2. STUDI PUSTAKA

2.1. Amonia

Amonia (NH_3) adalah senyawa kimia yang terdiri dari satu atom nitrogen (N) dan tiga atom hidrogen (H). Amonia memiliki karakteristik berupa gas yang tidak berwarna dan memiliki bau yang sangat menyengat. Amonia adalah senyawa yang bebas karbon dan tidak memiliki efek langsung terhadap gas rumah kaca (GRK). Senyawa ini dapat diproduksi dari berbagai jenis bahan bakar fosil (seperti batu bara, gas alam, minyak bumi, nafta, dll.), limbah panas, atau listrik (misalnya, nuklir) dengan menggunakan air, biomassa, atau limbah organik (limbah kota) dan udara sebagai bahan baku utama. Selain itu, amonia juga dapat disintesis melalui proses yang sepenuhnya bebas karbon menggunakan sumber daya energi terbarukan (misalnya, tenaga surya, angin, hidro, panas bumi, dan laut). Proses ini memungkinkan produksi amonia yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. (Chai et al., 2021)

Penggunaan awal amonia cair sebagai bahan bakar terjadi di Belgia pada tahun 1943. Emeric Kroch mengembangkan motor hybrid amonia/gas batu bara untuk menjaga transportasi umum tetap beroperasi karena adanya krisis bahan bakar diesel selama Perang Dunia II. Pada 1960-an, pesawat roket X-15 yang ditenagai oleh amonia memecahkan rekor kecepatan dan ketinggian. Pada musim panas 2007, terdapat kendaraan yang ditenagai oleh campuran amonia dan bensin berhasil melakukan perjalanan Detroit ke San Francisco. Amonia tersedia dalam jumlah besar dan banyak digunakan dan disimpan di seluruh negara industri. Sebagai bahan bakar, NH_3 terbukti efisien dalam berbagai jenis mesin, termasuk mesin motor bakar, turbin pembakaran, dan *fuel cell*. (NH3 Fuel Association, 2019)

Tabel 2.1 menunjukkan properti amonia dibandingkan hidrogen dan bensin. Dibandingkan dengan bahan bakar bebas karbon lainnya seperti hidrogen (H2), amonia memiliki beberapa keunggulan yang menjadikannya pilihan menarik sebagai sumber energi alternatif. Amonia memiliki densitas energi volumetrik yang lebih tinggi, yaitu 11333 MJ/m^3, dibandingkan dengan hidrogen yang hanya 8539 MJ/m^3. Hal ini berarti bahwa untuk volume yang sama, amonia dapat menyimpan lebih banyak energi daripada hidrogen, menjadikannya lebih efisien dalam hal penyimpanan dan transportasi energi. Selain itu, biaya amonia cenderung lebih rendah dibandingkan dengan hidrogen karena kebutuhan penyimpanan amonia yang lebih mudah dan murah. Amonia dapat disimpan pada temperatur -33°C pada kondisi tekanan atmosfer atau pada suhu sekitar 25°C dengan tekanan 10.3 bar (Rivarolo et al., 2019), sedangkan

hidrogen memerlukan kondisi penyimpanan yang jauh lebih ekstrem, yakni pada suhu -253°C pada tekanan atmosfer, yang tentunya memerlukan infrastruktur dan teknologi penyimpanan yang lebih mahal. Selain itu, infrastruktur produksi, penyimpanan, dan transportasi amonia telah lama ada dan mapan. Amonia telah digunakan secara luas dalam industri, terutama sebagai bahan baku untuk produksi pupuk, sehingga banyak fasilitas dan teknologi yang sudah tersedia dapat dimanfaatkan dengan investasi minimal (Chai et al., 2021). Dari segi keamanan, amonia juga memiliki beberapa keunggulan dibandingkan bahan bakar lainnya. Amonia lebih ringan dari udara, sehingga jika terjadi kebocoran, amonia akan menghilang dengan cepat ke atmosfer. Bau menyengat amonia berfungsi sebagai indikator alami kebocoran, karena manusia dapat mendeteksi keberadaan amonia pada konsentrasi yang sangat rendah, sehingga kebocoran dapat segera diketahui dan diatasi (Chai et al., 2021).

Namun, amonia masih memiliki beberapa kekurangan. Tabel 2.1 menunjukkan bahwa nilai kalor rendah (*lower heating value*) amonia lebih rendah dibandingkan dengan hidrogen, yaitu 18,8 MJ/kg untuk amonia dan 120,1 MJ/kg untuk hidrogen (Erdemir & Dincer, 2021). Nilai kalor yang lebih rendah ini berarti amonia menghasilkan lebih sedikit energi per satuan massa dibandingkan hidrogen, sehingga dibutuhkan volume yang lebih besar untuk menghasilkan jumlah energi yang sama. Selain itu, pembakaran amonia memproduksi emisi nitrogen oksida (NO_x) yang bersifat beracun dan berbahaya bagi kesehatan manusia serta lingkungan. Emisi NOx dapat menyebabkan masalah pernapasan, penyakit kardiovaskular, dan berkontribusi pada pembentukan ozon troposfer, yang berdampak negatif pada kualitas udara dan kesehatan ekosistem (United States Environmental Protection Agency, n.d.). Kekurangan tersebut mendorong peneliti untuk meningkatkan performa pembakaran amonia dan mengurangi emisi NO_x yang dihasilkan.

Tabel 2.1.

Properti Bahan Bakar Amonia, Hidrogen, dan Bensin

Properties	*Ammonia*	*Liquid Hydrogen*	*Gasoline*
Formula [-]	NH_3	H_2	C_8H_{18}
Lower heating value (LHV) [MJ/kg]	18.8	120.1	44.5
Flame speed [m/s]	0.15	3.51	0.58
Auto Ignition temperature [°C]	651	571	300
Minimum ignition energy [MJ]	8	N/A	0.14
Energy density [MJ/m^3]	11333	8539	31074
Storage temperature [°C]	25	-253	25
Storage pressure [kPa]	1030	102	101.3

Sumber: Erdemir, D., & Dincer, I. (2021). A perspective on the use of ammonia as a clean fuel: Challenges and solutions. *International Journal of Energy Research*, *45*(4). https://doi.org/10.1002/er.6232

2.2. Oksigen

Oksigen (O2) merupakan oksidator yang paling umum dan efektif digunakan dalam proses pembakaran karena reaktivitas dan kelimpahannya yang tinggi. Oksigen adalah molekul diatomik yang mudah bereaksi dengan bahan yang mudah terbakar, melepaskan energi dalam bentuk panas dan cahaya. Proses oksidasi adalah reaksi kimia di mana oksigen berperan sebagai penerima elektron. Ketika bahan bakar bereaksi dengan oksigen, ikatan kimia dalam molekul bahan bakar dipecah, dan energi kimia yang tersimpan di dalamnya dilepaskan sebagai panas dan cahaya.

Oksigen sangat penting untuk proses pembakaran pada mesin pembakaran internal. Di dalam mesin, oksigen bereaksi dengan bahan bakar (seperti bensin atau diesel) untuk menghasilkan energi yang menggerakkan mesin. Pembakaran yang efisien memastikan bahwa

bahan bakar terbakar secara lengkap, memaksimalkan energi yang dihasilkan dan meminimalkan emisi polutan. Pembakaran dengan oksidator yang kaya oksigen dapat meningkatkan kecepatan dan stabilitas pembakaran amonia (Shrestha et al., 2021; Wang et al., 2020).

2.3. Argon

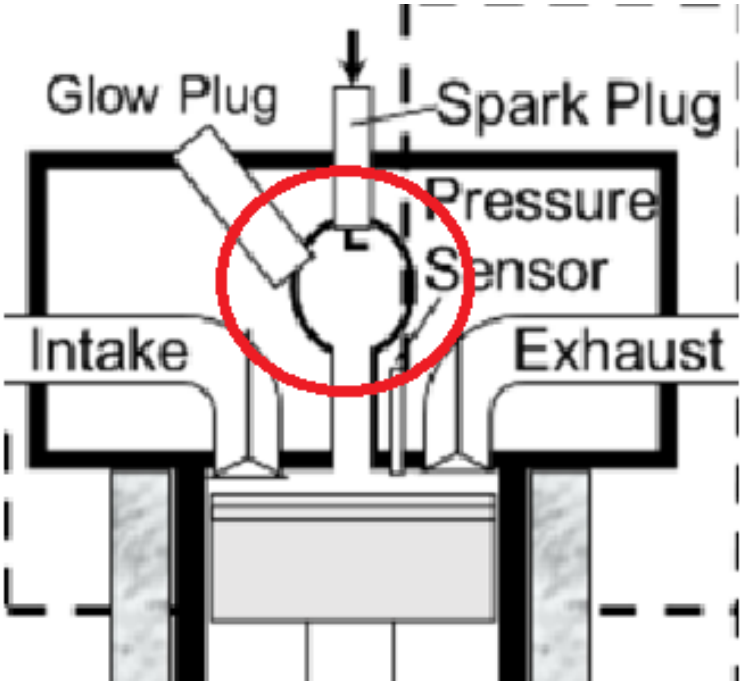
Argon adalah gas mulia *inert* yang dapat digunakan secara luas sebagai gas pembilas dalam berbagai aplikasi ilmiah dan industri karena sifat *inert* kimianya dan tidak reaktif terhadap zat lain. Sifat *inert*-nya memastikan bahwa gas ini tidak ikut serta dalam reaksi kimia, sehingga menjadikannya pilihan yang tepat untuk membersihkan sistem dari kontaminan dan gas sisa yang tidak diinginkan. Misalnya, dalam penelitian pembakaran, argon digunakan untuk membersihkan ruang pembakaran dari gas atau partikulat sisa yang berpotensi memengaruhi hasil eksperimen berikutnya (Guo et al., 2023).

2.4. *Sub-chamber*

Sub-chamber adalah ruang bakar tambahan yang terhubung dengan ruang pembakaran utama melalui lubang atau *nozzle*. *Sub-chamber* bekerja dengan cara mengisolasi sebagian kecil campuran bahan bakar dan udara yang kemudian dinyalakan terlebih dahulu. Pembakaran awal ini menghasilkan gelombang tekanan dan panas yang merambat melalui lubang atau *nozzle* ke ruang bakar utama. Proses ini menyebabkan campuran bahan bakar yang belum terbakar di ruang utama menjadi terbakar di banyak titik secara bersamaan yang disebut *multi-ignition combustion* atau *self-ignition*. Keuntungan dari metode *multi-ignition* atau *self-ignition* ini adalah peningkatan efisiensi pembakaran dan pengurangan waktu yang dibutuhkan untuk proses pembakaran secara keseluruhan. Dengan adanya banyak titik penyalaan, pembakaran terjadi lebih merata dan cepat, sehingga mengurangi variasi pembakaran dan meningkatkan stabilitas mesin, terutama pada mesin dengan rasio kompresi tinggi. Penelitian yang dilakukan oleh (Guo et al., 2022) menggunakan mesin pembakaran dengan rasio kompresi tinggi menunjukkan bahwa penggunaan *sub-chamber* dapat mempercepat periode pembakaran mesin menggunakan bahan bakar amonia.

nozzle dalam *sub-chamber* memiliki pengaruh signifikan terhadap turbulensi di ruang pembakaran. *Nozzle* dirancang untuk mengarahkan aliran panas dan gas dengan cara yang memaksimalkan turbulensi di dalam *main-chamber*. Turbulensi ini sangat penting karena membantu mencampur bahan bakar dan udara secara lebih efektif, menghasilkan pembakaran yang lebih lengkap dan efisien. Fungsi *nozzle* dalam mengontrol aliran dan meningkatkan

turbulensi berkontribusi pada distribusi panas yang lebih merata dan pembakaran yang lebih stabil, yang pada akhirnya meningkatkan efisiensi mesin dan mengurangi emisi.



Gambar 2.1. *Sub-chamber*

Sumber: Guo, B., Ichiyanagi, M., Kajiki, K., Aratake, N., Zheng, Q., Kodaka, M., & Suzuki, T. (2022). Combustion Analysis of Ammonia Fueled High Compression Ratio SI Engine with Glow Plug and *Sub-chamber*. *International Journal of Automotive Engineering*, *13*(1). https://doi.org/10.20485/JSAEIJAE.13.1_1

2.5. Rasio Ekuivalen

Rasio ekuivalen/*equivalence ratio* adalah parameter yang digunakan dalam teknik pembakaran untuk menggambarkan perbandingan antara rasio campuran bahan bakar-udara aktual dengan rasio campuran stoikiometri bahan bakar-udara yang diperlukan untuk mencapai pembakaran sempurna. Rasio ekuivalen dapat dihitung dengan membagi rasio bahan bakar-udara aktual dan rasio bahan bakar-udara stoikiometri yang dapat terlihat pada rumus 2.1. (Speight, 2019)

$$\Phi = \frac{fuel-to-oxidizer\ ratio}{(fuel-to-oxidizer\ ratio)_{st}} \tag{2.1}$$

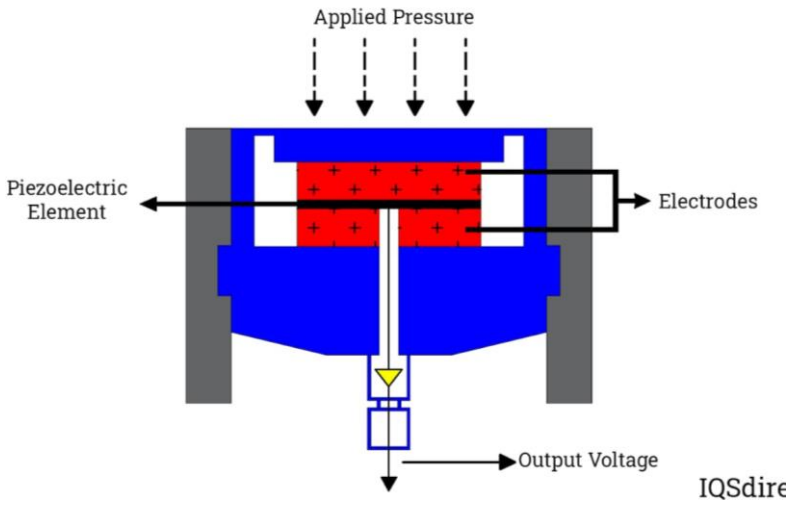
Rasio stoikiometri adalah rasio bahan bakar terhadap oksidator (biasanya udara) yang ideal atau benar secara kimia yang akan menghasilkan pembakaran sempurna tanpa komponen berlebih atau kekurangan. Hasil rasio ekuivalen yang lebih dari 1 menunjukkan bahwa kondisi

campuran bahan bakar tergolong *rich* atau udara lebih banyak daripada bahan bakar sedangkan hasil rasio ekuivalen kurang dari 1 menunjukkan bahwa kondisi campuran bahan bakar tergolong *lean* atau udara lebih sedikit daripada bahan bakar (Nevrlý et al., 2022).

2.6. Alat Pengukuran & Pengambilan Data

2.6.1. Sensor Tekanan Piezoelektrik

Sensor tekanan piezoelektrik adalah jenis sensor tekanan yang mengubah perubahan tekanan menjadi muatan listrik dengan memanfaatkan efek piezoelektrik untuk mengukur perubahan tekanan. Efek piezoelektrik adalah kemampuan bahan tertentu untuk menghasilkan muatan listrik sebagai respons terhadap tekanan mekanis yang diterapkan (Avnet Abacus, 2023). Sensor tekanan piezoelektrik terdiri dari bahan piezoelektrik, biasanya berupa kristal atau keramik, yang diapit di antara dua elektroda. Gambar 2.2 merupakan diagram dari sensor piezoelektrik. Cara kerja sensor adalah ketika tekanan diterapkan pada sensor, bahan piezoelektrik berubah bentuk, menyebabkan perbedaan tegangan pada elektroda. Tegangan ini kemudian dapat diukur dan dikorelasikan dengan tekanan yang diberikan menggunakan *charge amplifier* yang ditunjukan pada gambar 2.3. *Charge amplifier* adalah perangkat elektronik yang digunakan untuk mengubah muatan listrik yang dihasilkan oleh sensor menjadi tegangan yang lebih besar dan stabil. *Charge amplifier* memperkuat sinyal listrik tanpa mengubah karakteristik dasar sinyal tersebut, memungkinkan pengukuran yang lebih presisi dan akurat.



Gambar 2.2. Sensor Tekanan Piezoelektrik

Sumber: IQS Directory. (2023). *Thermocouples*. https://www.iqsdirectory.com/articles/thermocouple.html

Gambar 2.3. *Charge Amplifier*

2.6.2. Data Logger

Data logger adalah perangkat elektronik yang digunakan untuk merekam dan menyimpan data dari berbagai sensor atau instrumen pengukuran dalam jangka waktu tertentu yang ditunjukkan pada gambar 2.4. *Data logger* terdiri dari sebuah mikroprosesor, memori internal untuk penyimpanan data, dan terkoneksi dengan sensor untuk menerima data. Perangkat ini dapat berinteraksi dengan komputer dan menggunakan *software* untuk melihat dan menganalisis data yang dikumpulkan (Smith, 2020). Setiap data logger memiliki sejumlah saluran atau *channels* yang memungkinkan pengumpulan data dari berbagai sumber secara simultan. *Channel* adalah jalur input individu yang digunakan untuk menghubungkan sensor atau instrumen pengukuran ke *data logger*. Contoh input yang dapat dipasangkan dapat berupa:

- Sinyal Analog
- Sinyal Digital
- Sinyal Arus
- Sinyal Tegangan
- Sensor Termokopel

Gambar 2.4. *Data Logger*

Sumber: RIGOL. (n.d.). *M300 System Data Acquisition Mainframes*. https://www.rigolna.com/products/data-acquisition/m300-system/

2.6.3. *Pressure Gauge*

Pressure gauge merupakan alat yang digunakan untuk mengukur tekanan internal media dalam suatu sistem. Alat ini penting dalam berbagai aplikasi industri untuk memastikan bahwa tekanan fluida berada dalam rentang yang aman dan optimal untuk operasi yang efisien dan aman. Berdasarkan cara kerjanya, *pressure gauge* dibagi menjadi dua tipe yaitu mekanik (*bourdon* dan diafragma) dan digital. (Kolstad, 2018)

Pressure gauge mekanik beroperasi berdasarkan prinsip deformasi elemen elastis ketika terpapar tekanan. Pada tabung Bourdon, tabung yang berbentuk melengkung akan meluruskan atau membengkok seiring dengan perubahan tekanan internal. Gerakan ini kemudian ditransmisikan melalui serangkaian mekanisme penghubung yang memperbesar perubahan kecil tersebut dan meneruskannya ke jarum penunjuk pada dial gauge. Pada *pressure gauge* diafragma, diafragma elastis akan membengkok atau berdeformasi ketika tekanan diterapkan. Deformasi ini diteruskan melalui elemen penghubung yang kemudian menggerakkan jarum penunjuk pada dial gauge. Diafragma sering digunakan dalam aplikasi yang memerlukan pengukuran tekanan rendah atau dalam lingkungan yang mengandung fluida korosif atau kental. Selain itu, jenis ini juga dapat digunakan untuk mengukur tekanan diferensial jika dilengkapi dengan dua diafragma yang terhubung ke dua titik berbeda dalam sistem. *Pressure gauge* digital adalah alat yang menggunakan transduser tekanan untuk

mengubah tekanan menjadi sinyal listrik. Proses ini dimulai dengan sensor yang mendeteksi tekanan dan kemudian mengonversikannya menjadi sinyal listrik yang proporsional dengan tekanan yang terukur. Sinyal listrik ini kemudian diproses oleh rangkaian elektronik yang mengamplifikasi, mengubah, dan memformatnya untuk ditampilkan pada layar digital. (Fraden, 2016)

2.7. Ruang Bakar Volume Konstan/*Constant Volume Chamber*

Ruang bakar volume konstan adalah sebuah ruang atau wadah yang volumenya tetap konstan dalam kondisi tertentu. Dengan kata lain, volume ruangan tidak berubah secara signifikan selama proses atau operasi yang berlangsung di dalamnya. Gambar 2.5 menunjukkan skema ruang bakar volume konstan umum (PIELECHA et al., 2014) . Ruang jenis ini sering digunakan dalam berbagai aplikasi ilmiah dan teknik, khususnya dalam eksperimen atau proses yang mengutamakan menjaga volume tetap konstan. Ruang bakar volume konstan sering kali digunakan dalam studi tentang karakteristik pembakaran, efisiensi bahan bakar, dan emisi yang dihasilkan (Guo et al., 2021, 2023; Hashimoto et al., 2021). Dengan menjaga volume tetap konstan, peneliti dapat mengisolasi variabel lain dan mendapatkan data yang lebih akurat tentang perilaku bahan bakar di bawah kondisi tertentu. Hal ini sangat berguna untuk mengembangkan model pembakaran yang dapat diterapkan pada desain mesin dan sistem pembakaran lainnya. Komponen umum yang terdapat pada ruang bakar volum konstan untuk aplikasi pembakaran bahan bakar bisa terdiri atas:

1. *Chamber body*

   Chamber body merupakan struktur utama dalam sistem pembakaran yang berfungsi untuk menahan tekanan dan suhu tinggi selama proses pembakaran. Struktur ini harus dibuat dari material yang tahan terhadap kondisi ekstrem untuk memastikan integritas dan keamanan sistem. *Chamber body* juga dirancang untuk menahan ekspansi termal dan tekanan yang dihasilkan selama pembakaran, serta harus mampu menjaga bentuk dan kekuatannya selama siklus operasi yang berulang-ulang.

2. Sistem Akuisisi Data dan Sensor

   Sistem akuisisi data digunakan untuk mengumpulkan data yang dihasilkan selama proses pembakaran. Sistem ini biasanya terdiri atas *logger* dan sensor yang bekerja sama untuk merekam, memproses, dan menyimpan data. Sensor yang digunakan

biasanya berupa sensor tekanan dan suhu. Data yang dihasilkan oleh sensor ini sangat penting untuk menganalisis karakteristik pembakaran.

3. Elemen pemanas

   Digunakan untuk mengatur suhu awal di dalam ruang bakar Elemen pemanas ini biasanya berupa elemen listrik atau pembakar kecil yang ditempatkan di dalam atau sekitar *chamber body*. Pemanasan awal ini membantu dalam mengurangi waktu yang diperlukan untuk mencapai suhu kerja dan memastikan proses pembakaran dimulai dalam kondisi yang terkendali.

4. Katup masuk dan keluar

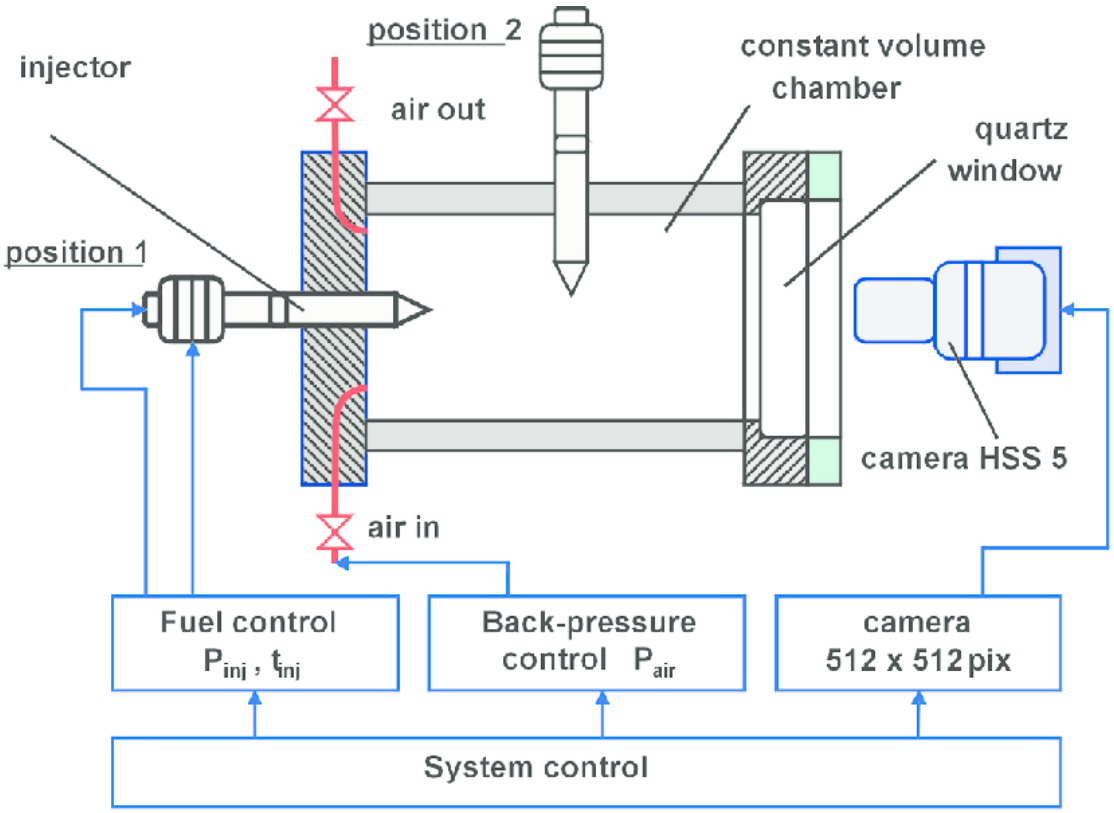
   Katup masuk dan keluar adalah komponen yang mengatur aliran bahan bakar dan udara ke dalam ruang bakar serta mengeluarkan produk pembakaran setelah proses selesai. Katup masuk mengontrol masuknya campuran bahan bakar dan udara ke dalam ruang bakar, sementara katup keluar mengatur keluarnya gas hasil pembakaran.

5. Sistem pemasukan bahan bakar

   Sistem pemasukan bahan bakar digunakan untuk menginjeksikan bahan bakar ke dalam ruang bakar. Sistem ini biasanya terdiri atas sebuah injektor dan tabung bahan bakar/udara.

6. Busi

   Busi adalah perangkat yang digunakan untuk menyalakan campuran bahan bakar dan udara di dalam ruang bakar. Busi menghasilkan percikan listrik yang memulai proses pembakaran.



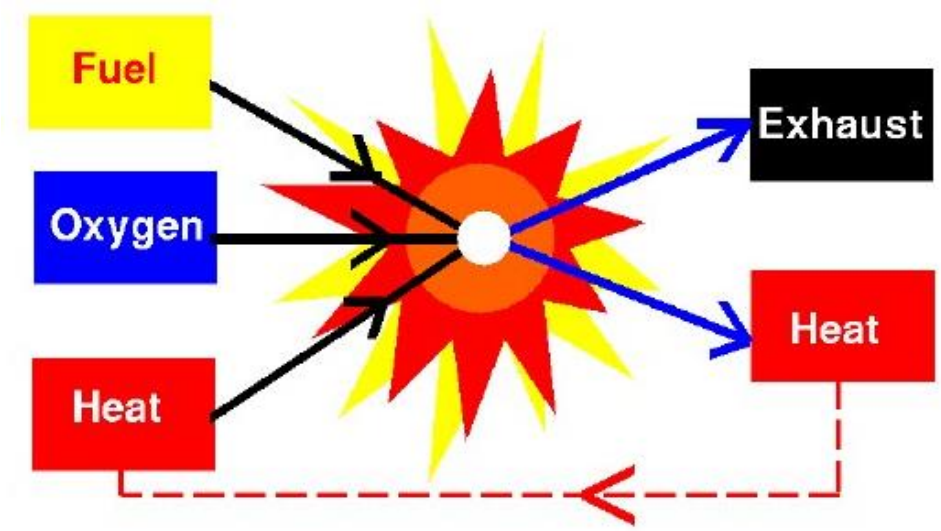
Gambar 2.5 Skema Komponen Ruang Bakar Volume Konstan

Sumber: PIELECHA, I., CZAJKA, J., BOROWSKI, P., & WISŁOCKI, K. (2014). Research-based assessment of the influence of hydrocarbon fuel atomization on the formation of self-ignition spots and the course of pre-flame processes. *Combustion Engines*, *157*(2). https://doi.org/10.19206/ce-116942

2.8. Proses Pembakaran/*Combustion*

Pembakaran adalah proses kimia yang terjadi ketika bahan bakar bereaksi dengan oksidator, biasanya oksigen, yang menghasilkan pelepasan energi dalam bentuk panas dan cahaya yang dapat diilustrasikan pada gambar 2.6 (Dasilva & Hall, 2023). Pembakaran dapat terjadi dalam kondisi aliran yang berbeda, yang secara signifikan memengaruhi karakteristik api dan efisiensi proses. Dua jenis utama aliran pembakaran adalah pembakaran turbulen dan pembakaran laminar. Pembakaran laminar mengacu pada proses pembakaran di mana aliran reaktan (bahan bakar dan oksidator) lancar dan teratur. Pembakaran turbulen terjadi ketika aliran reaktan kacau dan tidak teratur, dengan pusaran dan vortisitas yang meningkatkan pencampuran bahan bakar dan oksidator. Turbulensi meningkatkan luas permukaan api dan dapat meningkatkan laju pembakaran secara signifikan. Pembakaran juga dapat terjadi dalam berbagai bentuk tergantung pada ketersediaan oksigen dan kelengkapan reaksi kimia. Dua tipe

utama adalah pembakaran sempurna dan pembakaran tidak sempurna. Pembakaran sempurna terjadi saat bahan bakar terbakar dengan adanya oksigen yang cukup, sehingga dapat bereaksi sepenuhnya dan menghasilkan energi dalam jumlah maksimal. Pembakaran tidak sempurna terjadi ketika kandungan oksigen dalam campuran bahan bakar tidak mencukupi, sehingga bahan bakar tidak dapat bereaksi sepenuhnya. Hal ini mengakibatkan produksi senyawa yang teroksidasi sebagian, yang menyebabkan pembentukan polutan karbon monoksida (CO), partikel karbon, dan hidrokarbon yang tidak terbakar. Selain itu, energi yang dihasilkan oleh pembakaran tidak sempurna lebih rendah dibandingkan pembakaran sempurna. (Turns, 2011)



Gambar 2.6. Skema Proses Pembakaran

Sumber: Dasilva, M., & Hall, N. (2023). *The Process of Combustion*. NASA Glenn Research Center. NASA Glenn Research Center

2.9. Karakteristik Pembakaran

2.9.1. Tekanan

Tekanan adalah sebuah konsep dasar dalam fisika, merujuk pada gaya yang diberikan per satuan luas. Tekanan di dalam ruang bakar adalah indikator utama efisiensi pembakaran. Tekanan maksimum selama siklus pembakaran menunjukkan seberapa baik bahan bakar dan udara tercampur serta terbakar. Tekanan yang lebih tinggi meningkatkan frekuensi tumbukan molekul, mempercepat laju reaksi kimia, dan mempengaruhi stabilitas nyala api. Hal ini dapat meningkatkan perambatan nyala api dan mengurangi kemungkinan padamnya nyala api, yang penting untuk menjaga pembakaran yang efisien dan berkelanjutan. Instrumen yang digunakan untuk mengukur tekanan dapat berupa *pressure gauge* dan sensor *piezoelectric*. (Heywood, 2018)

2.9.2. Laju Perpindahan Panas/*Heat Release Rate*

Laju perpindahan panas (HRR) adalah ukuran jumlah energi panas yang dilepaskan per satuan waktu selama proses pembakaran. HRR memberikan informasi penting tentang seberapa cepat energi dilepaskan dari bahan bakar yang terbakar, yang pada gilirannya mempengaruhi suhu, tekanan, dan kecepatan reaksi dalam sistem pembakaran. Laju perpindahan panas dari pembakaran dapat dihitung menggunakan persamaan 2.2.

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{1}{\kappa - 1} \cdot V \frac{dP}{dt} \tag{2.2}$$

Dimana:

- *dQ/dt*: Laju perpindahan panas [J/s], *P*: tekanan saat pembakaran [Pa]
- *V*: Volume ruang pembakaran [m^3]
- *t*: Waktu [s]
- *κ*: *Specific heat ratio* [-].

2.9.3. Fraksi Massa Terbakar/*Mass Fraction Burned*

Fraksi massa terbakar (r_m) adalah rasio massa bahan bakar yang telah terbakar terhadap massa total bahan bakar yang tersedia pada waktu tertentu dalam proses pembakaran. Sehingga, fraksi massa terbakar mengukur seberapa banyak dari amonia yang telah bereaksi dan terbakar dibandingkan dengan total massa amonia yang awalnya ada di dalam sistem. Fraksi massa terbakar dapat dihitung menggunakan persamaan 2.3.

$$r_m = \frac{M_a}{M} = \frac{P - P_{initial}}{P_{max} - P_{initial}} \tag{2.3}$$

Dimana:

- M_a: Massa amonia yang terbakar pada waktu tertentu [kg]
- *M*: Massa total amonia yang terbakar [kg]
- $P_{initial}$: Tekanan inisial [MPa]
- P_{max}: Tekanan silinder maksimum [MPa]

2.9.4. Fraksi Volume Terbakar/*Volume Fraction Burned*

Fraksi volume yang terbakar (r_v) adalah rasio antara volume bahan bakar yang telah terbakar terhadap volume total bahan bakar yang tersedia pada waktu tertentu selama proses pembakaran. Sehingga, fraksi volume terbakar mengukur seberapa besar volume amonia yang telah bereaksi dan terbakar dibandingkan dengan volume total amonia yang tersedia di dalam ruang bakar. Fraksi volume terbakar dapat didefinisikan sebagai volume gas

pembakaran dibagi dengan volume ruang bakar yang ditunjukkan sebagai persamaan 2.4, dengan asumsi bahwa gas yang tidak terbakar dikompresi secara adiabatik yang berarti tidak ada pertukaran panas dengan lingkungan sekitar.

$$r_v = \frac{V_a}{V} = 1 - \frac{1-r_m}{[1+r_m(\frac{P_{max}}{P_{initial}}-1)]^{1/\kappa}} \tag{2.4}$$

Dimana:

- V_a : Volume pembakaran campuran udara-bahan bakar [m^3]

2.9.5. Kecepatan Jet Rata-rata

$v_{orifice}$ adalah kecepatan dari jet yang terbentuk dari pembakaran campuran bahan bakar di *sub-chamber* saat keluar dari *nozzle*/*orifice* dan memasuki ruang bakar utama. Ketika campuran bahan bakar-udara di dalam *sub-chamber* terbakar, tekanan dan suhu di dalam *sub-chamber* meningkat secara signifikan. Peningkatan ini menyebabkan campuran yang terbakar dipaksa keluar melalui *nozzle*/*orifice* dengan kecepatan tinggi, membentuk jet. Kecepatan jet rata-rata dapat dihitung menggunakan persamaan 2.5.

$$v_{orifice} = \frac{\int_0^{t_j} \frac{\dot{V}}{A_{orifice}} dt}{t_j} \tag{2.5}$$

Dimana:

t_j : periode injeksi [s]

$A_{orifice}$: luas penampang *nozzle* [m^2]

$\dot{V}$: laju aliran volumetrik gas terbakar yang melewati *nozzle* [m^3/s] yaitu ukuran volume gas yang bergerak melalui *nozzle* per satuan waktu selama proses pembakaran. Laju aliran volumetrik dapat dihitung melalui persamaan 2.6.

$$\dot{V} = V_m(\frac{dr_v}{dt} - \frac{dr_m}{dt}) \tag{2.6}$$

Dimana:

V_m : Volume ruang bakar utama/*main chamber* (19×10^{-6} m^3).

2.9.6. Durasi Pembakaran

Durasi pembakaran adalah waktu yang dibutuhkan campuran bahan bakar-udara untuk terbakar sempurna di ruang bakar. Parameter ini penting karena berdampak langsung pada kinerja, efisiensi, dan emisi mesin. Durasi pembakaran yang terlalu cepat dapat

menyebabkan *knocking*, yaitu fenomena di mana campuran bahan bakar-udara terbakar secara terlalu cepat dan tidak merata, menghasilkan gelombang tekanan yang tinggi dan mendadak. Knocking dapat menyebabkan kerusakan mekanis pada komponen mesin, seperti piston dan silinder, serta menghasilkan suara ketukan yang merusak. Selain itu, knocking mengurangi efisiensi pembakaran karena sebagian energi dilepaskan secara tidak terkontrol, sehingga mengurangi daya output mesin dan meningkatkan konsumsi bahan bakar. Di sisi lain, durasi pembakaran yang terlalu lambat juga dapat berdampak negatif pada efisiensi mesin. Pembakaran yang lambat berarti bahan bakar tidak terbakar sepenuhnya pada waktu yang optimal dalam siklus kerja mesin. Akibatnya, sebagian energi bahan bakar terbuang sebagai panas dan gas buang yang tidak terbakar sempurna, mengurangi efisiensi termal mesin dan meningkatkan emisi polutan. (Heywood, 2018)

Pada penelitian ini durasi pembakaran didefinisikan sebagai waktu dari waktu pengapian hingga waktu mencapai tekanan maksimum.