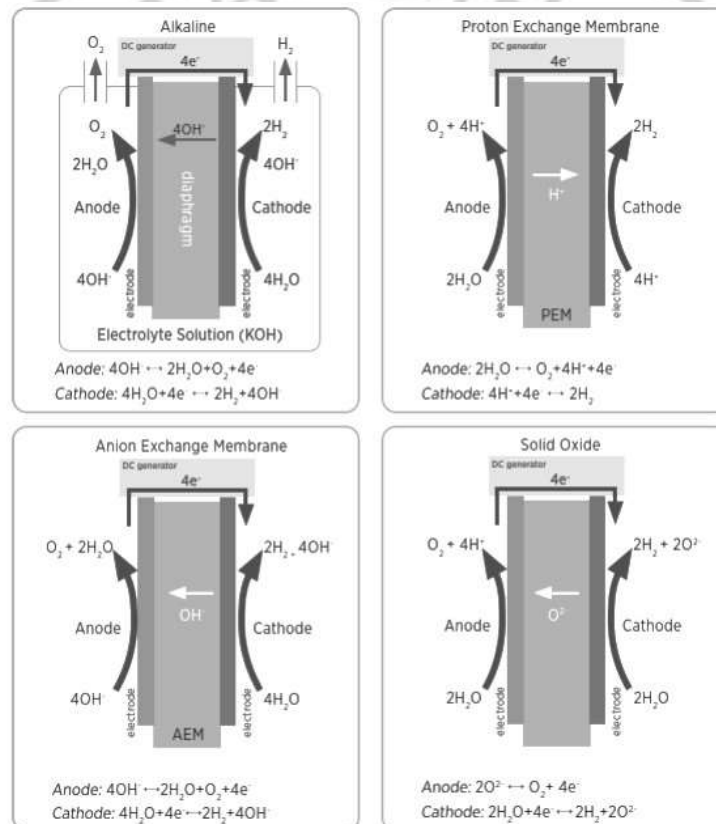


Gambar 2.14 Proses Pirolisis Biomassa (R. Yukesh Kannah, Dkk., 2021)

2.5.4 Elektrolisis Air

Prinsip dasar elektrolisis air terdiri dari dua elektroda yang dipisahkan oleh elektrolit (IRENA, 2020). Elektrolisis air saat ini merupakan teknologi yang sudah matang yang diterapkan dalam beberapa aplikasi industry. Keuntungan utama dari metode ini adalah listrik yang digunakan dapat berasal dari energi baru dan terbarukan sehingga didapatkan hasil yang rendah karbon maupun bebas karbon (Zhou, Y., Dkk., 2022). Saat ini teknologi terdapat empat teknologi

elektrolizer yang ada, yakni: *alkaline water electrolysis* (AWE), *proton-exchange membrane* (PEM) elektrolisis, *the solid oxide electrolysis cell* (SOEC), dan *anion-exchange membrane* (AEM) elektrolisis. Teknologi AWE dan PEM adalah teknologi yang sudah dalam tahap komersial sedangkan SOEC dan AEM masih dalam tahap percobaan laboratorium, tetapi cukup menjanjikan dimasa yang akan datang (IRENA, 2020). Prinsip dasar dari tipe-tipe elektrolizer dapat dilihat pada gambar 2.15.



Gambar 2.15 Tipe Teknologi Elektrolizer (IRENA, 2020)

Teknologi AWE termasuk teknologi pionir dalam hal elektrolizer karena keandalannya, biaya rendah, dan pengoperasian yang mudah. Kelemahan utamanya adalah teknologi AWE membutuhkan area yang lebih luas daripada elektrolizer lainnya. Komponen utama AWE terdiri dari elektrolit, diafragma (umumnya asbes), katoda, dan anoda. Dalam kondisi normal, elektrolizer ini bekerja pada suhu rendah, dan tekanan antara anoda dan katoda harus seimbang untuk menghindari ledakan yang disebabkan oleh interpenetrasi hidrogen atau oksigen. AWE memiliki waktu penyalan dari kondisi dingin yang relatif lama (sekitar 50 menit), yang berarti mulai

perlahan dan membutuhkan waktu respons yang lama (Jose M. Marín Arcos dan Diogo M. F. Santos, 2023).

Teknologi SOEC membutuhkan temperatur tinggi dalam prosesnya, banyak pembatasan dalam proses produksinya dan membutuhkan material dengan kualitas tinggi (Nechache A., Dkk., 2021). SOEC memiliki efisiensi energi yang sangat tinggi, membutuhkan voltase yang lebih rendah sehingga mengurangi konsumsi energi dan efisiensinya dapat mencapai 90% dengan panas yang diterapkan (J. Chi, Dkk, 2018).

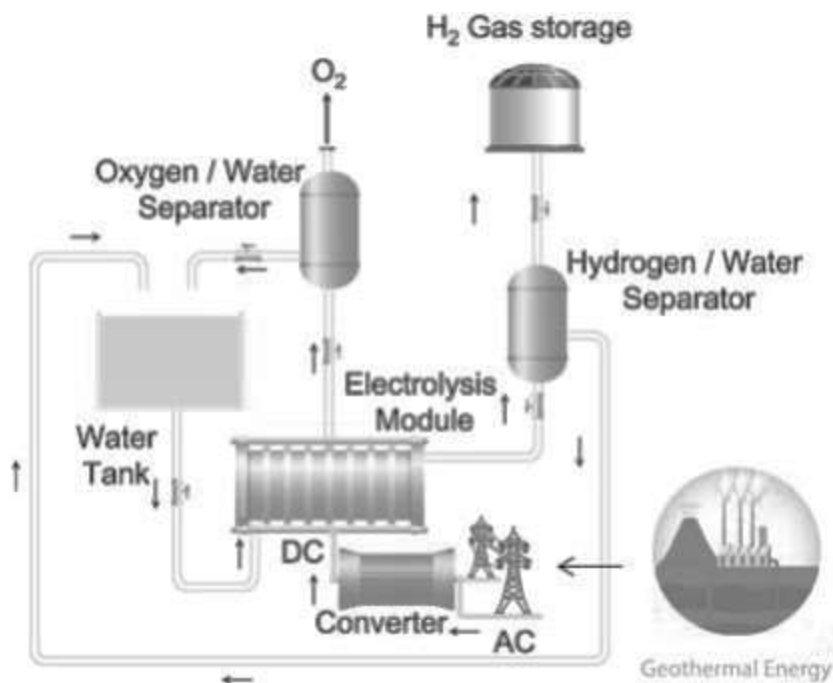
Teknologi AEM merupakan teknologi yang masih dalam tahap pengembangan (Jose M. Marín Arcos dan Diogo M. F. Santos, 2023). Potensi dari teknologi AEM adalah dia lebih ramah terhadap lingkungan dan lebih efisien dan ringkas dibandingkan dengan elektroliser PEM. Hasil dari pengembangan AEM menunjukkan terdapat masalah stabilitas bahan kimia dan mekanikal sehingga menyebabkan masalah pada masa pakai dan kinerjanya belum seperti yang diharapkan (IRENA, 2020).

Teknologi PEM merupakan teknologi yang mudah diintegrasikan dan memiliki efisiensi konversi yang tinggi akan tetapi membutuhkan biaya awal yang mahal. Teknologi PEM saat ini sudah dikembangkan untuk skala kapasitas beberapa tingkatan MW listrik (Anita H. Reksten, Dkk., 2022). Ukuran sel elektrolisis yang kecil membuat PEM sangat fleksibel untuk dipasangkan dengan sumber energi terbarukan, yang menjadikannya sangat potensial sebagai pilihan elektrolizer dimasa yang akan datang. Teknologi PEM sangat efisien dibandingkan dengan elektrolizer lainnya (Jing Han, Dkk., 2020). PEM adalah teknologi yang membutuhkan air paling sedikit dibandingkan dengan elektrolizer lainnya dimana PEM membutuhkan 17,5 liter air untuk satu kilogram hidrogen dibandingkan dengan AWE yang membutuhkan 22,3 L/Kg Hidrogen (IRENA, 2023b)

2.5.4.1 Biaya Produksi Elektrolisis

Proses reaksi elektrokimia dari elektrolisis dimana terjadi pemisahan air menjadi H_2 dan oksigen (O_2) dapat dilihat pada Gambar 2.16. Dalam proses produksi hidrogen hijau, elektrolisis digunakan untuk memproduksi hidrogen dari listrik yang dihasilkan oleh energi terbarukan. Saat ini produksi dari elektrolisis di dunia masih sangat kecil. Proses elektrolisis saat ini membutuhkan biaya yang tinggi dan konsumsi energi yang besar (Da Silva Veras, T., Dkk., 2018). Salah satu

faktor penghambat dalam proses elektrolisis hidrogen hijau adalah tingginya biaya listrik dari energi terbarukan. Dengan menurunkan harga listrik energi terbarukan dan mengembangkan terus teknologi elektrolisis, hidrogen hijau akan sangat menjanjikan dimasa yang akan datang (Ayodele, T.R., Dkk., 2019)



Gambar 2.16 Proses Elektrolisis (R. Yukesh Kannah, Dkk., 2021)

Harga dari hidrogen hijau dari proses elektrolisis sangat bergantung dari beberapa faktor seperti lokasi proyek (tantangan akses terhadap energi listrik terbarukan), teknologi elektrolisis (AWE, PEM, SOEC, AEM, fotokatalisis), kapasitas elektrolisis dan masa pakai dari fasilitas produksinya (Jose M. Marín Arcos dan Diogo M. F. Santos, 2023). Saat ini biaya produksi dari hidrogen hijau dari elektrolisis berkisar antara USD 2,28 – USD 7,39 / kgH₂ (Yu, M., Dkk., 2021). Harga listrik dari energi terbarukan yang murah adalah kunci untuk mendapatkan harga yang bersaing untuk hidrogen hijau (IRENA, 2020). Hingga saat ini tidak ada proyek elektrolisis yang lebih dari 100MW. Kebutuhan lahan untuk elektrolisis lebih mengandalkan estimasi rekayasa teknik. Untuk 100MW elektrolisis, dibutuhkan lahan sebesar 4500 m² dengan 5 modul elektrolizer masing-masing 20 MW (McPhy, 2018). Tabel harga hydrogen yang dihasilkan dari energi terbarukan bisa dilihat pada tabel 2.4.

Biaya ini tentu saja dapat menurun dengan berbagai inovasi dan menaikkan performa dari elektrolizer. Hal ini dapat dilakukan dengan melakukan standarisasi di bidang manufaktur dan desain sehingga dapat meningkatkan kapasitas produksi, menaikkan efisiensi sehingga menurunkan jumlah energi listrik yang dibutuhkan, dan menambah daya tahan pemakaian elektrolizer sehingga mengurangi biaya operasional (IRENA, 2020). Selain itu, dukungan Pemerintah memegang peranan yang sangat penting untuk menurunkan biaya produksi dengan kebijakan-kebijakan dan juga insentif keuangan yang dapat menarik minat investor untuk memproduksi hidrogen hijau.

Tabel 2.4 Tabel Harga Hidrogen Dari Elektrolisis (diolah dari Rami S. El-Emam, 2019., Mohamed Osman Awaleh 2021)

Sistem Elektrolisis	Sumber Energi	Kapasitas Produksi (ton/hari)	Efisiensi <i>Plant</i>	Harga Listrik (\$/kWh)	Harga H ₂ (\$/kg)	Sumber
PEM	Angin	65	-	-	9,37	Olateju Dkk. (2016)
PEM	<i>Solar Thermal - Natural Gas</i>	-	10	-	6,35	Boudries (2018)
PEM	<i>Solar PV</i>	10	9,76	0,02	12,6	Shaner Dkk. (2016)
PEM	Panas Bumi	873,8	6,7	0,02	2,39	Kanoglu Dkk. (2011)
AEM	Angin	4	58	0,06	8,01	Bertuccioli Dkk. (2014)
SOEC	Panas Bumi	86,4	-	0,017	2,13	Kanoglu Dkk. (2011)
PEM	Panas Bumi	2,08	10,02	0,1253	5,51	Mohamed Osman Awaleh Dkk. (2021)
SOEC	Panas Bumi	3,9		0,1253	4,56	Mohamed Osman Awaleh Dkk. (2021)

2.5.5 Hidrogen dari Panas Bumi

Hidrogen dari energi panas bumi dapat dihasilkan dari berbagai metode. Metode yang digunakan untuk memproduksi hidrogen dari panas bumi antara lain, elektrolisis air, proses *thermochemical* gas H_2S dari fluida panas bumi. Proses elektrolisis untuk menghasilkan hidrogen dari panas bumi adalah dengan memanfaatkan listrik yang dihasilkan dari energi panas bumi untuk kebutuhan proses elektrolisis air untuk menghasilkan hidrogen. *Non-Condensing Gas* (NCG) pada fluida panas bumi mengandung, carbon dioksida, hidrogen sulfida, amonia dan hidrogen (Haklidi, Dkk., 2007). Dengan proses *thermochemical*, gas H_2S yang terkandung pada fluida panas bumi dapat digunakan untuk menghasilkan hidrogen.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Sebagai ekonomi terbesar di Asia Tenggara, Indonesia memiliki cadangan energi panas bumi terbesar di dunia sehingga berpotensi menjadi pemasok utama hidrogen hijau untuk pasar domestik dan internasional. 356 Wilayah Kerja Panas dapat didefinisikan sebagai lokasi fisik yang memiliki beberapa manifestasi panas bumi di Indonesia. Pulau Sumatra merupakan pulau di Indonesia dengan kapasitas potensi paling besar di Indonesia sebesar 9.460 MW dan rasio antara kapasitas terpasang dengan potensi cadangan sebesar 10% menunjukkan bahwa potensi pengembangan panas bumi di pulau Sumatra masih sangat besar. Potensi panas bumi yang besar ini sangat menjanjikan untuk dikembangkan menjadi hidrogen hijau.