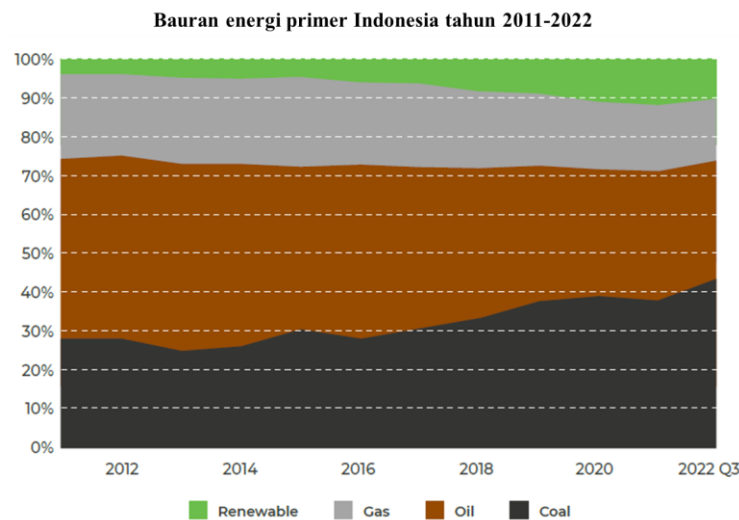


BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kondisi Energi Indonesia Saat Ini

Pada penghujung tahun 2022, pangsa energi terbarukan dalam bauran energi primer Indonesia mengalami penurunan dari 11,5% pada tahun 2021 menjadi 10,4% pada tahun 2022 (Oktober 2022) (IESR, 2022). Disamping perkembangan energi terbarukan yang tidak cukup signifikan, penurunan ini juga disebabkan karena meningkatnya pangsa batubara hingga 43% pada tahun 2022. Tren bauran energi primer pada tahun 2011-2022 dapat dilihat pada Gambar 2. 1.



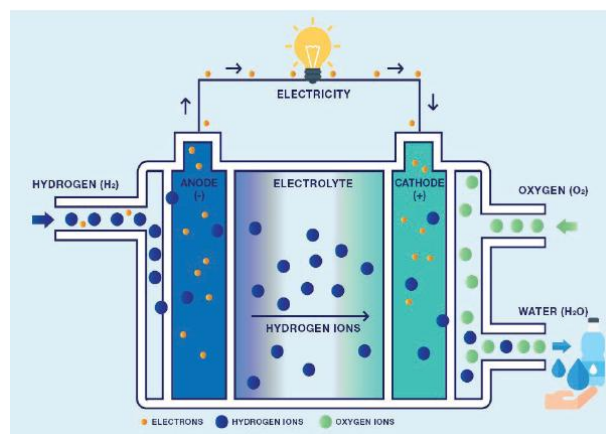
Gambar 2. 1 Bauran energi primer Indonesia tahun 2011-2022 (IESR, 2022)

Porsi terbesar pengembangan energi terbarukan adalah dari sektor pembangkit listrik. Sesuai dengan RUPTL Tahun 2021-2030, pengembangan pembangkit energi terbarukan dari tahun 2021-2025 ditargetkan mencapai 45 - 46 TWh, dengan porsi terbesar dari biomassa yaitu sekitar 40-42% melalui co-firing pada pembangkit listrik berbahan bakar batubara dan pembangkit listrik tenaga biomassa itu sendiri. Kemudian diikuti dengan energi hidro dan panas bumi masing-masing sebesar 21-25% dan 20-24%. Kedua jenis energi ini lebih disukai karena sifatnya yang dapat dikirim dan cocok sebagai pembangkit beban dasar. Namun penambahan kapasitas pembangkit dari kedua jenis energi ini masih belum signifikan akibat adanya beberapa proyek yang masih tertunda diantaranya

akibat risiko eksplorasi (untuk energi panas bumi), perizinan, dan waktu konstruksi. Dari sisi energi surya, pengembangan solar PV menjadi semakin kompetitif dan waktu pemasangan yang singkat, sehingga dapat mengisi kesenjangan untuk mencapai target energi terbarukan. Namun secara keseluruhan kondisi ini membuat target 23% bauran EBT pada tahun 2025 nampaknya sulit dicapai bilamana tidak ada reformasi signifikan yang dilakukan.

2.2 Hidrogen sebagai Sumber Energi di Indonesia

Hidrogen merupakan bahan bakar yang digunakan bersama dengan oksigen pada pembangkitan listrik dalam sebuah unit yang disebut *fuel cell*. *Fuel cell* biasanya diaplikasikan pada kendaraan listrik. Proses tersebut menghasilkan air, sehingga ramah lingkungan bahkan tanpa emisi. Prinsip dari *fuel cell* mirip dengan baterai, yang memiliki kutub anoda dan katoda dimana hidrogen dan oksigen akan mengalir ke dua kutub yang berbeda sesuai dengan ilustrasi di bawah ini.



Gambar 2. 2 Hydrogen fuel cell (Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional, 2022)

Pengembangan hidrogen, khususnya *green hydrogen*, sejalan dengan target *Net Zero Emission 2060* dimana hidrogen bisa menjadi solusi tambahan dalam memenuhi tujuan penurunan iklim yang cukup ambisius. Selain *fuel cell*, *green hydrogen* juga berperan dalam sektor industri seperti industri besi dan baja, alumunium, dan bahan kimia (IRENA, 2022).

Pengembangan hidrogen di Indonesia, khususnya *green hydrogen*, saat ini masih dalam tahap awal pengembangan. Target terdekat yang ditetapkan oleh

Pemerintah adalah pengembangan kapasitas produksi *green hydrogen* sebesar 328 MW pada tahun 2030, dengan prakiraan harga 3-12 USD/kg bergantung pada teknologi dan lokasi proyek, dan diharapkan kurang dari 2 USD/kg di daerah dengan sumber daya terbaik (IESR, 2022). Rencana pengembangan ini tentunya harus disertai dengan kebijakan yang mendukung harga energi terbarukan yang lebih rendah, yang nantinya diharapkan dapat berdampak pada menurunnya biaya produksi *green hydrogen*.

2.3 Teknologi Produksi Hidrogen

Di antara berbagai metode produksi hidrogen, sedikitnya terdapat 3 metode yang saat ini umum digunakan, yaitu proses reformasi dari hidrokarbon, gasifikasi, dan elektrolisis (Kanoglu et al., 2010).

a. Proses reformasi dari hidrokarbon

Pada proses ini, hidrokarbon cair diubah menjadi hidrogen dan karbon (Ramazankhani et al., 2016) dengan keberadaan *steam*. Proses ini membutuhkan biaya yang sedikit, namun menghasilkan emisi karbon yang tinggi karena melibatkan penggunaan energi fosil.

b. Gasifikasi

Proses gasifikasi melibatkan penggunaan minyak bumi dan residu batubara serta biomassa untuk menghasilkan gas yang disebut *syngas*, dimana salah satu kandungannya adalah hidrogen (Ramazankhani et al., 2016). Temperatur gasifikasi bergantung pada jenis reaktan, seperti batubara atau material organik lainnya. Proses ini tidak melibatkan proses pembakaran, namun membutuhkan keberadaan oksigen atau uap sebagai agen gasifikasi (Mahmoud et al., 2021).

c. Elektrolisis

Elektrolisis air menjadi metode yang paling banyak digunakan dan telah mencapai tahap komersial. Setidaknya ada dua jenis proses elektrolisis yang ada, yaitu PEM elektrolisis dan alkalin elektrolisis (Mahmoud et al., 2021). Prinsip dari elektrolisis air adalah pergerakan elektron melalui sirkuit

eksternal, dimana air akan mengalami dekomposisi secara elektrokimia menjadi hidrogen di katoda dan oksigen di anoda (Karayel et al., 2022). Energi yang digunakan pada proses elektrolisis dapat berasal dari energi listrik maupun energi panas. Energi yang diperlukan untuk proses elektrolisis bergantung pada temperatur air yang masuk ke dalam elektrolizer.

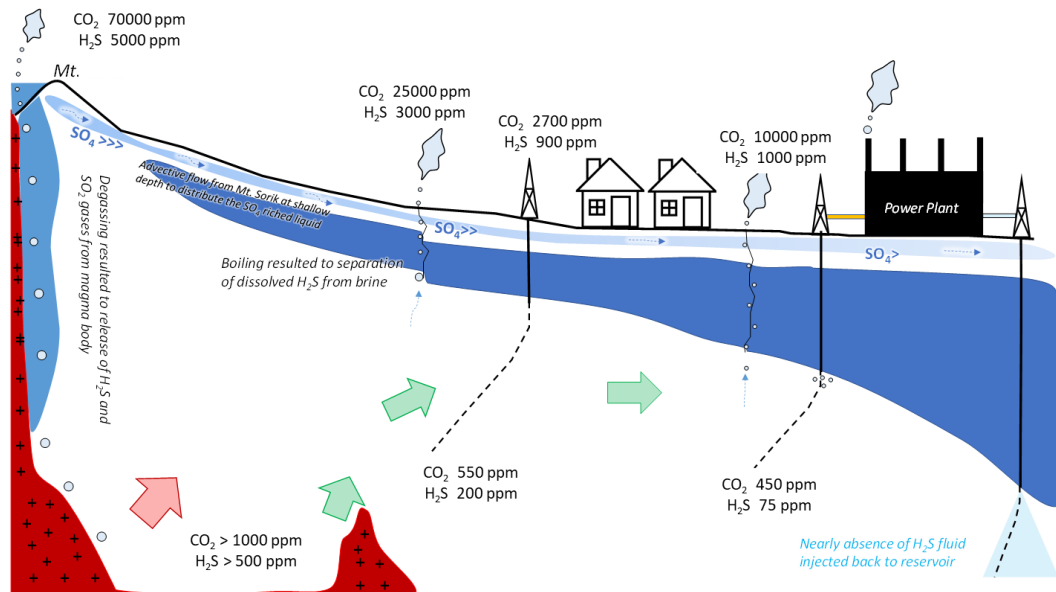
Di antara metode tersebut, elektrolisis menjadi metode yang banyak disukai karena memiliki beberapa keunggulan diantaranya dari sisi keamanan, dapat menghasilkan output yang tinggi, biaya listrik yang relatif rendah, serta ramah lingkungan (Mostafaeipour et al., 2020).

2.4 Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi (PLTP) untuk Produksi Hidrogen

Energi panas bumi diyakini merupakan energi yang terbarukan, bersih (Ramazankhani et al., 2016) dan berkelanjutan karena hanya sedikit panas yang diekstraksi dibandingkan dengan total panas dalam suatu sistem panas bumi (Bassani et al., 2018). Namun demikian, pemanfaatan sistem panas bumi entalpi tinggi seringkali disertai dengan pelepasan emisi gas seperti karbon dioksida (CO_2), hidrogen sulfida (H_2S), hidrogen (H_2), nitrogen (N_2), metana (CH_4), dan argon (Ar). Gas-gas tersebut di dalam sistem panas bumi dikenal dengan istilah *Non-Condensable Gas* (NCG) atau gas-gas yang tidak terkondensasi. Kandungan NCG dalam suatu sistem panas bumi berbeda-beda bergantung pada suhu dan komposisi kimia tanah/batuan di area tersebut (Ouali et al., 2011), laju sirkulasi fluida dalam sistem, serta teknologi pembangkit yang digunakan (Finster et al., 2015). Meskipun fraksi gas-gas ini bervariasi antara satu lapangan panas bumi dengan lainnya, namun faktanya bahwa CO_2 menjadi fraksi gas yang paling dominan, selanjutnya diikuti dengan H_2S .

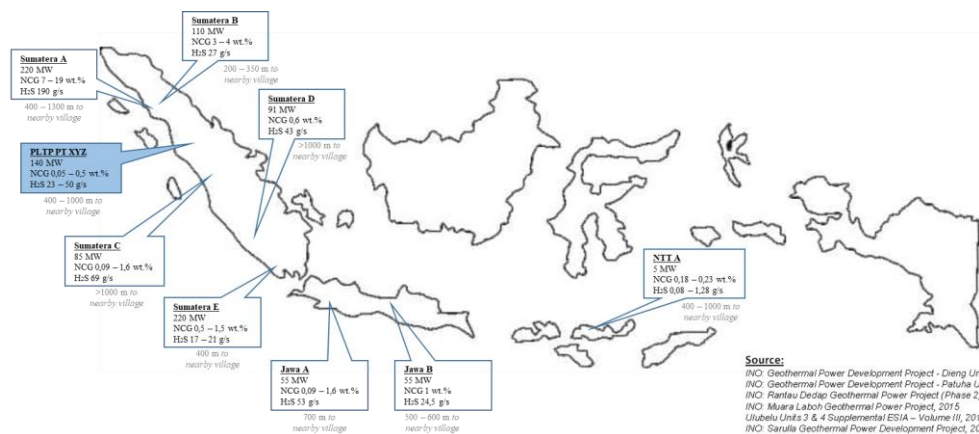
Sumber gas pada suatu sistem panas bumi mulanya berasal dari air permukaan / air hujan yang merembes hingga ke bawah inklusi magma. Air panas bumi turun melalui batuan berpori dan permeabel yang kemudian akan terkena pengaruh tekanan dan panas serta mengalami interaksi dengan mineral di dalam batuan,

sehingga air berubah menjadi uap dan naik ke permukaan bersama dengan gas (Ouali et al., 2011). Gas-gas tersebut dapat ditemukan dalam bentuk emisi gas ke atmosfer seperti manifestasi alami (fumarol) dan dari aktivitas pembangkit listrik, atau terlarut dalam air panas (sumber mata air panas) sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2. 3.



Gambar 2. 3 Sumber gas pada sistem panas bumi (Simatupang et al., 2022)

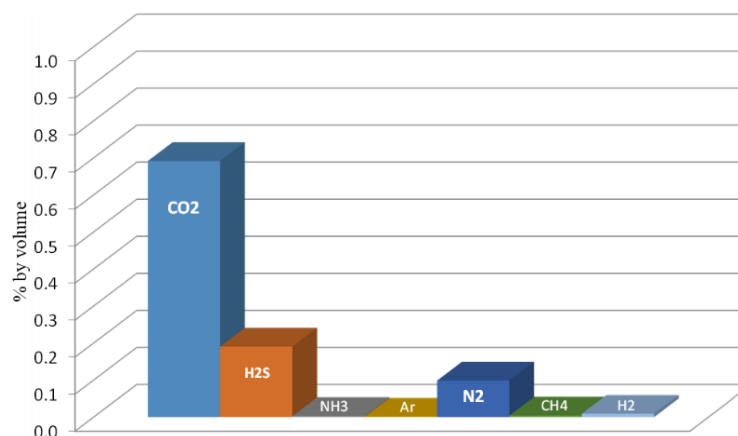
Kandungan NCG pada beberapa lapangan panas bumi di Indonesia disajikan pada Gambar 2. 4. Dari gambar tersebut terlihat bahwa kandungan NCG pada lapangan panas bumi yang diteliti ini berkisar antara 0,05 – 0,5 wt.%, atau relatif rendah dibandingkan lapangan panas bumi lainnya.



Source:
 INO: Geothermal Power Development Project - Dieng Unit 2 Project Component, 2019
 INO: Geothermal Power Development Project - Patuha Unit 2 Project Component, 2019
 INO: Rantlau Dendap Geothermal Power Project (Phase 2), 2018
 INO: Mubara Latah Geothermal Power Project, 2016
 Ulubetu Units 3 & 4 Supplemental ESIA - Volume II, 2014
 INO: Sarulla Geothermal Power Development Project, 2013

Gambar 2. 4 Kandungan NCG pada beberapa lapangan panas bumi di Indonesia (Simatupang et al., 2022)

Komposisi NCG pada sistem panas bumi dalam penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 2. 5, dimana terlihat bahwa fraksi gas pada NCG didominasi oleh gas CO₂ dan H₂S. Meskipun demikian, emisi CO₂ yang dihasilkan dari PLTP jauh lebih rendah dibandingkan dengan energi fosil (Ramazankhani et al., 2016). Fridriksson et al., (2017) dalam penelitiannya menyebutkan bahwa rata-rata emisi CO₂ dari PLTP secara global adalah 112 g/kWh, sedangkan emisi CO₂ dari energi fosil berkisar antara 350 – 580 g/kWh (gas alam), 650 – 700 g/kWh (minyak bumi), 750 – 1050 g/kWh (batubara). Bahkan emisi CO₂ dari PLTP pada penelitian ini jauh lebih rendah dibandingkan rata-rata emisi CO₂ global, yaitu hanya berkisar 19,6 g/kWh.



Gambar 2. 5 Komposisi gas pada lapangan panas bumi pada penelitian

Emisi gas lainnya dari PLTP yang juga berpotensi menimbulkan dampak negatif adalah H₂S. H₂S merupakan suatu gas yang bersifat larut dalam air, tidak berwarna, dan memiliki bau seperti telur busuk. Gas H₂S dapat berasal dari alam (sekitar 90% dari total H₂S di atmosfer), gas yang dihasilkan oleh bakteri anaerob yang mereduksi protein hewani dan nabati yang mengandung belerang, atau sebagai gas yang dilepaskan dari gunung berapi dan daerah panas bumi (Somma et al., 2017 dan de Crisci et al., 2019). Pada konsentrasi tertentu, H₂S dapat bersifat racun bagi kesehatan manusia yang dapat menyebabkan gangguan pernapasan, syaraf, metabolisme, dan dalam konsentrasi yang sangat tinggi dapat

menyebabkan kematian. Rangkuman efek H₂S bagi kesehatan manusia berdasarkan konsentrasi dapat dilihat pada Tabel 2. 1.

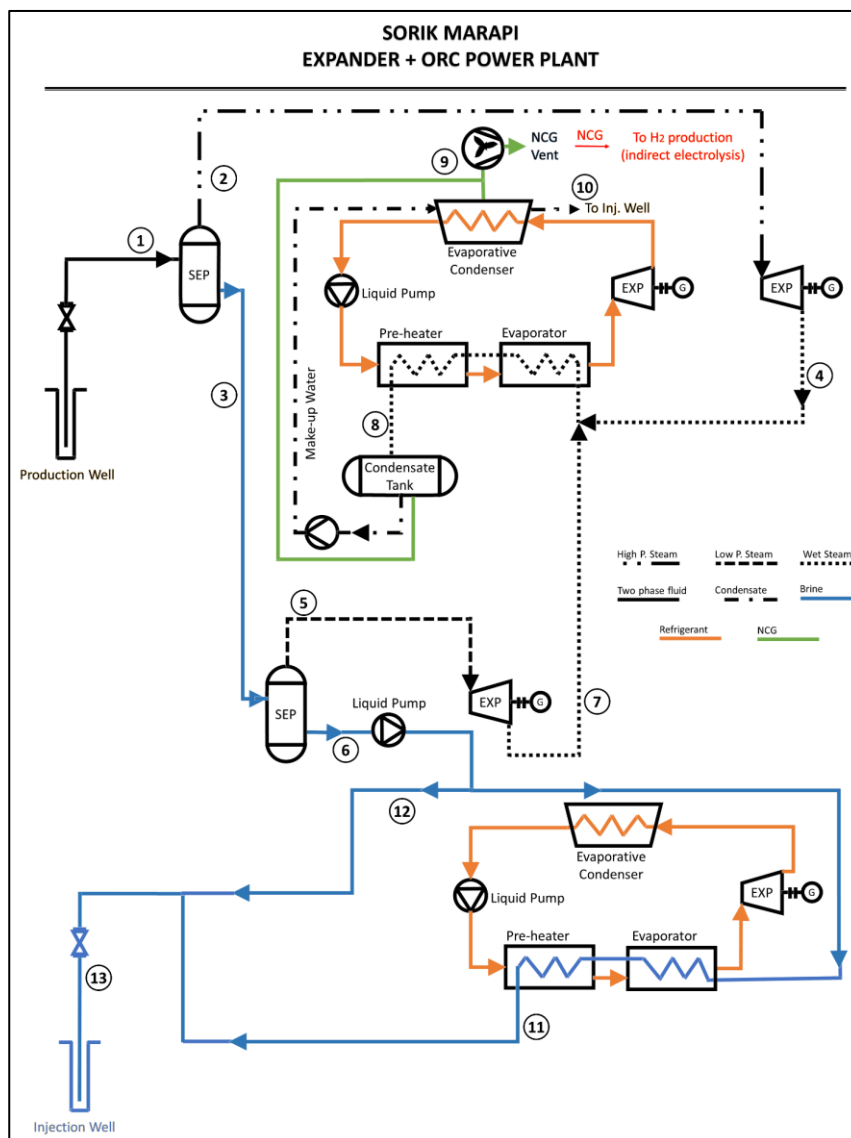
Tabel 2. 1 Efek H₂S bagi kesehatan manusia berdasarkan konsentrasi (OSHA)

Konsentrasi (ppm)	Efek / gejala yang ditimbulkan
0,00011-0,00033	Tipikal konsentrasi di udara
0,01-1,5	Bau mulai tercium khas telur busuk. Bau menjadi lebih menyengat pada konsentrasi 3-5 ppm, sedangkan di atas 30 ppm bau menjadi manis atau manis memuakkan
2-5	Kontak terlalu lama dapat menyebabkan mual, mata berair, sakit kepala, sulit tidur, dan gangguan saluran pernapasan pada beberapa pasien asma
20	Batas tingkat intoleransi H ₂ S dari segi kesehatan
50-100	Konsentrasi H ₂ S yang dapat menyebabkan iritasi mata
100	Konsentrasi minimal H ₂ S yang berdampak pada gangguan indera penciuman
200-300	Konsentrasi H ₂ S yang dapat menghilangkan indera penciuman
500-700	Konsentrasi H ₂ S yang dapat menyebabkan kematian dalam 30-60 menit
700-1000	Konsentrasi H ₂ S yang dapat menyebabkan kematian dalam beberapa menit
1000-2000	Konsentrasi H ₂ S yang dapat menyebabkan kematian langsung

H₂S dari area panas bumi dapat memberikan kontribusi ekonomis dalam proses produksi hidrogen. Menurut Stefanakos et al., (2007), biaya energi penguraian H₂S dan tegangan yang diperlukan dalam proses elektrolisis beberapa kali lebih rendah dibandingkan penguraian air. Pemanfaatan H₂S ini juga dapat berperan dalam mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan dan kesehatan manusia. Salah satu peluang pemanfaatan H₂S pada proses PLTP adalah dengan memanfaatkan H₂S dari *Non-Condensable Gas* yang diemisikan dari proses PLTP untuk memproduksi hidrogen.

Teknologi PLTP pada penelitian ini merupakan kombinasi antara sistem *flash steam (steam expander)* dengan *binary cycle (brine ORC dan steam ORC)* seperti diilustrasikan pada Gambar 2. 6. Emisi dihasilkan dari unit pembangkit *wet steam*

ORC. Hingga saat ini (operasional pembangkit unit-3), terdapat 21 unit steam ORC dengan teknologi yang sama yang beroperasi di PLTP wilayah studi. Gas H₂S bersama dengan gas-gas lainnya di dalam NCG diemisikan melalui NCG vent dan dilepaskan ke atmosfer. Guna mengurangi dampak negatif dari pelepasan emisi gas-gas terhadap lingkungan, emisi tersebut kemudian ditangkap untuk selanjutnya dikonversi menjadi hidrogen melalui proses elektrolisis.



Gambar 2. 6 Prinsip teknologi pembangkit listrik pada PLTP yang diteliti

Berdasarkan Gambar 2. 6 di atas, secara umum proses produksi listrik pada PLTP yang diteliti adalah sebagai berikut:

1. Fluida dua fase yang dihasilkan dari sumur produksi dialirkan menuju *HP Separator*, dimana fluida tersebut diproses pada tekanan pemisahan sebesar 9,0 bara untuk menghasilkan uap bertekanan tinggi dan brine.
2. Uap bertekanan tinggi yang terpisah dari unit *HP Separator* digunakan untuk menjalankan *steam expander unit*.
3. Air yang terpisah (brine) dari *HP Separator* dikumpulkan di sebuah *brine header* dan diangkut ke *LP Separator* dan dijalankan pada tekanan 8,6 bara untuk memproduksi uap bertekanan rendah dan brine.
4. Sistem pembuangan uap dari *steam expander* berupa *wet steam* dikumpulkan di *steam header* dan dipipakan menuju *demister* untuk menghilangkan kelembaban dari uap dan menghasilkan uap bertekanan rendah yang jenuh dari *demister* yang kemudian diumpankan ke *steam ORC Binary unit* untuk menghasilkan tenaga tambahan.
5. Uap bertekanan rendah yang terpisah dari unit *LP Separator* digunakan untuk menjalankan *steam expander unit*.
6. Brine bekas dari *LP separator* sebagian direinjeksikan ke reservoir melalui sumur reinjeksi, dan sebagian lagi digunakan untuk menjalankan unit brine *ORC Binary unit*.
7. Sisa *wet steam* dari *steam expander* dikumpulkan di *steam header* dan dipipakan menuju *demister* untuk menghilangkan kelembaban dari uap dan menghasilkan uap bertekanan rendah yang jenuh dari *demister* yang kemudian diumpankan ke *steam ORC Binary unit* untuk menghasilkan tenaga tambahan.
8. Uap dari proses 4 dan 7 digunakan untuk menguapkan fluida kerja berupa refrigerant (R245fa) yang sebelumnya terlebih dahulu telah menjalani proses penukar panas untuk meningkatkan temperatur dari fluida kerja. Uap dari fluida kerja akan menjalankan unit *expander*.
9. Sisa uap dari proses evaporasi kemudian ditampung pada kondensat tank untuk digunakan pada *evaporative condenser* untuk mengubah uap menjadi kondensat. Kondensat tersebut akan dialirkan ke *water box* sebagai pendingin *evaporative condenser*, ke *seal water* (sebagai pendingin pompa

brine dan EDP), serta dibuang ke pond untuk selanjutnya diinjeksikan kembali. Dalam proses ini dihasilkan emisi berupa NCG yang selanjutnya diemisikan melalui NCG *vent* yang berada di atas *evaporative condenser* menuju atmosfer.

10. Kondensat yang dikumpulkan di pond selanjutnya direinjeksikan kembali ke reservoir lewat sumur reinjeksi.
11. Brine bekas dari *LP separator* digunakan untuk menguapkan fluida kerja berupa refrigerant (R245fa) yang sebelumnya terlebih dahulu telah menjalani proses penukar panas untuk meningkatkan temperatur dari fluida kerja. Uap dari fluida kerja akan menjalankan unit *expander*.
12. Brine bekas dari *LP separator* sebagian direinjeksikan ke reservoir melalui sumur reinjeksi.
13. Brine bekas dari brine ORC binary unit bersama-sama dengan brine bekas dari *LP separator* direinjeksikan ke reservoir melalui sumur reinjeksi.

2.5 Elektrolisis H₂S dari NCG Menjadi Hidrogen

Produksi hidrogen dari elektrolisis H₂S memberikan keuntungan diantaranya hanya membutuhkan energi yang lebih sedikit dibandingkan pada elektrolisis air. Hal ini dapat dijelaskan bahwa entalpi pembentukan standar dari air (H₂O) adalah sebesar -68,32 kcal/mol, sedangkan entalpi pembentukan standar dari H₂S hanya -4,77 kcal/mol, yang berarti bahwa energi yang dibutuhkan untuk menguraikan air lebih besar dibandingkan untuk menguraikan H₂S (Ouali et al., 2011). Tinjauan umum proses elektrolisis H₂S menjadi hidrogen dijelaskan pada Tabel 2. 2.

Secara umum terdapat 3 metode elektrolisis H₂S menjadi hidrogen, yaitu metode langsung, metode tidak langsung, dan metode temperatur tinggi (Huang et al., 2019).

a. Metode langsung

Pada metode ini, elektrolisis terjadi secara langsung di permukaan elektroda. Energi yang dibutuhkan untuk elektrolisis langsung lebih rendah daripada elektrolisis tidak langsung karena tidak melibatkan reaksi lainnya, sehingga lebih menguntungkan secara ekonomi (Jangam et al., 2021). Metode ini

memiliki kelemahan yaitu terjadinya pasivasi elektroda oleh unsur belerang, sehingga pemisahan belerang menjadi tantangan tersendiri (Huang et al., 2019).

b. Metode tidak langsung

Metode ini melibatkan pembentukan oksidan atau zat antara/intermediet pada permukaan elektroda. Keuntungan dari metode ini adalah memiliki fleksibilitas dalam operasionalnya serta tidak terjadinya pasivasi pada elektroda karena belerang telah lebih dulu dipisahkan sebelum memasuki elektrolizer (Huang et al., 2019). Namun metode ini membutuhkan energi yang lebih besar untuk menjalankan reaksi elektrokimia sampingan lainnya (Jangam et al., 2021).

c. Metode temperatur tinggi

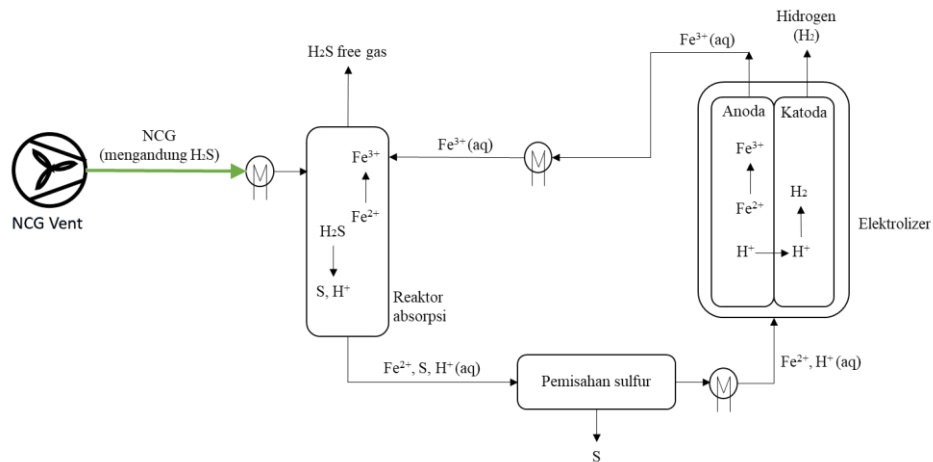
Sesuai dengan namanya, metode ini memungkinkan untuk pemrosesan H₂S yang mengandung aliran gas panas seperti gas batubara yang memiliki temperatur di atas 600°C (Jangam et al., 2021).

Tabel 2. 2 Tinjauan umum elektrolisis H₂S menjadi hidrogen (Chan et al., 2023)

Keuntungan	<ul style="list-style-type: none"> - Reaksi elektrolisis dapat berlangsung dalam fase gas dari H₂S - Reaksi dapat berjalan secara langsung dan sederhana - Konversi H₂S yang tinggi hingga 100%
Kelemahan	<ul style="list-style-type: none"> - Ekstraksi atau penghilangan residu belerang yang relatif sulit - Laju produksi H₂ rendah, tidak sekompetitif proses reformasi metana - Diperlukan kondisi khusus (seperti temperatur dan tekanan) untuk elektrolit padat agar dapat beroperasi dengan konversi tinggi
Persyaratan teknis	<ul style="list-style-type: none"> - Pada metode elektrolisis tidak langsung dibutuhkan energi listrik yang lebih tinggi - Pada metode langsung, perlunya penambahan pelarut organik untuk menghilangkan pasivasi belerang di anoda - Terjadinya co-oksidan kimiawi pada metode tidak langsung - Persyaratan temperatur reaksi antara 27-127°C
Pemisahan selektif H ₂ S dalam umpan	<ul style="list-style-type: none"> - Direkomendasikan untuk memiliki konsentrasi H₂S yang tinggi untuk meminimalkan reaksi sekunder yang tidak diinginkan - Konversi simultan CO₂ & H₂S (kasus konsentrasi rendah) dapat

	dicapai dengan desain elektrokatalis membran yang tepat
Dampak lingkungan	<ul style="list-style-type: none"> - Tidak dihasilkan gas rumah kaca CO₂ - Mudah diintegrasikan dengan sumber energi terbarukan - Sistem pemanas suhu rendah meminimalkan penciptaan polutan lingkungan - Produksi H₂ sebagai energi bersih

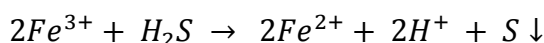
Untuk studi kasus pada penelitian ini, metode elektrolisis tidak langsung menjadi yang paling efektif untuk diterapkan mengingat H₂S merupakan salah satu gas yang terkandung di dalam NCG, sehingga perlu dipisahkan terlebih dahulu dari gas-gas lainnya agar tidak mengganggu proses elektrolisis dan dapat menghasilkan produk gas hidrogen yang lebih tinggi. Salah satu metode elektrolisis tidak langsung yang diterapkan pada penelitian ini adalah metode hibrid Fe-Cl. Prinsip dari metode ini adalah desulfurisasi gas yang mengandung H₂S melalui proses absorpsi di dalam larutan besi yang sangat asam, kemudian dilanjutkan dengan elektrolisis untuk meregenerasi absorben dan menghasilkan hidrogen (Vala Matthíasdóttir, 2006).



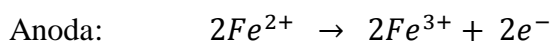
Gambar 2. 7 Diagram alir pemisahan gas H₂S pada NCG dalam proses elektrolisis secara tidak langsung (dimodifikasi dari Huang et al., 2019)

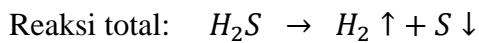
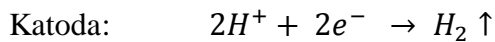
Reaksi yang terjadi selama proses adalah sebagai berikut (Huang et al., 2019):

Reaksi absorpsi:



Reaksi elektrolisis:





Pada prinsipnya, proses ini berlangsung dalam 3 tahap yaitu absorpsi H_2S secara kimia, pemisahan endapan belerang, dan elektrolisis untuk meregenerasi absorben dan menghasilkan hidrogen (Gambar 2. 7). Gas hidrogen sulfida dalam NCG direaksikan dengan ion Fe^{3+} untuk membentuk endapan belerang dan H^+ dalam larutan asam, sedangkan ion Fe^{3+} direduksi menjadi ion Fe^{2+} dalam reaktor absorpsi. Sekitar 99% H_2S dalam umpan dapat dihilangkan pada kondisi optimum temperatur $70^\circ C$ (Adewale et al., 2015; Vala Matthíasdóttir, 2006). Pada kondisi operasional normal, NCG yang diemisikan dari NCG *vent* pada PLTP yang diteliti memiliki temperatur $30^\circ C$, sehingga perlu penambahan unit *heat exchanger* untuk mencapai hasil pemisahan yang optimum. Selanjutnya proses pemisahan belerang dapat dilakukan secara fisika maupun kimia. Dalam proses elektrolisis, ion Fe^{2+} dioksidasi menjadi ion Fe^{3+} di anoda, dan pada saat yang sama proton hidrogen mencapai katoda melalui membran penukar proton dan direduksi menjadi hidrogen. Oleh karena reaksi berlangsung dalam kondisi yang sangat asam, maka elektroda sel elektrolitik sebaiknya terbuat dari bahan tahan asam seperti grafit atau serat karbon (Adewale et al., 2015). Secara teoritis, jumlah hidrogen yang dihasilkan sama dengan jumlah H_2S yang terabsorpsi (Huang et al., 2019).

2.6 Analisis Termodinamika

Secara fundamental, termodinamika dibangun terutama berdasarkan atas dua hukum yang dikenal sebagai hukum termodinamika I dan hukum termodinamika II. Hukum termodinamika I menjelaskan mengenai prinsip kekekalan energi yang menegaskan bahwa energi dapat berubah dari satu bentuk ke bentuk lain selama proses namun jumlah total energi tetap konstan, sedangkan hukum termodinamika II menegaskan bahwa energi memiliki kualitas maupun kuantitas dan proses aktual terjadi dalam arah penurunan kualitas energi (Kanoglu et al., 2009). Kriteria yang paling umum digunakan untuk menilai kinerja suatu sistem energi adalah dengan menghitung efisiensinya. Efisiensi didefinisikan sebagai kemampuan untuk menghasilkan efek yang diinginkan tanpa pemborosan, atau

dengan penggunaan energi, waktu, dan sumber daya yang minimum (Rosen, 2002). Efisiensi energi dan efisiensi eksergi dapat digunakan untuk menilai kinerja dari suatu sistem konversi energi.

a. Efisiensi energi

Efisiensi energi didefinisikan sebagai rasio energi yang ditransfer ke tujuan akhir sistem dibagi dengan input energi aktual ke sistem (Nakicenovic et al., 1996). Efisiensi energi berbasis hukum pertama termodinamika (Lior & Zhang, 2007) dan seringkali menyesatkan karena efisiensi energi tidak memberikan ukuran seberapa dekat suatu proses dengan kondisinya, serta kehilangan energi bisa terjadi dalam jumlah besar padahal sebenarnya tidak begitu signifikan secara termodinamika (Rosen, 2002) karena tidak memperhitungkan kualitas energi. Efisiensi energi dapat dinyatakan dalam persamaan berikut (Kanoglu et al., 2009):

$$\eta_E = \frac{\text{Energi yang berguna dari proses}}{\text{Energi yang berguna untuk proses}}$$

b. Efisiensi eksergi

Eksergi didefinisikan sebagai jumlah kerja maksimum yang dapat dihasilkan oleh suatu sistem atau aliran materi atau energi pada saat mencapai kesetimbangan dengan lingkungannya (Kanoglu et al., 2009; Karakatsanis, 2016; Rosen, 2002; Shao et al., 2018). Analisis eksergi merupakan suatu metodologi yang menggabungkan prinsip kekekalan energi (hukum termodinamika I) dan prinsip entropi non-kekekalan (hukum termodinamika II) untuk melakukan analisis, desain, dan peningkatan energi (Rosen et al., 2008). Dengan demikian pada analisis eksergi diakui bahwa energi tidak dapat diciptakan dan dimusnahkan, namun kualitasnya dapat menurun selama proses hingga tercapainya kesetimbangan dengan lingkungannya. Analisis eksergi memberikan gambaran energi secara kuantitatif dan kualitatif, dimana penurunan kualitas dalam sistem sering disebut sebagai eksergi penghancuran (Ibrahim et al., 2017) yang disebabkan oleh

ireversibilitas dalam proses (perpindahan panas, reaksi kimia, pencampuran, pemuaiian, dan lain-lain) (Gundersen, 2011). Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa efisiensi eksergi sebagai efisiensi nyata, sedangkan efisiensi energi sebagai efisiensi prakiraan nyata.

$$\eta_{Ex} = \frac{\text{Eksergi yang berguna dari proses}}{\text{Total eksergi proses}} = \frac{\text{Eksergi out}}{\text{Eksergi in}}$$

Eksergi menggambarkan kesempurnaan proses atau peralatan lebih akurat, lebih tepat, dan lebih komprehensif serta dapat digunakan untuk mengukur tingkat irreversibilitas suatu proses (Shao et al., 2018). Eksergi juga dapat mengidentifikasi lebih baik daripada energi terkait manfaat lingkungan dan ekonomi dari suatu teknologi. (Rosen et al., 2008).

Nilai efisiensi eksergi bisa lebih rendah maupun lebih tinggi dari efisiensi energi. Efisiensi eksergi yang lebih tinggi mencerminkan kualitas energi yang lebih tinggi yang digunakan dalam sistem, sehingga membuat sistem lebih berkelanjutan. Sebaliknya, efisiensi eksergi yang lebih rendah mencerminkan besarnya kehilangan energi, sehingga keberlanjutan sistem menjadi tidak baik (Dincer & Abu-Rayash, 2020). Oleh karena itu, indikator efisiensi eksergi dianggap sebagai alat bantu yang berguna untuk memaksimalkan manfaat dan penggunaan sumber daya secara efisien.

Dalam melakukan analisis dan desain suatu sistem energi, analisis secara termodinamika (energi dan eksergi) yang dipadukan dengan analisis ekonomi digunakan untuk mencapai desain yang optimal, karena saat ini aspek ekonomi penting dalam mengevaluasi teknologi energi hijau.

2.7 Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), dan Payback Period (PBP) dalam Analisis Tekno-Ekonomi

Analisis tekno-ekonomi dilakukan untuk mengevaluasi profitabilitas dan kelayakan ekonomi untuk produksi hidrogen dari H₂S pada PLTP melalui proses elektrolisis. Komponen parameter ekonomi secara terperinci diklasifikasikan menjadi belanja modal (CAPEX) dan belanja operasional (OPEX) (Lee et al., 2021), dimana dalam penelitian ini CAPEX meliputi sistem elektrolisis dan

komponen pendukungnya, sedangkan OPEX meliputi biaya listrik, operasional proses, pemeliharaan, dan lainnya. Beberapa parameter berikut digunakan dalam analisis ekonomi:

a. *Net Present Value* (NPV)

Dengan menggunakan metode NPV, nilai sekarang dari semua arus kas masuk dibandingkan dengan nilai sekarang dari semua arus kas keluar yang terkait dengan investasi proyek. Selisih antara nilai kas sekarang dari arus kas ini disebut dengan NPV, yang dapat digunakan untuk menentukan apakah suatu investasi proyek dapat dinyatakan layak atau tidak (Jang, Kim et al., 2022). Nilai NPV positif menunjukkan bahwa suatu proyek layak secara ekonomi, dan sebaliknya jika nilai NPV bernilai negatif maka dikatakan bahwa proyek tidak layak secara ekonomi (Ait Lahoussine Ouali et al., 2022). NPV dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Jang, Kim et al., 2022):

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{CF_n}{(1+r)^n} - I_0$$

Dimana:

NPV = *Net Present Value* (Rp)

N = Umur proyek (tahun)

CF_n = Arus kas per tahun pada periode n

I_0 = Nilai investasi awal pada tahun ke-0 (Rp)

r = tingkat suku bunga (%)

n = lama investasi (tahun)

b. *Internal Rate of Return* (IRR)

IRR mewakili hasil bunga sebenarnya yang diberikan oleh proyek selama masa pakainya, atau sering disebut juga dengan *Return of Investment* (ROI), yaitu tingkat pengembalian yang disesuaikan dengan waktu. IRR dihitung dengan mencari tingkat suku bunga yang menyebabkan NPV proyek sama

dengan nol. Jika IRR proyek sama dengan atau lebih dari tingkat suku bunga yang disyaratkan investor, maka kemungkinan besar proyek tersebut dianggap layak. Sebaliknya jika lebih kecil maka proyek dianggap tidak menguntungkan (Bakos & Soursos, 2002). Meskipun NPV adalah faktor utama untuk mengevaluasi kelayakan ekonomi suatu proyek, namun dengan menganalisis IRR dapat memperkuat hasil evaluasi guna pengambilan keputusan yang lebih tepat.

$$NPV = \sum_{n=1}^N \frac{CF_n}{(1 + IRR)^n} - I_0 = 0$$

c. *Payback Period (PBP)*

PBP mewakili lamanya waktu yang dibutuhkan oleh suatu proyek untuk menutup biaya awal/investasinya sendiri dari penerimaan kas yang dihasilkannya (Martins et al., 2023). PBP dapat dihitung jika NPV menunjukkan nilai yang positif. Arus kas dari tahun yang menunjukkan hasil positif merepresentasikan lamanya waktu yang dibutuhkan suatu proyek untuk menutup biaya investasi awalnya sendiri dari arus kas proyek yang dihasilkan (Bakos & Soursos, 2002)