

BAB II

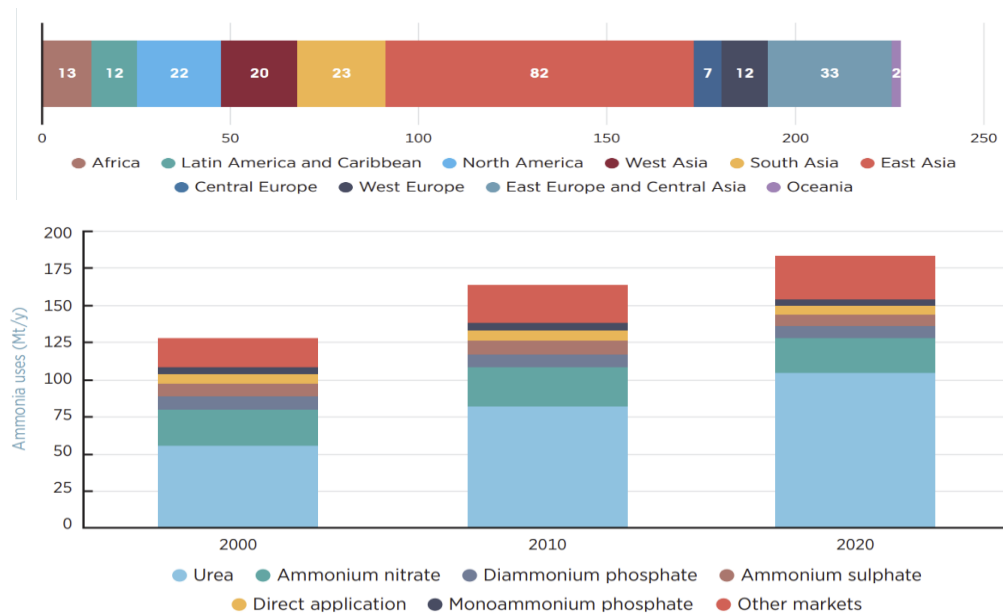
TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Amonia (NH₃) sebagai Bahan Bakar Alternatif

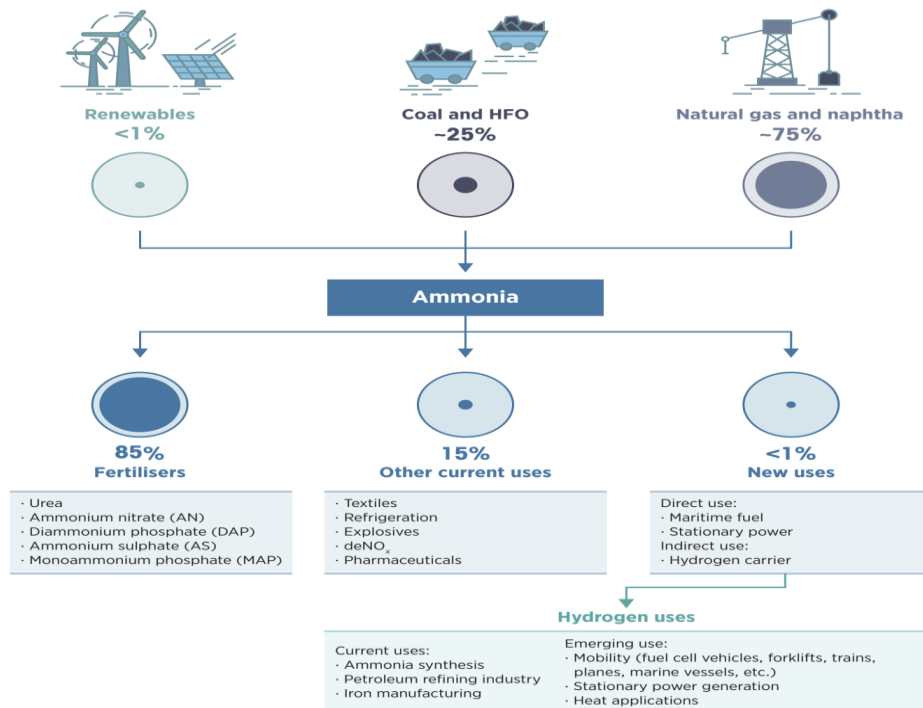
Amonia (NH₃) merupakan senyawa kimia yang tersusun dari unsur nitrogen dan hidrogen dengan rumus kimia NH₃. Senyawa ini bersifat mudah larut dalam air, memiliki bau yang khas, dan telah lama digunakan secara luas dalam berbagai sektor industri, terutama sebagai bahan baku pupuk, refrigeran, serta bahan kimia antara (Monnery dkk. 2001). Dalam beberapa tahun terakhir, amonia mulai mendapat perhatian sebagai bahan bakar alternatif, khususnya dalam konteks transisi energi dan upaya dekarbonisasi sektor pembangkitan listrik (Adi Saputra dkk. 2024; Kim dkk. 2023) .

Salah satu keunggulan utama amonia sebagai bahan bakar adalah tidak adanya kandungan karbon di dalam struktur molekulnya. Pada proses pembakaran ideal, amonia tidak menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂), sehingga berpotensi menurunkan emisi gas rumah kaca apabila digunakan sebagai pengganti sebagian bahan bakar fosil. Karakteristik ini menjadikan amonia sebagai kandidat bahan bakar yang menarik, khususnya untuk pembangkit listrik yang saat ini masih sangat bergantung pada Batubara (Xu dkk. 2022).

Secara global, produksi amonia masih didominasi oleh proses yang berbasis energi fosil, terutama gas alam. Pada tahun 2020, kapasitas produksi amonia dunia mencapai sekitar 243 juta ton, dengan kawasan Asia sebagai produsen terbesar. Dari total produksi tersebut, sekitar 175 juta ton dimanfaatkan, dengan sebagian besar digunakan untuk industri pupuk, khususnya produksi urea (Rouwenhorst dan Castellanos 2022a). Meskipun demikian, perkembangan teknologi energi terbarukan mendorong peningkatan minat terhadap pemanfaatan amonia di sektor energi, termasuk sebagai bahan bakar pembangkit listrik.



Gambar 2. 1 Kapasitas Produksi dan konsumsi Ammonia Global, 2020. (Rouwenhorst dan Castellanos 2022a)



Gambar 2. 2 Penggunaan ammonia, 2020. (Rouwenhorst dan Castellanos 2022b)

Seiring dengan meningkatnya komitmen berbagai negara dan praktisi energi dalam menurunkan emisi karbon global, amonia mulai dilirik oleh para peneliti sebagai salah satu bahan bakar alternatif di masa depan. Pada tahun 2021, tercatat bahwa sekitar 36% energi listrik dunia masih dihasilkan dari PLTU batubara, yang menjadi salah satu penyumbang utama emisi CO₂ dan pemicu peningkatan temperatur permukaan bumi yang berkontribusi terhadap fenomena *global warming* (Miao dkk. 2024). Dalam konteks tersebut, amonia dipilih sebagai kandidat energi alternatif karena memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan bahan bakar hidrokarbon lainnya, bahkan dibandingkan hidrogen (H₂) (Valera-Medina dkk. 2018). Beberapa keunggulan utama amonia sebagai bahan bakar alternatif antara lain sebagai berikut:

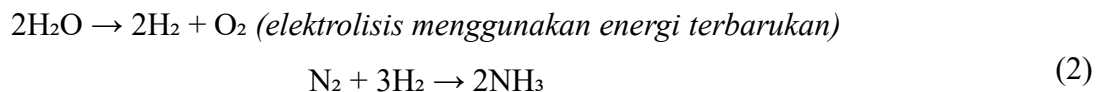
1. Bebas karbon, sehingga tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca CO₂ saat pembakaran.
2. Memiliki energy density sebesar sekitar 22,5 MJ/kg, yang sebanding dengan batubara tipe *Low Rank Coal* yang berkisar sekitar 20 MJ/kg. Sebagai perbandingan, gas alam memiliki nilai kalor sekitar 55 MJ/kg, LNG sekitar 54 MJ/kg, dan hidrogen sekitar 142 MJ/kg.
3. Biaya penyimpanan energi yang relatif lebih rendah dibandingkan hidrogen, yaitu sekitar 0,54 US\$/kg-H₂, sedangkan biaya penyimpanan hidrogen dapat mencapai 14,92 US\$/kg-H₂.
4. Proses distribusi dan transportasi yang lebih mudah dibandingkan hidrogen.
5. Amonia dapat dicairkan dengan relatif mudah melalui proses kompresi pada tekanan sekitar 0,8 MPa pada suhu atmosfer.
6. Infrastruktur produksi, penyimpanan (*storage*), distribusi, serta sistem tata niaga amonia telah berkembang dengan baik karena telah lama digunakan dalam industri kimia.

Berdasarkan metode produksinya, amonia dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis utama, yaitu *grey ammonia*, *blue ammonia*, dan *green ammonia*. *Grey ammonia* merupakan amonia yang diproduksi menggunakan bahan bakar fosil, umumnya gas alam, melalui proses *steam methane reforming* (SMR). Hidrogen yang dihasilkan dari gas alam kemudian direaksikan dengan nitrogen dalam proses Haber–Bosch untuk membentuk amonia. Proses produksi ini menghasilkan emisi karbon dioksida (CO₂) yang tidak ditangkap, sehingga memiliki jejak karbon yang relatif tinggi. Keunggulan *grey ammonia* terletak pada biaya produksinya yang relatif rendah, namun kelemahannya adalah tidak ramah lingkungan. Reaksi kimia utama pada proses ini dapat dituliskan sebagai berikut:



Blue ammonia diproduksi melalui proses yang serupa dengan *grey ammonia*, namun dilengkapi dengan teknologi *Carbon Capture and Storage* (CCS) untuk menangkap dan menyimpan emisi CO₂ yang dihasilkan selama proses produksi. Dengan penerapan CCS, dampak lingkungan dari *blue ammonia* menjadi lebih rendah dibandingkan *grey ammonia*. Meskipun demikian, penggunaan teknologi CCS menambah biaya produksi, serta efektivitasnya sangat bergantung pada ketersediaan dan keandalan infrastruktur penyimpanan karbon (Hossain dkk. 2023).

Green ammonia merupakan amonia yang diproduksi menggunakan hidrogen yang dihasilkan dari proses elektrolisis air dengan sumber energi terbarukan, seperti tenaga surya, angin, atau hidro. Hidrogen tersebut kemudian direaksikan dengan nitrogen melalui proses Haber–Bosch untuk menghasilkan amonia (Salmon dan Bañares-Alcántara 2021). Proses ini tidak menghasilkan emisi karbon, sehingga *green ammonia* dianggap sebagai bentuk amonia yang paling ramah lingkungan. Namun demikian, biaya produksi *green ammonia* masih relatif tinggi karena ketergantungannya pada energi terbarukan yang umumnya memiliki biaya investasi awal yang besar. Reaksi kimia pada proses ini dapat dituliskan sebagai berikut:



Tabel 2. 2 Klasifikasi jenis produksi Ammonia

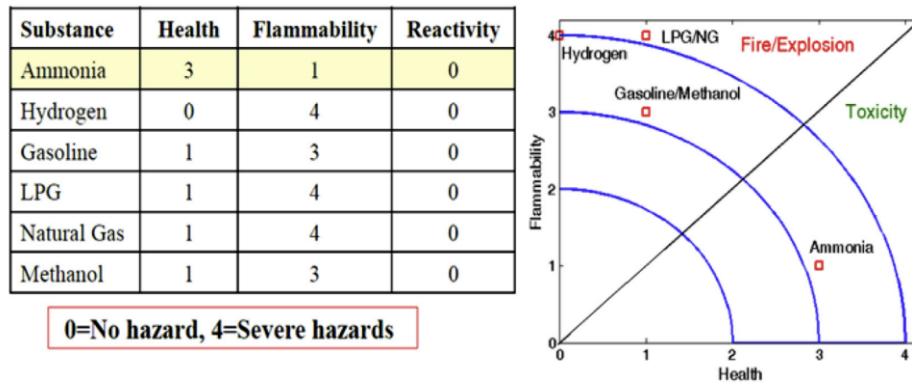
Kategori	Grey Ammonia	Blue Ammonia	Green Ammonia
Sumber Energi	Gas alam (fosil)	Gas alam (fosil)	Energi terbarukan
Emisi CO ₂	Tinggi (tidak ditangkap)	Rendah (ditangkap CCS)	Nol
Biaya Produksi	Rendah	Sedang	Tinggi
Dampak Lingkungan	Tinggi	Sedang	Rendah

Hasil produksi dari metode *green ammonia* sering juga disebut sebagai amonia sintesis. Pengembangan teknologi amonia sintesis hingga saat ini masih terus dilakukan dengan tujuan menurunkan biaya produksi agar dapat mencapai skala ekonomi yang lebih baik (Ye dan Tsang 2023). Meskipun memiliki potensi yang besar, pembakaran amonia merupakan proses yang relatif sulit, terutama karena reaktivitas pembakarannya yang rendah dibandingkan bahan bakar hidrokarbon. Amonia memiliki rasio bahan bakar–udara (*Air–Fuel Ratio*, AFR) stoikiometris sebesar 6,06 berdasarkan berat. Reaksi pembakaran amonia secara ideal dapat dituliskan sebagai berikut:



Reaksi tersebut menunjukkan bahwa pembakaran amonia menghasilkan nitrogen (N₂) dan uap air (H₂O) tanpa menghasilkan CO₂. Namun, dalam kondisi pembakaran aktual, reaksi ini berpotensi menghasilkan nitrogen oksida (NO_x) yang dapat menyebabkan pencemaran udara serta berdampak negatif terhadap kesehatan manusia dan lingkungan apabila tidak dikendalikan dengan baik (Bora dkk. 2024).

Dari aspek keselamatan, *National Fire Protection Association* (NFPA) di Amerika Serikat telah mengklasifikasikan amonia sebagai zat beracun, sehingga menjadikannya bahan kimia yang berisiko terhadap kesehatan. Akan tetapi, karena sifat reaktivitasnya yang relatif rendah, bahaya yang ditimbulkan akibat kebakaran atau ledakan yang tidak disengaja umumnya lebih rendah dibandingkan bahan bakar gas dan cair lainnya (Shea dkk. 2013).



Gambar 2. 3 Toxicity Level Ammonia (Shea dkk. 2013)

2.2. Boiler dan Perhitungan Efisiensi Boiler

Salah satu komponen utama pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) adalah boiler. Boiler merupakan suatu bejana tertutup yang berfungsi untuk mengubah air menjadi uap dengan memanfaatkan panas yang dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar (Wu dkk. 2015). Uap yang dihasilkan selanjutnya digunakan sebagai fluida kerja untuk menggerakkan turbin uap yang terhubung dengan generator guna menghasilkan energi listrik (Dongfang Boiler Group Co. 2019). Secara umum, sistem kerja boiler pada PLTU terdiri dari beberapa subsistem utama, yaitu sebagai berikut (Al-Taha dan Osman 2018; Ameri dkk. 2009):

1. Sistem air pengisi boiler, yaitu sistem yang berfungsi menyediakan air pengisi sesuai dengan kebutuhan produksi uap. Sistem ini dimulai dari *condenser* yang berfungsi mengkondensasikan uap bekas dari turbin menjadi air. Air tersebut kemudian dipompa menuju boiler menggunakan *Boiler Feed Pump* (BFP) melalui rangkaian peralatan pendukung seperti *deaerator*, *Low Pressure Heater* (LP Heater), dan *High Pressure Heater* (HP Heater).
2. Sistem uap, yaitu sistem yang berfungsi mengubah air pengisi menjadi uap dengan memanfaatkan panas hasil pembakaran bahan bakar. Pada sistem ini, temperatur air pengisi dinaikkan hingga menghasilkan uap *superheated* (*superheated steam*) dan uap *reheated* (*reheated steam*) sesuai dengan kebutuhan operasi turbin.
3. Sistem bahan bakar, yaitu sistem yang berfungsi mengubah energi kimia yang terkandung dalam bahan bakar menjadi energi panas melalui proses pembakaran. Temperatur gas hasil pembakaran di dalam furnace dapat mencapai sekitar 1100 °C dan dapat diatur sesuai dengan kebutuhan produksi uap.

4. Sistem udara pembakaran, yaitu sistem yang memasok udara yang dibutuhkan dalam proses pembakaran. Udara pembakaran pada boiler umumnya dibagi menjadi *primary air* dan *secondary air*. *Primary air* berfungsi sebagai pemasok udara utama pembakaran sekaligus untuk mentransportasikan batubara halus dari *pulverizer* menuju *furnace*, sedangkan *secondary air* berfungsi untuk menambah pasokan udara pembakaran serta mengatur besarnya *excess air*.
5. Sistem gas buang, atau *flue gas system*, yaitu sistem yang menangani gas buang hasil pembakaran. Gas buang membawa panas sisa untuk memanaskan air hingga menjadi uap, kemudian mengalir melalui *Electrostatic Precipitator* (ESP) yang berfungsi menangkap partikel abu terbang sebelum gas buang dilepaskan ke atmosfer melalui *stack*.

Boiler yang digunakan pada PLTU Banten 2 Labuan merupakan boiler bertipe *sub-critical, natural circulation, drum type, single furnace, tangential firing, dan balanced draft*. Dari sisi penanganan bahan bakar, boiler ini termasuk dalam kategori *pulverized coal boiler*, di mana batubara digiling hingga ukuran halus sebelum dibakar di dalam *furnace*. Uap yang dihasilkan berupa uap *superheat* dengan tekanan dan temperatur tinggi, yang selanjutnya digunakan untuk menggerakkan turbin uap yang dirangkai dengan generator guna menghasilkan energi listrik.

Tabel 2. 3 Spesifikasi Boiler PLTU Banten 2 Labuan

Parameter	Unit	BMCR	BRL
<i>Main steam flow</i>	t/h	1025	959
<i>Main steam outlet pressure</i>	Mpa _(g)	17,4	17,23
<i>Main steam outlet temperature</i>	°C	541	541
<i>Reheated steam flow</i>	t/h	841	786
<i>Reheated steam inlet pressure</i>	Mpa _(g)	3,8	3,54
<i>Reheated steam outlet pressure</i>	Mpa _(g)	3,63	3,38
<i>Reheated steam inlet temperature</i>	°C	330	322
<i>Reheated steam outlet temperature</i>	°C	540	541
<i>Feed Water Temperature</i>	°C	280	275
<i>Air Heater inlet temperature</i>	°C	30	30
<i>Air Heater outlet temperature (PA)</i>	°C	363	362
<i>Air Heater outlet temperatur (SA)</i>	°C	355	354

Efisiensi boiler merupakan parameter yang menunjukkan kemampuan boiler dalam mengonversikan energi kimia yang terkandung di dalam bahan bakar menjadi energi panas yang dimanfaatkan untuk menghasilkan uap. Efisiensi boiler didefinisikan sebagai persentase energi panas dari bahan bakar yang secara efektif digunakan dalam proses pembangkitan uap. Semakin tinggi nilai efisiensi boiler, semakin kecil kehilangan energi panas yang terjadi selama proses pembakaran dan perpindahan panas.

Berdasarkan standar *ASME PTC 4-1 Power Test Code for Steam Generating Units*, terdapat dua metode yang umum digunakan untuk menganalisis efisiensi boiler, yaitu metode langsung dan metode tidak langsung (Farhad dkk. 2005). Metode langsung membandingkan energi panas yang diserap oleh fluida kerja (air dan uap) dengan energi panas yang dilepaskan oleh bahan bakar, sedangkan metode tidak langsung menghitung efisiensi boiler berdasarkan total kehilangan panas (*heat losses*) yang terjadi selama proses pembakaran (ASME 2014).

2.2.1. Perhitungan Efisiensi Boiler Metode Langsung

Metode langsung sering disebut sebagai metode *input–output*, karena perhitungan efisiensi hanya didasarkan pada energi panas keluaran dan energi panas masukan. Energi panas keluaran merupakan energi yang dipindahkan ke fluida kerja untuk menghasilkan uap superheater, sedangkan energi panas masukan berasal dari bahan bakar yang dibakar di dalam boiler. Secara umum, formulasi perhitungan efisiensi boiler dengan metode langsung dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta) = \frac{\text{Heat Output}}{\text{Heat Input}} \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta) = \frac{\text{Steam flow rate} \times (\text{steam enthalpy} - \text{feed water enthalpy})}{\text{Fuel firing rate} \times \text{GCV}} \times 100 \quad (5)$$

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta) = \frac{Q \times (h_g - h_f)}{q \times \text{GCV}} \times 100\% \quad (6)$$

Di mana:

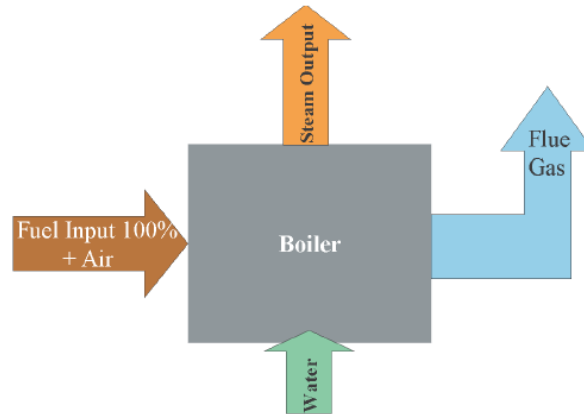
Q : *Flow rate steam* yang diproduksi (kg/jam)

h_g : *Enthalpy steam* jenuh (kcal/kg)

h_f : *Enthalpy air* (kcal/kg)

q : *Flow rate* pemakaian batubara (kg/jam)

GCV : Nilai kalori batubara (kcal/kg)

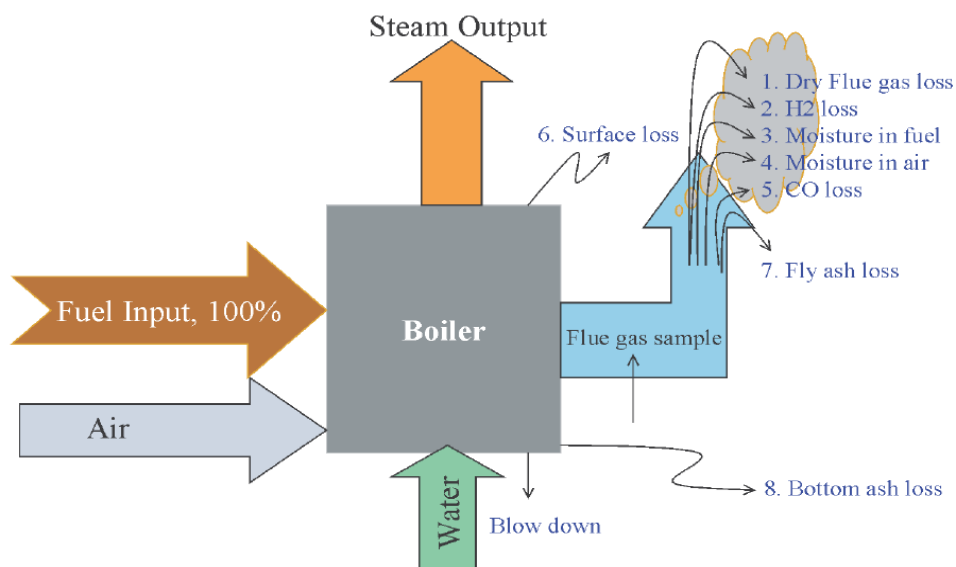


Gambar 2. 4 Diagram Analisis Efisiensi Boiler dengan Metode Langsung

2.2.2. Perhitungan Efisiensi Boiler Metode Tidak Langsung

Metode perhitungan efisiensi boiler secara tidak langsung dikenal sebagai metode *heat loss*. Pada metode ini, efisiensi boiler diperoleh dengan mengurangi total kehilangan panas yang terjadi dari energi panas masukan sebesar 100%. Diagram analisis efisiensi boiler menggunakan metode tidak langsung ditunjukkan pada Gambar 2.2. Secara matematis, efisiensi boiler dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\text{Efisiensi Boiler } (\eta) = [100 - (L1 + L2 + L3 + L4 + L5 + L6 + L7 + L8)]\% \quad (7)$$



Gambar 2. 5 Diagram Analisa Efisiensi Boiler dengan Metode Tidak Langsung

Kehilangan panas (losses) yang terjadi pada boiler berbahan bakar padat (solid fuel fired boiler) meliputi:

1. Kehilangan panas karena gas buang kering (L1)
2. Kehilangan panas akibat penguapan air yang berasal dari kandungan hidrogen (H_2) dalam bahan bakar (L2)
3. Kehilangan panas akibat penguapan kadar air (*moisture*) dalam bahan bakar (L3)
4. Kehilangan panas akibat kandungan air dalam udara pembakaran (L4)
5. Kehilangan panas akibat pembakaran tidak sempurna yang ditandai dengan terbentuknya CO (L5)
6. Kehilangan panas akibat radiasi, konveksi, dan kehilangan lain yang tidak terhitung (L6)
7. Kehilangan panas akibat adanya karbon tak terbakar (*unburnt carbon*) pada *fly ash* (L7)
8. Kehilangan panas akibat adanya karbon tak terbakar pada *bottom ash* (L8)

Berdasarkan standar ASME PTC 4-1, seluruh komponen kehilangan panas tersebut harus dihitung untuk memperoleh nilai efisiensi boiler dengan metode tidak langsung. Sebelum menghitung masing-masing *losses*, diperlukan perhitungan kebutuhan udara pembakaran teoritis, udara berlebih (*excess air*), serta pasokan udara aktual per satuan massa bahan bakar. Selanjutnya, perhitungan kebutuhan udara pembakaran teoritis (*theoretical air*), udara berlebih (*excess air*), massa udara aktual, serta perhitungan masing-masing komponen kehilangan panas (L1 hingga L8) dilakukan berdasarkan analisis unsur bahan bakar dan parameter operasi boiler, sebagaimana dirumuskan pada persamaan-persamaan berikut.

a. *Theoretical air required for combustion* (TA)

$$\text{Theoretical air} = [(11.6C) + \{34.8(H_2 - O_2/8)\} + (4.35S)]/100 \text{ kg/kg of fuel} \quad (8)$$

Di mana:

- C = persentase *carbon* di batubara
 H_2 = persentase *hydrogen* di batubara
 O_2 = persentase *oxygen* di batubara
S = persentase *sulphur* di batubara

b. *Excess air supplied* (EA)

$$\text{Excess air supplied (EA)} = \frac{O_2\%}{21 - O_2\%} \times 100 \quad (9)$$

Persentase O₂ diperoleh dari hasil pengukuran gas buang. Jika pengukuran O₂ tidak tersedia, maka menggunakan pengukuran CO₂ pada gas buang sehingga perhitungan *excess air* menjadi seperti berikut:

$$\text{Excess air supplied (EA)} = \frac{7900x[(CO_2\%)t - (CO_2\%)a]}{(CO_2\%)a \times [100 - (CO_2\%)t]} \quad (10)$$

Di mana:

(CO₂%)_t = *theoretical* CO₂

(CO₂%)_a = Aktual CO₂ yang terukur pada gas buang

$$(CO_2)_t = \frac{\text{Moles of C}}{\text{Moles of N}_2 + \text{Moles of C}}$$

$$\text{Moles of N}_2 = \frac{\text{Wt of N}_2 \text{ in theoretical air}}{\text{Mol. Wt of N}_2} + \frac{\text{Wt of N}_2 \text{ in fuel}}{\text{Mol. Wt of N}_2}$$

$$\text{Moles of C} = \frac{\text{Wt of C in fuel}}{\text{Mol. Wt of C}}$$

c. *Actual mass of air supplied/kg of fuel* (AAS)

$$\text{AAS} = (1 + \text{EA}/100) \times \text{theoretical air} \quad (11)$$

Perhitungan *losses* pada *solid fuel fired boiler* adalah sebagai berikut:

1. *Heat loss* karena gas buang kering (L1)

Formula untuk menghitung *losses* ini adalah sebagai berikut

$$L1 = \frac{m \times Cp \times (T_f - T_a)}{\text{GCV of Fuel}} \times 100 \quad (12)$$

Di mana:

m = massa *dry flue gas* (kg/kg of *fuel*) = produk pembakaran dari bahan bakar: CO₂ + Nitrogen in *fuel* + Nitrogen in the actual mass of air supplied + O₂ in *flue gas*.

(a) Massa CO₂ yang terbentuk di *flue gas*

CO₂ berasal dari atom C yang terdapat pada bahan bakar

Sehingga dapat dihitung

$$(\text{MrCO}_2/\text{ArC}) \times (\text{persen atom C}/100) \quad (13)$$

- (b) Massa N₂ yang terkandung di bahan bakar
Diperoleh dari analisa karbon yaitu (%N₂/100) di batubara
- (c) Massa N₂ yang terdapat pada udara pembakaran: diperoleh dari kadar N₂ di atmosfer
(77%) = (77/100)
- (d) Massa O₂ yang tersisa di *flue gas*:
Dihitung dari selisih *excess air* dengan udara teoritis yang dikali persen O₂ di *atmosphere*
(23%) = (EA – TA) × (23/100)

Maka total *actual mass dry flue gas* (m) = a + b + c + d

C_p = *Specific heat of flue gas* (kCal/kg°C)

T_f = *Flue gas temperature* (°C)

T_a = *Ambient temperature* (°C)

GCV = Nilai kalori bahan bakar (kCal/kg)

2. **Heat loss karena penguapan air sebagai akibat adanya kandungan hidrogen (H₂) dalam bahan bakar (L2)**

Pembakaran H₂ dapat menyebabkan *losses* karena hasil produk pembakarannya adalah air. Air akan berubah menjadi uap dan membawa panas dalam bentuk panas latennya. Formula untuk menghitung *losses* ini adalah sebagai berikut:

$$L2 = \frac{9 \times H_2 \times \{584 + C_p(T_f - T_a)\}}{GCV \text{ of Fuel}} \times 100 \quad (14)$$

Di mana:

H₂ = *kg of hydrogen* pada bahan bakar (1 kg basis)

C_p = *Specific heat of superheated steam* (kCal/kg°C)

T_f = *Flue gas temperature* (°C)

T_a = *Ambient temperature* (°C)

GCV = Nilai kalori bahan bakar (kCal/kg)

584 = *Latent heat corresponding to partial pressure of water vapour*

3. **Heat loss penguapan kadar air (moisture) dalam bahan bakar (L3)**

Kadar air yang ada dalam bahan bakar akan mengambil panas untuk berubah menjadi uap panas. *Losses* ini diartikan sebagai kerugian panas laten untuk menguapkan kadar air. Formula untuk menghitung *losses* karena kandungan air dalam bahan bakar adalah sebagai berikut:

$$L3 = \frac{M \times \{584 + C_p(T_f - T_a)\}}{GCV \text{ of Fuel}} \times 100 \quad (15)$$

Di mana:

M = *kg moisture* pada bahan bakar (1 kg basis)

C_p = *Specific heat of superheated steam* (kCal/kg°C)

T_f = *Flue gas temperature* (°C)

T_a = *Ambient temperature* (°C)

GCV = Nilai kalori bahan bakar (kCal/kg)

584 = *Latent heat corresponding to partial pressure of water vapour*

4. **Heat loss karena adanya kadar air (moisture) dalam udara pembakaran (L4)**

Kerugian ini disebabkan adanya kandungan air di udara pembakaran. Kandungan air tersebut akan menguap dan terbuang bersama gas buang ke cerobong. Formula untuk menghitung *losses* karena kandungan air di udara adalah sebagai berikut:

$$L4 = \frac{AAS \times \text{humidity factor} \times C_p(T_f - T_a)}{GCV \text{ of Fuel}} \times 100 \quad (16)$$

Di mana:

AAS = *Actual mass of air supplied* (per kg of fuel)

C_p = *Specific heat of superheated steam* (kCal/kg°C)

T_f = *Flue gas temperature* (°C)

T_a = *Ambient temperature in* (°C)

GCV = Nilai kalori bahan bakar (kCal/kg)

Humidity factor = faktor kelembaban udara (*kg of water/kg of dry air*)

Dengan mengetahui kelembaban udara sekitar, *humidity factor* dapat ditentukan dengan *psychrometric chart*

5. *Heat loss* karena pembakaran tidak sempurna (L5)

Kerugian ini diakibatkan dari produk dari proses pembakaran tidak sempurna akan terbakar kembali ketika bercampur dengan oksigen. Produk pembakaran seperti CO, H₂ dan beberapa variasi hidrokarbon biasanya ditemukan pada gas buang. Namun hanya gas CO yang dapat diketahui dalam pengukuran di *boiler*. Formula untuk menghitung kerugian akibat pembakaran tidak sempurna adalah sebagai berikut:

$$L5 = \frac{\%CO \times C}{\%CO \times \%CO_2} \times \frac{5744}{GCV \text{ of Fuel}} \times 100 \quad (17)$$

Di mana:

CO = Kadar CO pada *flue gas* (%)

CO₂ = Kadar CO₂ pada *flue gas* (%)

C = *Carbon content* (kg / kg of fuel)

GCV = Nilai kalori bahan bakar (kCal/kg)

Jika CO diketahui dalam ppm pada hasil pengukuran *flue gas*:

$$CO_{\text{formation}}(M_{CO}) = CO(\text{in ppm}) \times 10^{-6} \times M_f \times 28 \quad (18)$$

M_f = Konsumsi bahan bakar dalam kg/hr

L5 = M_{CO} × 5744 (dimana 5744 adalah *heat loss partial combustion carbon*)

6. *Heat loss* karena radiasi dan konveksi (L6)

Kerugian ini disebabkan karena kehilangan panas radiasi dan konveksi dari permukaan casing *boiler* ke udara sekitar. Formula untuk menghitung kerugian ini adalah sebagai berikut:

$$L6 = 0.548 \times \left[\left(\frac{T_s}{55.55} \right)^4 - \left(\frac{T_a}{55.55} \right)^4 \right] + 1.975 \times (T_s - T_a)^{1.25} \times \sqrt{\frac{(196.85 V_m + 68.9)}{68.9}} \quad (19)$$

Di mana:

V_m = *Wind velocity* (m/s)

T_s = *Surface temperature* (K)

T_a = *Ambient temperature* (K)

7. **Heat loss karena adanya unburnt carbon pada fly ash (L7)**

Kerugian ini terjadi karena sebagian kecil *carbon* yang belum terbakar akan terbawa dan bercampur dengan *fly ash*, di mana seharusnya menjadi energi panas pembakaran. Formula untuk menghitung *losses unburnt carbon* pada *fly ash* adalah sebagai berikut:

$$L7 = \frac{\text{Total ash collected / kg of fuel burnt} \times \text{G. C. V of fly ash}}{\text{GCV of Fuel}} \times 100 \quad (20)$$

8. **Heat loss karena adanya unburnt carbon pada bottom ash (L8)**

Kerugian ini disebabkan karena terdapat *carbon* yang belum terbakar bercampur dengan *bottom ash*, dimana seharusnya menjadi energi panas pembakaran. Formula untuk menghitung *losses unburnt carbon* pada *bottom ash* adalah sebagai berikut:

$$L8 = \frac{\text{Total ash collected / kg of fuel burnt} \times \text{G. C. V of bottom ash}}{\text{GCV of Fuel}} \times 100 \quad (21)$$

2.3. **Pembakaran Batubara**

Pembakaran merupakan suatu proses reaksi kimia antara bahan bakar dan oksigen yang disertai dengan pelepasan energi dalam bentuk panas. Pada reaksi pembakaran lengkap, suatu senyawa bereaksi dengan zat pengoksidasi sehingga menghasilkan senyawa-senyawa baru yang merupakan hasil ikatan antara unsur-unsur dalam bahan bakar dengan oksigen. Untuk mencapai kondisi pembakaran yang sempurna, terdapat tiga faktor utama yang perlu diperhatikan, yang dikenal sebagai konsep 3T, yaitu *time*, *temperature*, dan *turbulence* (Douglas Smoot 1984).

- *Time* (waktu) merupakan durasi yang dibutuhkan agar reaksi pembakaran dapat berlangsung secara menyeluruh sehingga seluruh bahan bakar dapat terbakar. Waktu yang diperlukan untuk mencapai pembakaran sempurna tidak bersifat sederhana karena melibatkan beberapa tahapan reaksi kimia. Selain itu, waktu pembakaran juga dipengaruhi oleh dimensi ruang bakar serta desain boiler yang digunakan.
- *Temperature* (temperatur) berkaitan dengan ketersediaan panas yang cukup untuk memicu reaksi pembakaran serta menjaga kestabilan nyala api. Temperatur yang memadai diperlukan agar reaksi pembakaran dapat berlangsung secara kontinu dan optimal di dalam ruang bakar.
- *Turbulence* (turbulensi) atau tingkat pencampuran antara bahan bakar dan udara pembakaran berperan penting dalam menyempurnakan proses pembakaran. Pencampuran

yang baik akan meningkatkan kontak antara partikel bahan bakar dan oksigen, sehingga reaksi pembakaran dapat berlangsung lebih efektif.

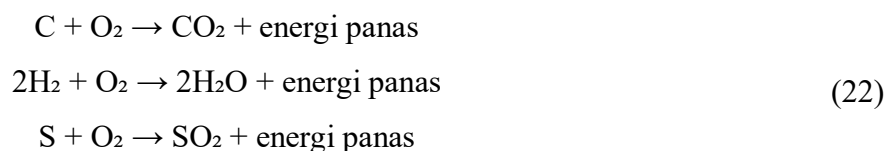
Dalam proses pembakaran, terjadi reaksi oksidasi yang cepat terhadap unsur-unsur yang mudah terbakar dalam bahan bakar, yang menghasilkan energi panas sebagai produk reaksi. Tiga unsur kimia utama yang berperan dalam proses pembakaran sebagian besar bahan bakar adalah karbon, hidrogen, dan belerang. Unsur belerang umumnya memberikan kontribusi energi yang relatif kecil, namun dapat menjadi sumber utama permasalahan lingkungan dan korosi akibat produk pembakarannya.

Pembakaran lengkap (*complete combustion*) terjadi apabila seluruh karbon dalam bahan bakar terbakar menjadi karbon dioksida (CO₂), seluruh hidrogen terbakar menjadi air (H₂O), seluruh belerang terbakar menjadi sulfur dioksida (SO₂), serta seluruh unsur mudah terbakar lainnya teroksidasi secara sempurna. Apabila kondisi ini tidak terpenuhi, maka pembakaran yang terjadi disebut sebagai pembakaran tidak lengkap (*incomplete combustion*).

Bahan bakar merupakan zat yang mudah terbakar dan umumnya berupa senyawa hidrokarbon yang mengandung unsur hidrogen, karbon, dan unsur kimia lainnya. Bahan bakar hidrokarbon dapat berbentuk cair, gas, maupun padatan. Batubara sebagai bahan bakar padat mengandung berbagai unsur kimia, antara lain karbon (C), hidrogen (H), oksigen (O₂), nitrogen (N₂), sulfur (S), serta unsur-unsur lainnya. Unsur-unsur tersebut saling berikatan secara kimia membentuk senyawa kompleks, di mana energi tersimpan di dalam ikatan kimia tersebut. Energi ini akan dilepaskan ke lingkungan ketika ikatan kimia terputus selama proses pembakaran. Secara umum, reaksi pembakaran batubara dapat dinyatakan sebagai berikut:



Energi panas utama yang dihasilkan berasal dari pembakaran unsur karbon. Pada kondisi pembakaran tidak sempurna, pembakaran karbon dapat menghasilkan karbon monoksida (CO). Selain itu, unsur hidrogen dan sulfur yang terkandung di dalam batubara juga turut menyumbang energi panas, meskipun dalam jumlah yang relatif lebih kecil. Secara sederhana, reaksi pembakaran unsur-unsur utama dalam batubara dapat dituliskan sebagai berikut:



Berdasarkan persamaan reaksi kimia tersebut dan data dari tabel periodik unsur, kebutuhan oksigen untuk masing-masing reaksi pembakaran dapat dihitung secara teoritis. Setiap 12 kg karbon memerlukan 32 kg oksigen untuk membentuk 44 kg karbon dioksida, sehingga setiap 1 kg karbon memerlukan sekitar 2,667 kg oksigen untuk terbakar sempurna. Selanjutnya, setiap 4 kg hidrogen memerlukan 32 kg oksigen untuk membentuk 36 kg air, sehingga setiap 1 kg hidrogen memerlukan 8 kg oksigen. Untuk unsur sulfur, setiap 32 kg sulfur memerlukan 32 kg oksigen untuk membentuk 64 kg sulfur dioksida, sehingga setiap 1 kg sulfur memerlukan 1 kg oksigen.

Dalam proses pembakaran di boiler, batubara bercampur dengan udara pembakaran yang mengandung oksigen di dalam furnace untuk menghasilkan energi panas yang digunakan dalam pemanasan pipa-pipa boiler. Secara ideal, bahan bakar dan oksigen akan terbakar dalam perbandingan stoikiometris. Namun, dalam kondisi operasi nyata, pembakaran sempurna secara teoritis sulit dicapai. Oleh karena itu, diperlukan udara berlebih (*excess air*) dalam jumlah tertentu untuk memastikan seluruh bahan bakar dapat terbakar secara optimal.

Pembakaran batubara berlangsung di dalam ruang bakar boiler pada temperatur yang sangat tinggi. Untuk meningkatkan kualitas pembakaran, batubara terlebih dahulu dihaluskan menggunakan peralatan *coal pulverizer* sehingga ukuran partikel menjadi lebih kecil dan luas permukaan reaksi meningkat. Selain itu, pasokan oksigen yang memadai harus disediakan melalui sistem udara pembakaran, serta diperlukan sistem penyalan awal dengan desain khusus untuk menjamin kestabilan nyala api. Proses pembakaran unsur-unsur dalam batubara akan menghasilkan berbagai emisi, antara lain oksida belerang, oksida nitrogen, karbon monoksida (CO), dan karbondioksida (CO₂).

2.4. Pembakaran Batubara dengan Amonia

Pembakaran batubara dengan penambahan amonia (*co-firing*) merupakan proses yang kompleks karena melibatkan interaksi antara dua jenis bahan bakar dengan karakteristik fisik dan kimia yang berbeda. Batubara sebagai bahan bakar padat memiliki mekanisme pembakaran berbasis devolatilisasi dan pembakaran karbon padat (*char combustion*), sedangkan amonia sebagai bahan bakar gas memiliki reaktivitas pembakaran yang relatif rendah dan mengandung nitrogen dalam jumlah tinggi. Interaksi antara kedua bahan bakar tersebut akan mempengaruhi stabilitas pembakaran, distribusi temperatur, serta pembentukan dan reduksi emisi nitrogen oksida (NO_x).

Beberapa faktor utama yang mempengaruhi reaksi pembakaran pada sistem *co-firing* batubara–amonia antara lain rasio udara pembakaran (*excess air*), metode dan lokasi injeksi amonia, serta rasio *co-firing* antara amonia dan batubara.

a. Rasio Udara Pembakaran (*Excess Air*)

Rasio udara pembakaran merupakan salah satu parameter operasi yang paling berpengaruh dalam proses pembakaran *co-firing*. Pada kondisi oksidasi tinggi, yaitu saat *excess air* berlebih, pembentukan NO_x cenderung meningkat akibat tersedianya oksigen dalam jumlah besar yang memfasilitasi oksidasi nitrogen baik yang berasal dari bahan bakar maupun dari udara pembakaran. Sebaliknya, pada kondisi reduksi atau *fuel-rich*, keberadaan senyawa pereduksi seperti NH_3 , CO , dan H_2 dapat mendorong reaksi reduksi NO menjadi nitrogen (N_2), sehingga berpotensi menurunkan emisi NO_x .

Oleh karena itu, pengaturan *excess air* menjadi aspek penting dalam penerapan *co-firing* amonia. Rasio udara yang terlalu tinggi dapat meningkatkan pembentukan NO_x dan menurunkan efisiensi termal akibat peningkatan kehilangan panas gas buang, sedangkan rasio udara yang terlalu rendah berisiko menyebabkan pembakaran tidak sempurna dan meningkatkan emisi CO serta *unburned fuel*.

b. Lokasi dan Metode Injeksi Amonia (NH_3)

Lokasi dan metode injeksi amonia ke dalam boiler sangat menentukan jalur reaksi kimia yang terjadi selama pembakaran. Amonia dapat diinjeksikan bersama udara primer atau udara sekunder, dan masing-masing metode memberikan pengaruh yang berbeda terhadap distribusi temperatur dan konsentrasi oksigen di dalam furnace.

Injeksi NH_3 bersama udara primer cenderung meningkatkan peluang amonia untuk berpartisipasi langsung dalam zona pembakaran utama, sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya pembakaran amonia secara langsung. Namun, pada kondisi ini juga terdapat risiko peningkatan pembentukan NO_x akibat oksidasi nitrogen dalam NH_3 pada temperatur tinggi. Sebaliknya, injeksi NH_3 pada zona pembakaran sekunder atau pasca-pembakaran dapat memanfaatkan peran NH_3 sebagai agen pereduksi, yang mampu mengurangi NO yang telah terbentuk menjadi N_2 , mirip dengan mekanisme *Selective Non-Catalytic Reduction* (SNCR).

c. Rasio Co-Firing NH₃–Batubara

Rasio *co-firing* antara amonia dan batubara menentukan jumlah nitrogen tambahan yang masuk ke dalam sistem pembakaran. Peningkatan rasio amonia akan meningkatkan konsentrasi molekul nitrogen, yang dapat mengubah jalur reaksi kimia di dalam boiler. Pada rasio amonia yang rendah, pengaruh NH₃ terhadap pembentukan NO_x dan stabilitas pembakaran relatif terbatas. Namun, pada rasio amonia yang lebih tinggi, potensi pembentukan NO_x akibat oksidasi nitrogen dalam NH₃ juga meningkat apabila tidak diimbangi dengan pengaturan udara dan distribusi temperatur yang tepat.

Selain itu, rasio *co-firing* juga mempengaruhi temperatur nyala (*flame temperature*). Amonia memiliki nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan batubara dan menghasilkan kandungan uap air yang lebih tinggi pada produk pembakaran, sehingga dapat menurunkan temperatur pembakaran. Penurunan temperatur ini dapat berdampak pada efisiensi pembakaran dan karakteristik pembentukan NO_x.

d. Interaksi Amonia dengan Produk Volatil Batubara

Produk volatil hasil devolatilisasi batubara, seperti karbon monoksida (CO) dan hidrogen (H₂), dapat berinteraksi dengan amonia selama proses pembakaran. Keberadaan senyawa volatil tersebut dapat meningkatkan reaktivitas pembakaran amonia dan mempercepat laju reaksi pembakaran secara keseluruhan. Selain itu, amonia juga dapat bertindak sebagai pengoksidasi lemah yang bereaksi dengan karbon padat (*char*), sebagaimana ditunjukkan oleh reaksi berikut:



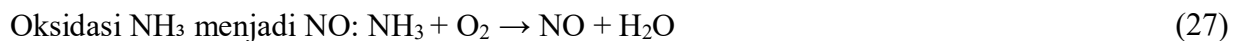
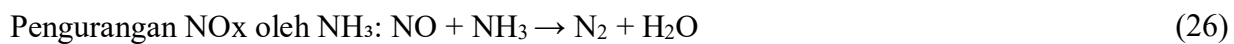
Reaksi ini menunjukkan bahwa amonia dapat berkontribusi terhadap konsumsi karbon padat, yang berpotensi mempengaruhi tingkat *unburned carbon* pada abu terbang (*fly ash*).

e. Peran Amonia dalam Pembentukan dan Reduksi NO_x

Amonia yang tidak terbakar sepenuhnya pada zona pembakaran awal dapat berperan sebagai agen pereduksi pada zona pasca-pembakaran. Dalam kondisi ini, NH₃ dapat bereaksi dengan nitrogen monoksida (NO) untuk membentuk nitrogen (N₂) dan uap air (H₂O), sebagaimana ditunjukkan oleh reaksi berikut:



Secara umum, mekanisme pembentukan dan reduksi NO_x pada pembakaran *co-firing* batubara–amonia dapat dijelaskan melalui beberapa jalur reaksi utama. Nitrogen yang terkandung dalam batubara (*fuel nitrogen*) dapat terdekomposisi menjadi senyawa antara seperti HCN dan NH₃, yang selanjutnya teroksidasi membentuk NO. Di sisi lain, NH₃ yang ditambahkan melalui *co-firing* dapat berperan sebagai pereduksi NO, sehingga membentuk keseimbangan antara pembentukan dan pengurangan NO_x di dalam boiler. Reaksi-reaksi utama tersebut dapat dituliskan sebagai berikut:



Berdasarkan mekanisme tersebut, dapat disimpulkan bahwa pembakaran batubara dengan amonia tidak hanya berpengaruh terhadap efisiensi pembakaran, tetapi juga secara signifikan mempengaruhi karakteristik pembentukan dan reduksi NO_x. Oleh karena itu, penerapan *co-firing* amonia memerlukan pengaturan yang cermat terhadap rasio bahan bakar, distribusi udara pembakaran, serta strategi injeksi amonia agar diperoleh kinerja pembakaran yang optimal dengan emisi yang terkendali.

2.5. Ringkasan Tinjauan Pustaka dan *Research Gap*

Berbagai penelitian telah dilakukan untuk mengkaji potensi dan karakteristik penerapan *co-firing* amonia dengan batubara pada boiler pembangkit listrik. Secara umum, hasil-hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa amonia dapat digunakan sebagai bahan *co-firing* pada boiler batubara dengan penyesuaian tertentu pada sistem pembakaran dan pengendalian emisi. Beberapa studi melaporkan bahwa penerapan *co-firing* amonia mampu menurunkan emisi karbon dioksida (CO₂) secara signifikan tanpa menyebabkan penurunan efisiensi boiler yang drastis, meskipun peningkatan emisi nitrogen oksida (NO_x) masih menjadi tantangan utama yang perlu dikendalikan.

Penelitian yang dilakukan oleh Li et al. (2023) menunjukkan bahwa penambahan amonia dapat mempercepat konsumsi batubara serta mendorong pembakaran yang lebih sempurna melalui interaksi antara amonia terurai dengan partikel batubara. Studi tersebut juga melaporkan penurunan signifikan emisi CO dan NO_x dibandingkan pembakaran batubara dengan campuran

CH₄-udara, meskipun penelitian ini masih dilakukan pada skala dan konfigurasi pembakaran yang terbatas. Hal ini membuka peluang untuk pengembangan penelitian pada skala pembangkit yang lebih besar.

Studi eksperimental oleh Zhang et al. (2024b) pada boiler industri berkapasitas 40 MW menunjukkan bahwa stabilitas pembakaran tetap terjaga hingga rasio co-firing amonia mencapai 25%. Pada rasio tersebut, kandungan *unburned carbon* pada *fly ash* mengalami penurunan yang signifikan. Namun, peningkatan emisi NO_x seiring dengan bertambahnya rasio amonia juga dilaporkan, sehingga diperlukan pengaturan *secondary air* melalui sistem *Secondary Over Fire Air* (SOFA) serta pengendalian *excess air* pada kisaran tertentu. Penelitian ini masih terbatas pada boiler industri skala menengah dan belum merepresentasikan karakteristik boiler PLTU berkapasitas besar.

Penelitian simulasi yang dilakukan oleh Adi Saputra et al. (2024) pada boiler *pulverized coal* bertipe tangential firing berkapasitas 200 MW memberikan gambaran yang lebih mendekati kondisi PLTU skala besar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penambahan amonia pada rasio 5–15% menyebabkan penurunan temperatur *furnace* akibat meningkatnya kandungan uap air, yang berpotensi meningkatkan kehilangan panas dan menurunkan efisiensi pembakaran. Di sisi lain, penurunan emisi CO₂ yang signifikan juga dilaporkan, dengan potensi pengendalian NO_x melalui pengaturan SOFA. Namun demikian, penelitian ini masih bersifat simulasi dan memerlukan validasi lebih lanjut melalui pengujian pada kondisi operasi nyata.

Berdasarkan tinjauan pustaka tersebut, dapat disimpulkan bahwa sebagian besar penelitian mengenai co-firing amonia masih terbatas pada skala laboratorium, boiler industri berkapasitas kecil hingga menengah, atau simulasi numerik. Kajian yang secara spesifik mengevaluasi dampak co-firing amonia terhadap efisiensi pembakaran dan NPHR pada PLTU batubara skala besar dengan boiler subcritical dan sistem pembakaran tangential masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk mengisi celah tersebut dengan menganalisis pengaruh co-firing amonia pada PLTU batubara berkapasitas besar terhadap performa boiler dan NPHR secara komprehensif.

2.6. Keuntungan dan Kerugian Co-Firing Amonia dengan Batubara

Penerapan co-firing amonia dengan batubara pada PLTU menawarkan sejumlah keuntungan sekaligus tantangan yang perlu dipertimbangkan secara teknis dan operasional.

2.6.1. Keuntungan *Co-Firing Amonia*

Salah satu keuntungan utama co-firing amonia adalah potensi pengurangan emisi CO₂. Amonia tidak mengandung unsur karbon, sehingga pembakarannya tidak menghasilkan CO₂, berbeda dengan batubara yang merupakan sumber utama emisi karbon pada sektor pembangkitan listrik. Dengan menggantikan sebagian batubara menggunakan amonia, emisi karbon total pembangkit dapat ditekan secara bertahap.

Selain itu, pada boiler tipe *pulverized coal*, amonia dapat terbakar secara relatif efisien apabila kondisi pembakaran diatur dengan tepat. Pemanfaatan amonia sebagai bahan co-firing juga memungkinkan penggunaan infrastruktur pembangkit yang sudah ada, sehingga tidak memerlukan investasi besar dalam pembangunan fasilitas baru. Dari sisi sistem energi, amonia juga berpotensi berperan sebagai media penyimpanan energi hidrogen yang lebih aman dan mudah ditangani dibandingkan hidrogen murni.

2.6.2. Kerugian dan Tantangan *Ammonia Co-Firing*

Di sisi lain, penerapan co-firing amonia memiliki beberapa tantangan utama. Salah satunya adalah potensi peningkatan emisi NO_x akibat kandungan nitrogen yang tinggi pada amonia, terutama pada kondisi pembakaran bersuhu tinggi. Oleh karena itu, penerapan co-firing amonia memerlukan strategi pengendalian emisi yang efektif, seperti pengaturan distribusi udara pembakaran dan pemanfaatan sistem SOFA.

Tantangan lainnya adalah stabilitas pembakaran. Amonia memiliki nilai kalor yang lebih rendah dibandingkan batubara, sehingga rasio co-firing harus diatur secara hati-hati agar tidak menurunkan temperatur pembakaran dan efisiensi boiler. Selain itu, dari sisi ekonomi, biaya produksi, penyimpanan, dan penanganan amonia saat ini masih relatif tinggi, yang dapat menjadi kendala dalam implementasi skala besar.