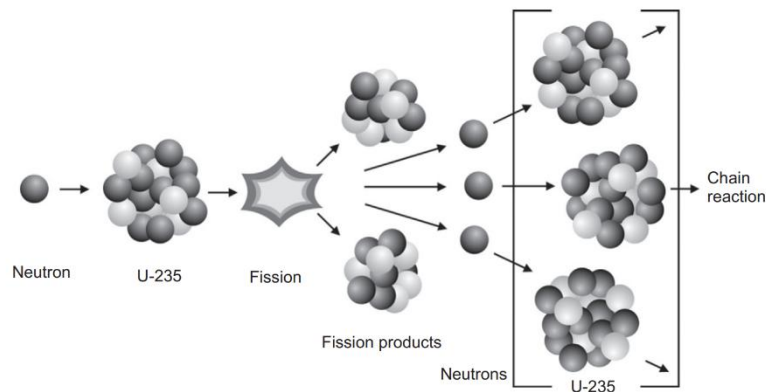


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

2.1.1 Reaksi dan Reaktor Nuklir

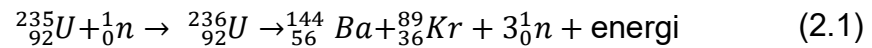


Gambar 2.1 Reaksi Fisi Nuklir

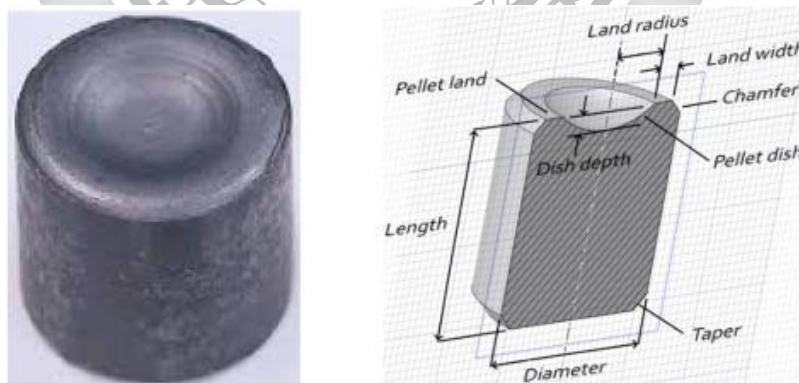
Sumber: (Gill et al., 2013)

Energi fisi nuklir dihasilkan pada proses reaksi fisi nuklir. Reaksi fisi terjadi ketika neutron berinteraksi dengan bahan fisil. Material yang berkaitan dengan reaksi fisi umumnya terbagi menjadi dua kategori, yaitu material fisil dan material fertil. Material fisil, seperti uranium-235 (U^{235}) dan plutonium-239 (Pu^{239}), adalah isotop yang dapat langsung mengalami fisi saat menangkap neutron. Sementara itu, material fertil, seperti uranium-238 (U^{238}) dan thorium-232 (Th^{232}), tidak langsung mengalami fisi, tetapi dapat berubah menjadi isotop fisil setelah menyerap neutron. Umumnya pada reaktor nuklir, kedua bahan bakar tersebut biasa digunakan. Uranium yang tersedia di alam dan dapat mempertahankan reaksi berantai fisi adalah U^{235} (C.K. Gupta, 2001; Design of a Nuclear Reactor, 2015). Persamaan (2.1) adalah salah satu contoh reaksi fisi nuklir menggunakan U^{235} yang bereaksi dengan neutron membentuk U^{236} , dan kemudian mengalami proses fisi.

Proses reaksi fisi dari uranium menghasilkan isotop lain seperti Ba^{141} dan Kr^{92} , neutron tambahan, dan energi dalam bentuk panas (Ojovan et al., 2019).



Dalam satu peristiwa fisi nuklir, umumnya dihasilkan dua hingga tiga neutron. Neutron-neutron ini dapat menyebabkan reaksi fisi berikutnya, sehingga membentuk reaksi berantai, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2.1. Hal ini memungkinkan energi dalam jumlah besar diekstraksi dari proses tersebut. Jumlah energi yang diekstraksi dapat disesuaikan dengan mengontrol jumlah neutron. Energi diekstraksi dalam bentuk panas melalui pendingin yang bersirkulasi di dalam *core* reaktor. Semakin besar kenaikan suhu keluaran pendingin, maka semakin besar efisiensi konversi energi reaktor (Sekimoto, 2007).

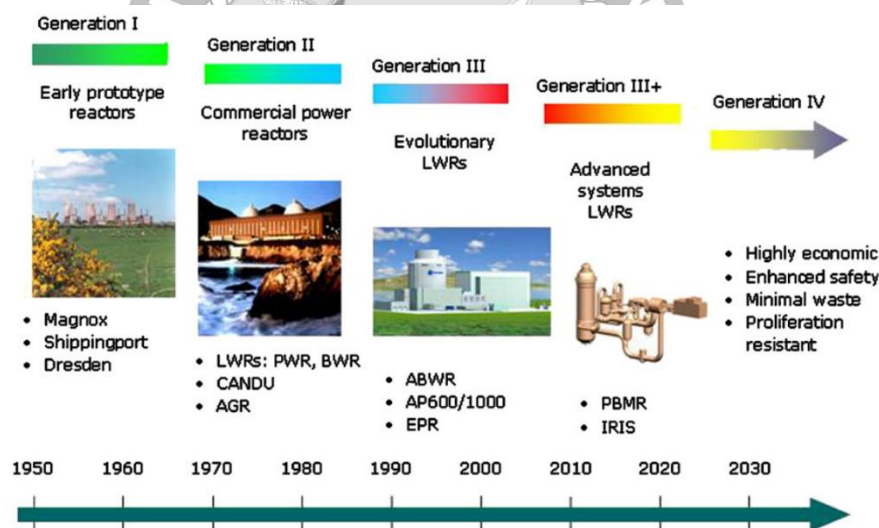


Gambar 2.2 Pelet Bahan Bakar (UO_2)

Sumber : (Nihan Onder, 2022)

Urania atau dioksida uranium (UO_2) adalah bahan bakar yang umumnya digunakan pada reaktor nuklir. UO_2 yang digunakan berbentuk *pellet* dengan tinggi dan diameter sekitar 10 mm, seperti pada Gambar 2.2. *Pellet* ini ditumpuk hingga 4 meter yang dilindungi dengan logam vertikal atau biasa disebut *cladding*. Tabung logam yang diisi dengan *pellet* bahan bakar keramik disebut perangkat bahan bakar (*fuel assembly*) (Rebak, 2020).

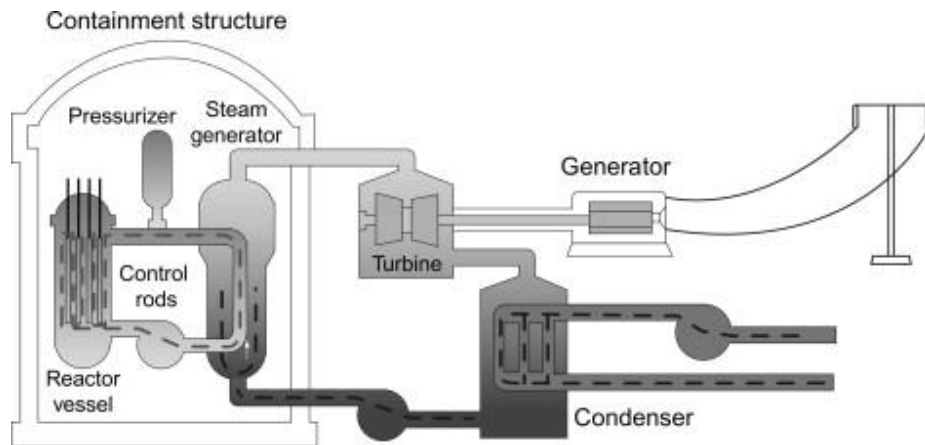
Gambar 2.3 merupakan perkembangan teknologi reaktor nuklir dari generasi I hingga reaktor baru generasi IV, yang menawarkan berbagai keunggulan seperti efisiensi yang lebih tinggi, keamanan yang lebih baik, dan pengurangan limbah radioaktif (Locatelli et al., 2013). Namun, kenyataannya banyak negara yang masih mengandalkan reaktor generasi II dan III, khususnya jenis *Light Water Reactor* (LWR). Ada dua jenis LWRs, yaitu *Boiling Water Reactor* (BWR) dan *Pressurized Water Reactor* (PWR). Saat ini, PLTN yang beroperasi dunia dengan tipe PWR berjumlah 307 dan 41 reaktor berjenis BWR (Statista, 2024).



Gambar 2.3 Generasi dari Sistem Energi Nuklir

Sumber : (Abram & Ion, 2008)

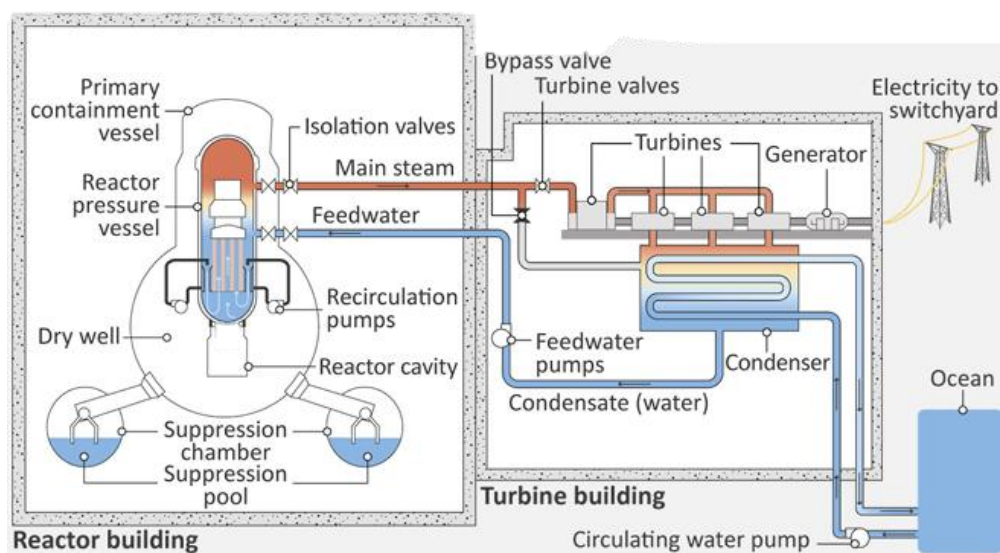
Perbedaan utama antara dua jenis reaktor LWR, yaitu PWR dan BWR, terletak pada sistem pendinginnya. Pada reaktor PWR, terdapat dua sirkuit pendingin: primer dan sekunder. Pendingin pada sisi primer berupa air bertekanan tinggi yang bersirkulasi langsung melalui teras reaktor dan bersentuhan dengan batang bahan bakar. Tekanan tinggi ini mencegah air mengalami perubahan fase menjadi uap. Energi panas dari air primer kemudian ditransfer melalui alat *steam generator* ke sirkuit sekunder, di mana air diuapkan untuk menggerakkan turbin seperti pada Gambar 2.4 (Rebak, 2020).



Gambar 2.4 Skema *Pressurized Water Reactor*

Sumber: (Suppes & Storvick, 2016)

Sementara itu, pada reaktor BWR, hanya terdapat satu sirkuit pendingin. Air mengalir langsung ke dalam teras reaktor, bersentuhan dengan perangkat bahan bakar, dan mengalami pendidihan secara langsung akibat panas dari reaksi fisi. Uap yang dihasilkan digunakan secara langsung untuk memutar turbin (Gambar 2.5) (Matsuura et al., 2023). Karakteristik reaktor BWR yang hanya menggunakan satu sirkuit pendingin, seperti yang diterapkan di Fukushima Daiichi, menjadi salah satu faktor penting dalam eskalasi kecelakaan yang terjadi.



Gambar 2.5 Skema *Boiling Water Reactor*

Sumber: (Y. Zhang et al., 2023)

2.1.2 Kecelakaan Reaktor Fukushima Daiichi

Reaktor Fukushima Daiichi terletak di Okuma, Fukushima, Jepang. Reaktor ini terletak di tepi laut, sekitar 200 meter dari garis Pantai Samudera Pasifik. Hal ini memudahkan akses untuk pendingin reaktor menggunakan air laut, namun membuat reaktor ini berpotensi terdampak bencana alam seperti tsunami (Song, 2021).



Gambar 2.6 Tampilan Keseluruhan Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir Fukushima Daiichi

Sumber: (TEPCO, n.d)

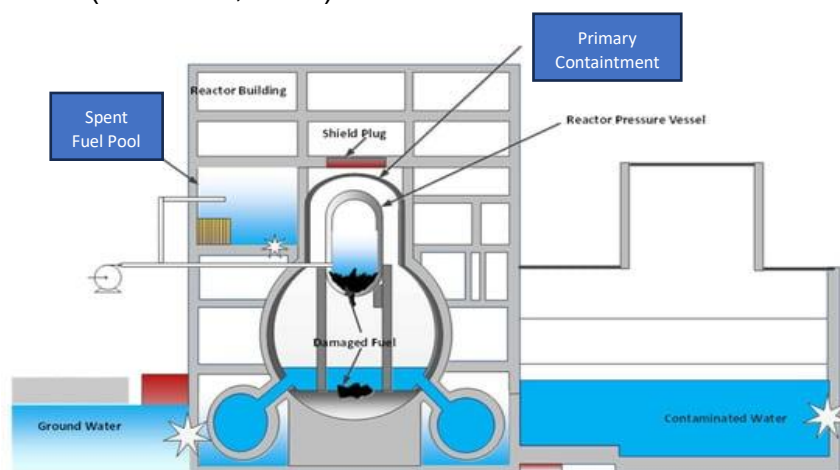
Pembangkit listrik tenaga nuklir ini terdiri atas enam unit reaktor yang seluruhnya telah beroperasi secara komersial sejak tahun 1971 (Gambar 2.6). Reaktor yang digunakan di Fukushima Daiichi merupakan tipe BWR (*Boiling Water Reactor*). Struktur dan komponen reaktor Fukushima ditunjukkan pada Gambar 2.7, dengan beberapa bagian utama yang perlu menjadi perhatian adalah sebagai berikut:

- a) Bejana tekan (*reactor pressure vessel*) yakni tempat dimana teras reaktor berada.
- b) *Primary containment* adalah lapisan pelindung pertama yang mengelilingi *vessel* reaktor. Fungsinya untuk mencegah keluarnya bahan radioaktif dari reaktor.
- c) *Secondary containment* adalah lapisan kedua yang mengelilingi reaktor, yang dirancang untuk mencegah kebocoran radioaktif ke

lingkungan. Area ini ditandai sebagai tempat terjadinya ledakan di unit 1 dan unit 3 Fukushima Daiichi.

- d) Kolam tempat penyimpanan bahan bakar bekas (*spent fuel pool*).
- e) *Suppression pool* (Torus), termasuk bagian dari *containment primer* biasanya terletak di bagian bawah dan berbentuk cincin. Fungsi utama dari *suppression pool* adalah untuk mendinginkan uap yang dihasilkan, dengan mengkondensasikan uap menjadi air, selain itu berfungsi sebagai penyeimbang tekanan di dalam bejana tekan (ITER Consult, 2011).

Pada tanggal 11 Maret 2011, terjadi gempa bumi dahsyat di wilayah timur laut Jepang yang berdampak langsung pada Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) Fukushima Daiichi. Saat gempa terjadi, unit reaktor 1, 2, dan 3 dalam kondisi beroperasi normal. Sebagai respon otomatis terhadap gempa, sistem keselamatan reaktor segera mengaktifkan penyisipan batang kendali ke dalam teras reaktor (*scram*), sehingga reaksi fisi berhasil dihentikan dan reaktor mengalami *trip* (*shutdown*). Meskipun reaksi fisi telah berhenti, panas peluruhan (*decay heat*) tetap dihasilkan dan harus terus didinginkan untuk mencegah kenaikan suhu berlebih di dalam teras reaktor (Ahn et al., 2015).



Gambar 2.7 Skematik Pelelehan Teras BWR di Fukushima Daiichi

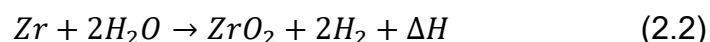
Sumber: (Song, 2021)

Setelah terjadi gempa bumi, reaktor mengalami *trip*, yaitu penghentian otomatis operasi reaktor sebagai langkah pengamanan akibat kondisi abnormal. Akibatnya, sistem pendingin utama turut terhenti. Untuk mengatasi hal tersebut, sistem pendingin darurat (*Emergency Core Cooling System*) segera diaktifkan dengan menggunakan generator diesel sebagai sumber daya listrik cadangan. Sistem ini sempat berfungsi dan berhasil mempertahankan suhu reaktor tetap stabil selama beberapa saat setelah gempa.

Namun, sekitar satu jam kemudian, gelombang tsunami setinggi lebih dari 14 meter menghantam fasilitas Fukushima. Air laut merendam sebagian besar instalasi, termasuk generator diesel yang merupakan sumber daya utama bagi sistem pendingin darurat. Akibatnya, pasokan listrik untuk sistem pendingin terputus sehingga reaktor kehilangan kemampuan untuk membuang panas (IAEA, 2015).

Sebagai upaya terakhir, operator mencoba mengaktifkan sistem pendingin bertekanan rendah (*low-pressure cooling system*) dengan menggunakan tenaga dari baterai cadangan yang tersedia, dan juga dibantu dengan baterai mobil. Namun, kapasitas baterai sangat terbatas dan tidak mampu menjalankan sistem pendingin secara efektif dalam jangka waktu yang dibutuhkan. Akhirnya, suhu di dalam teras reaktor terus meningkat tanpa terkendali sehingga menyebabkan bahan bakar meleleh (*core meltdown*) dan terjadilah kecelakaan nuklir besar yang tidak dapat dihindari (TEPCO, n.d).

Pada kecelakaan Fukushima Daiichi yang menggunakan reaktor jenis *Light Water Reactor* (LWR), ledakan hidrogen merusak struktur bangunan reaktor, diikuti oleh pelepasan uap yang mengandung berbagai radionuklida ke lingkungan (Gupta, 2015; Nishimura *et al.*, 2015).



Reaksi yang ditunjukkan pada Persamaan (2.2) merupakan reaksi antara material *cladding* reaktor sebagai pelindung pertama yang berinteraksi langsung dengan bahan bakar dengan uap air panas. Suhu reaktor

meningkat melebihi 1473 K pada saat kecelakaan terjadi. Dalam kondisi tersebut, terjadi reaksi oksidasi antara *zirconium alloy* dan uap air yang bersifat eksotermik, menghasilkan gas hidrogen dan berkontribusi pada kerusakan lebih lanjut hingga mencairnya inti (*core meltdown*) (Ukai et al., 2023).

Pada Gambar 2.8 dapat terlihat bahwa ledakan hidrogen terjadi tidak pada *core* tetapi terjadi di bagian atas bangunan reaktor. Akumulasi hidrogen dalam konsentrasi tinggi di ruang tertutup menyebabkan terjadinya ledakan setelah mencapai batas campuran yang mudah terbakar dengan udara. Terbentuknya gas hidrogen selama kecelakaan reaktor berkaitan erat dengan interaksi antara kelongsong bahan bakar (*fuel cladding*) dan uap air pada suhu tinggi.



Gambar 2.8 Skema Rekapitulasi Ledakan Reaktor

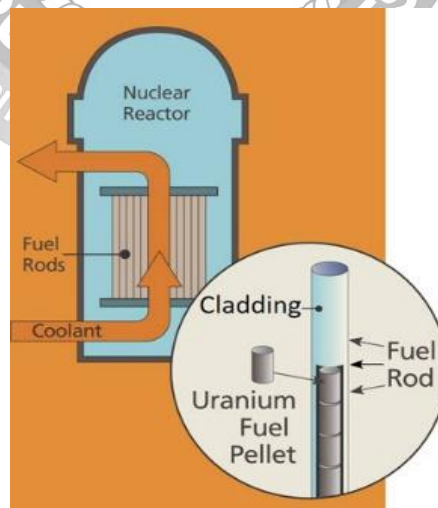
Sumber : (Jorel M. et al, 2017 yang diambil pada film IRSN production, 2012)

2.1.3 *Fuel Cladding* (Kelongsong Bahan Bakar)

Cladding bahan bakar nuklir berperan sebagai penghalang yang berfungsi untuk menahan produk fisi yang dihasilkan oleh reaksi fisi nuklir dan mencegah pelepasannya ke dalam *pressure vessel* (Diniasi et al., 2023). Pada dasarnya *cladding* bahan bakar nuklir berfungsi sebagai pelindung pertama yang melindungi dari kebocoran bahan radioaktif di dalam reaktor nuklir untuk mencegah zat-zat radioaktif tidak keluar ke lingkungan (Terrani, 2018). *Cladding* bahan bakar terletak di antara

pendingin reaktor dan bahan bakar nuklir (yaitu *pellet* bahan bakar) seperti pada Gambar 2.9.

Material *cladding* pada bahan bakar harus memiliki penampang serapan neutron yang rendah agar tidak menghambat aliran neutron sehingga meminimalkan kehilangan neutron. Contoh material yang memenuhi kriteria ini antara lain: magnesium (Mg), berilium (Be), silikon, aluminium (Al), dan zirkonium (Zr) (Azevedo, 2011). Selain itu, *cladding* harus memiliki konduktivitas termal yang tinggi dan mampu menampung fluks panas permukaan yang tinggi (Ajantiwalay et al., 2020). Meskipun material *cladding* konvensional telah memenuhi karakteristik dasar untuk operasi normal, insiden seperti kecelakaan Fukushima menunjukkan perlunya pengembangan material baru yang lebih tahan terhadap kondisi ekstrem. Untuk itu, konsep *Accident Tolerant Fuel (ATF)* dikembangkan sebagai solusi peningkatan keselamatan bahan bakar reaktor (NEA, 2018).



Gambar 2.9 Cladding Reaktor

Sumber : (USNRC, 2024)

2.1.4 Accident Tolerant Fuel (ATF)

Accident Tolerant Fuel (ATF) adalah sistem alternatif bahan bakar dan *cladding* reaktor nuklir yang memiliki ketahanan lebih tinggi terhadap

suhu ekstrem dan kondisi kecelakaan, serta mengurangi risiko pelepasan radioaktif. Pengembangan *Accident Tolerant Fuel* (ATF) mengarah pada tiga penelitian utama, yaitu *cladding* bahan bakar, *pellet* bahan bakar dan interaksi antar keduanya (Kammerman et al., 2019; US NRC, 2020). Penelitian ini memfokuskan pada penggunaan ATF sebagai *cladding* bahan bakar. Pada *cladding* bahan bakar terdapat tiga ide utama, diantaranya adalah melakukan modifikasi *zirconium alloys* yang banyak digunakan saat ini dan mengembangkan bahan *cladding* baru, seperti FeAlCr, FeAlCr-ODS, dan komposit SiC (Diniasi et al., 2021; Doyle et al., 2020; Yang et al., 2022).

Material *cladding* dirancang untuk mengurangi produksi hidrogen saat terjadi kecelakaan dan meningkatkan retensi produk fisi (NRC, 2020). Selain itu, kandidat material ATF *cladding* tersebut menunjukkan ketahanan yang lebih baik terhadap radiasi, korosi, dan suhu tinggi, sehingga meningkatkan integritas struktural bahan bakar (Gomes et al., 2017; Karoutas et al., 2018).

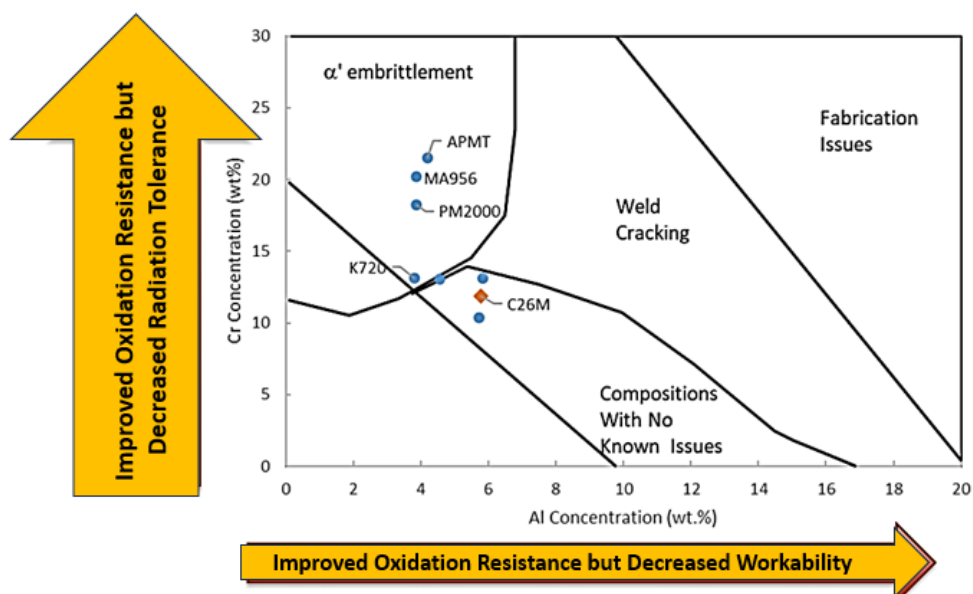
Sebagian besar reaktor nuklir komersial yang berjenis LWR menggunakan *cladding* bahan bakar berbasis *zirconium alloys* (*Zircaloy*). *Zircaloy* sangat umum digunakan sebagai material kelongsong untuk bahan bakar pada elemen di reaktor nuklir. Namun, pada kondisi kecelakaan, seperti kehilangan pendingin, *zircaloy* dapat bereaksi eksotermik dengan uap dan menghasilkan hidrogen yang dapat menyebabkan kerusakan parah pada *core* reaktor (De Luze et al., 2013). Oleh karena itu dibutuhkan penelitian lebih lanjut mengenai material ATF baik untuk bahan bakar maupun *cladding*.

Pada bahan *cladding* ATF, sifat-sifat yang dibutuhkan adalah konduktivitas termal, kekuatan, dan kelenturan yang tinggi, serta ketahanan terhadap korosi dan kompatibilitas kimia yang baik untuk menjamin keselamatan dan kinerja dalam kondisi normal maupun darurat. Selain itu, *cladding* juga harus menunjukkan stabilitas terhadap radiasi, meminimalkan produksi hidrogen dan penyerapan neutron yang kecil (NEA OECD, 2018; Qu et al., 2023). Salah satu material yang menonjol sebagai kandidat

cladding untuk *Accident Tolerant Fuel* adalah paduan FeCrAl, yang menunjukkan ketahanan oksidasi sangat baik serta sifat mekanik dan kimia yang mendukung keselamatan reaktor dalam berbagai kondisi operasi (Strumpell. J, 2013).

2.1.5 FeCrAl

Paduan FeCrAl memiliki struktur kristal feritik (*body-centered cubic/BCC*) dan secara umum tidak mengalami transformasi fasa ke atau dari struktur austenit (*face-centered cubic/FCC*) dalam rentang suhu dari titik cair hingga suhu ruang. Stabilitas fasa ini dipengaruhi oleh kandungan kromium (Cr) dan aluminium (Al) dalam paduan berbasis besi (Fe) (Field et al., 2018). Penambahan Cr berkontribusi terhadap ketahanan korosi dengan membentuk lapisan kromium oksida (chromia) dalam kondisi normal, sementara penambahan Al meningkatkan ketahanan terhadap oksidasi pada suhu tinggi dengan membentuk lapisan aluminium oksida (alumina) dalam kondisi kecelakan (Rebak, 2020). Selain itu, penambahan Cr juga membantu menstabilkan lapisan alumina dalam lingkungan uap bersuhu tinggi.



Gambar 2.10 Efek Chromium dan Aluminum pada FeCrAl

Sumber: (Yamamoto et al., 2015)

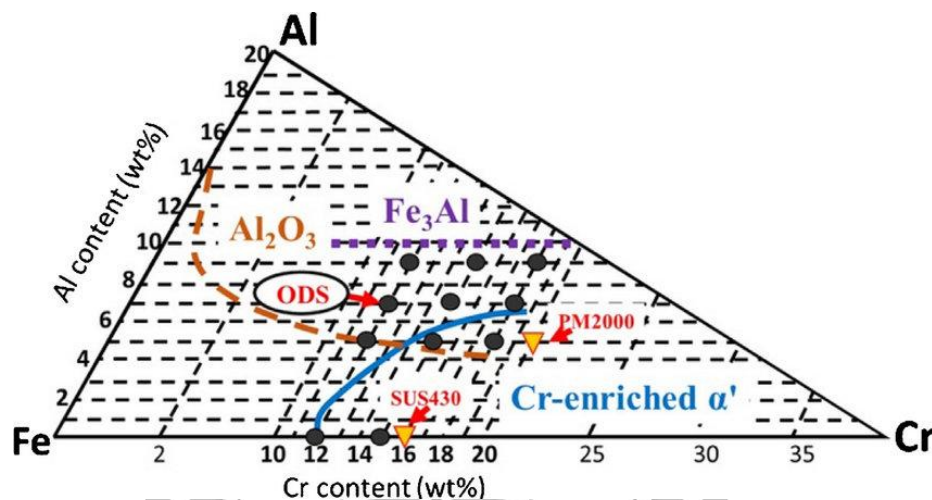
Kandungan Cr dan Al perlu diseimbangkan tidak hanya untuk perlindungan permukaan tetapi juga untuk pengendalian sifat material. Jika kandungan Cr terlalu tinggi, dapat menyebabkan kerapuhan akibat presipitasi fasa α' (Field et al., 2018; Lai et al., 2021) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.10. Untuk meningkatkan performa mekanik paduan FeCrAl, khususnya pada suhu tinggi, pendekatan penguatan mikrostruktur melalui teknologi *Oxide Dispersion Strengthened* (ODS) banyak dikembangkan. Metode ini bertujuan mengatasi keterbatasan sifat mekanik FeCrAl tanpa mengorbankan ketahanan korosi dan stabilitas termal (Wilms et al., 2023).

2.1.6 Oxide Dispersion Strengthened (ODS)

Pada paduan berbasis besi (Fe), baja *Oxide Dispersion Strengthened* (ODS) merupakan material yang mengandung partikel oksida berukuran nano dengan stabilitas termal tinggi yang terdistribusi secara merata di dalam matriks logam. Secara signifikan dapat meningkatkan sifat mekanik dalam suhu tinggi dibandingkan paduan umum tanpa ODS (Wu et al., 2020). ODS, seperti alumina (Al_2O_3), titania (TiO_2), thoria (ThO_2), yttria (Y_2O_3), lanthana (La_2O_3), dan beryllia (BeO) dapat menghambat pergerakan dislokasi dalam matriks logam dan meningkatkan ketahanan paduan terhadap *creep deformation* (Neikov, 2019).

Baja paduan dengan partikel oksida dinilai memiliki performa yang baik di suhu tinggi yaitu diatas 750°C sehingga memungkinkan digunakan sebagai kandidat ATF *cladding* (Y. Zhang et al., 2023). Paduan ODS telah lama dianggap memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap degradasi sifat mekanik akibat iradiasi neutron dibandingkan dengan paduan konvensional (Dryepondt et al., 2018). Varian baja ODS memiliki kekuatan mekanik yang lebih tinggi serta ketahanan terhadap *creep* yang meningkat, berkat adanya dispersi partikel oksida di dalam matriks logam (Yano et al., 2017). Penambahan yttrium dalam jumlah kecil dapat meningkatkan ketahanan

oksidasi paduan (S. Kim, Moon, and Bahn 2019). Penambahan komposisi ODS pada FeCrAl sebagai dispersi pada matrix FeCrAl dijelaskan pada Gambar 2.11.



Gambar 2.11 Diagram ternary Fe-Cr-Al: Bintik-Bintik Hitam dan Segitiga Mewakili Komposisi Baja ODS

Sumber : (Han et al., 2016)

Penelitian yang dilakukan oleh (Ukai et al., 2023) menunjukkan bahwa FeCrAl ODS sebagai material cladding untuk *Accident Tolerant Fuel* (ATF) mampu mencegah pemisahan fasa dan kerapuhan (*embrittlement*) pada suhu tinggi. Selain itu, pembentukan lapisan pelindung Al_2O_3 pada temperatur tinggi turut membantu mempertahankan fleksibilitas desain bahan bakar. Untuk memahami stabilitas fasa dan perilaku termodinamik paduan FeCrAl ODS secara lebih mendalam, diperlukan pendekatan perhitungan yang mampu memprediksi diagram fasa secara kuantitatif. Salah satu metode yang umum digunakan untuk tujuan ini adalah *Calculation Phase Diagram* (CALPHAD).

2.1.7 Calculation Phase Diagram (CALPHAD)

CALPHAD merupakan suatu pendekatan yang telah banyak digunakan dalam literatur ilmiah dan dikenal sebagai *CALPHAD method*. Metode ini digunakan untuk memprediksi sifat termodinamika dan

menyusun diagram fasa dari suatu sistem material secara kuantitatif (Spencer, 2008). Saat ini, pendekatan CALPHAD telah berhasil diterapkan untuk memperoleh diagram fasa pada kondisi kesetimbangan termodinamika melalui evaluasi fungsi energi Gibbs dari masing-masing fasa. Metode ini juga berperan penting dalam pemilihan komponen, perancangan komposisi, serta optimalisasi proses manufaktur material untuk berbagai aplikasi, seperti pada industri mesin pesawat terbang (Liu & Chen, 2007; Olson & Kuehmann, 2014).

Diagram fasa adalah diagram yang mewakili batas-batas stabilitas dari berbagai fasa dalam suatu sistem kimia pada keadaan kesetimbangan, dengan mempertimbangkan dua atau lebih variabel (umumnya komposisi dan suhu) (Dziubek, 2022). Pada umumnya diagram fasa yang digunakan adalah *binary phase* dan *ternary phase*. *Ternary Phase* menggambarkan hubungan tiga komponen dalam suatu sistem (Smith et al., 2013).

Fasa α dan α' dalam sistem *ternary* Fe-Cr-Al dijelaskan oleh model larutan substitusional (Al, Cr, Fe) dan energi Gibbs diekspresikan dengan *Compound Energy Formalism* (CEF) (Hillert et al., 2009) :

$$G_m^\phi = x_{Fe}^\circ G_{Fe}^\phi + x_{Cr}^\circ G_{Cr}^\phi + x_{Al}^\circ G_{Al}^\phi + RT(x_{Fe} \ln x_{Fe} + x_{Cr} \ln x_{Cr} + x_{Al} \ln x_{Al}) + E G_m^\phi \quad (2.3)$$

Dengan, (R) adalah konstanta gas, (x_{Al}), (x_{Cr}), dan (x_{Fe}) adalah fraksi mol Al, Cr, dan Fe. Referensi standar elemen (SER) digunakan sebagai keadaan referensi energi Gibbs. Analisis kestabilan fasa dan sifat termodinamika paduan FeCrAl memberikan landasan penting dalam penentuan fasa stabil dan *melting point*.

2.1.8 Powder Metallurgy

Powder metallurgy merupakan teknik pembentukan material dalam fasa padat, di mana material disintesis dari serbuk logam dengan ukuran partikel yang sangat halus. Proses ini dimulai dengan memasukkan serbuk ke dalam cetakan, diikuti oleh tahap kompaksi untuk membentuk *green body* yang menyerupai bentuk akhir yang diinginkan. *Green body* tersebut

kemudian mengalami proses *sintering*, yaitu pemanasan di bawah titik leleh material untuk mendorong terjadinya difusi antarpartikel, sehingga menghasilkan struktur logam yang padat. Namun, proses ini umumnya menghasilkan porositas pada material akhir, yang dapat memengaruhi nilai densitas atau berat jenis material tersebut (Rusianto, 2005).

Powder metallurgy melibatkan produksi serbuk prapaduan yang kemudian dikonsolidasikan menggunakan berbagai teknik, seperti *Hot Isostatic Pressing* (HIP) dan ekstrusi (Huang et al., 2023). Proses ini juga memungkinkan penambahan dispersi partikel oksida, seperti Y_2O_3 , yang berperan dalam meningkatkan kekuatan paduan pada suhu tinggi serta ketahanannya terhadap radiasi (Wilms et al., 2023).

Pelet yang dihasilkan dari proses kompaksi pada suhu ruang belum memiliki ikatan atom yang kuat. Untuk memperkuat ikatan antarpartikel, dilakukan proses pemanasan melalui *sintering*. *Sintering* merupakan tahap pemanasan di bawah titik leleh material, di mana partikel serbuk bergabung melalui mekanisme difusi dan pori-pori antarpartikel berkurang secara signifikan (Ramlan, 2011). Proses sintering umumnya dilakukan pada suhu antara 70% hingga 90% dari titik leleh material (Suwanda, 2006). Setelah melalui tahap *sintering*, karakterisasi mikrostruktur material menjadi langkah penting untuk memastikan keberhasilan proses pemadatan dan pengurangan porositas.

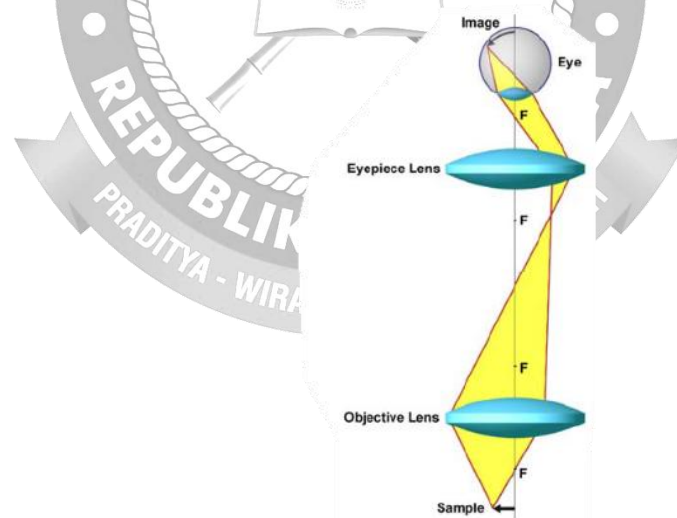
2.1.9 Karakterisasi Material

Light Optical Microscopy

Mikroskop optik cahaya adalah salah satu teknik yang paling umum digunakan untuk karakterisasi struktur mikro dalam pengembangan logam las. Kontras gambar adalah hasil dari variasi refleksi di berbagai wilayah struktur mikro. Keterbatasan teknik ini adalah resolusi spasialnya sekitar $0,5\ \mu\text{m}$ dan kedalaman bidangnya (Kohli, 2012). Dibandingkan dengan jenis mikroskopi lain untuk pencitraan permukaan, seperti SEM (*Scanning Electron Microscopy*), mikroskopi optik dibatasi oleh batas difraksi cahaya

tampak hingga pembesaran 1000x dan resolusi 200 nm (J. Zhang et al., 2013).

Struktur mikro suatu logam dapat dilihat dengan menggunakan mikroskop. Lensa objektif yang terletak pada dekat dengan spesimen memiliki kemampuan pembesaran yang tinggi seperti pada Gambar 2.12. Cahaya yang melewati spesimen difokuskan oleh lensa objektif sehingga gambar yang tidak dapat dibedakan oleh mata manusia dapat terlihat (Du et al., 2021). Untuk mengetahui sifat dari suatu logam, kita dapat melihat struktur mikronya. Informasi yang diperoleh dari struktur mikro diantaranya ukuran dan bentuk butir, distribusi fasa yang terdapat dalam material khususnya logam dan pengotor yang terdapat dalam material (Fadhilah, n.d.).



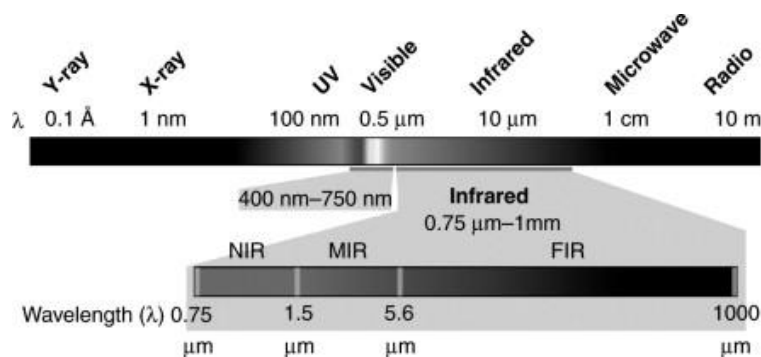
Gambar 2.12 Prinsip Kerja *Light Optical Microscope*

Sumber: (Lee & Senyuk, 2011)

Selain pengamatan visual terhadap struktur mikro menggunakan mikroskop optik, karakterisasi material juga dapat dilakukan pada tingkat kristalografi untuk mengetahui struktur internal pada skala atomik. Salah satu metode yang umum digunakan untuk tujuan ini adalah *X-Ray Diffraction* (XRD).

Karakterisasi menggunakan *X-Ray Diffraction* (XRD) memanfaatkan sinar-X dengan panjang gelombang yang sebanding dengan jarak antar atom dalam kisi kristal.

***X-Ray Diffraction* (XRD)**



Gambar 2.13 Spektrum Elektromagnetik

Sumber : (Ali et al., 2023)

Sinar-X merupakan salah satu bentuk radiasi gelombang elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang antara 0,01 hingga 10 nm dan rentang energi 1–120 keV (Gambar 2.13). Karena panjang gelombangnya mendekati skala atom, sinar-X sangat efektif untuk mengungkap susunan struktural atom dan molekul dalam suatu material. Selain itu, energi sinar-X yang tinggi memungkinkannya menembus jauh ke dalam material dan memberikan informasi mendalam mengenai struktur internalnya (Bajaj dan Joshi, 2021).

Tujuan utama penggunaan XRD adalah untuk membedah sistem kristal dan memahami karakteristik material, seperti kualitas kristal, geometri kristal, parameter kisi, jarak antar atom dan jumlah atom per unit sel (Waseda et al., 2011). Penggunaan XRD bisa dilakukan untuk mengidentifikasi fasa yang terbentuk pada suatu struktur material dengan menggunakan prinsip Hukum Bragg (Barabash et al., 2009):

$$\sin \theta = \frac{n\lambda}{2d_{hkl}} \quad (2.4)$$

Keterangan:

λ = Panjang gelombang

d = Jarak antar kisi

θ = sudut difraksi (θ)

$n = 1, 2, 3$ dsb. (Nilai difraksi)

Data hasil karakterisasi XRD dapat digunakan untuk memperoleh informasi ukuran kristal serta regangan kisi dengan Persamaan *Scherrer Debye*. Persamaan *Scherrer Debye* didefinisikan sebagai penentu ukuran kristal (Hassanzadeh-Tabrizi, 2023)

$$D = \frac{k\lambda}{B \cos \theta} \quad (2.5)$$

Keterangan,

D = Ukuran Kristal

k = *Scherrer constant* (0.9)

λ = Panjang gelombang X-ray

B = *Full-width half maximum*

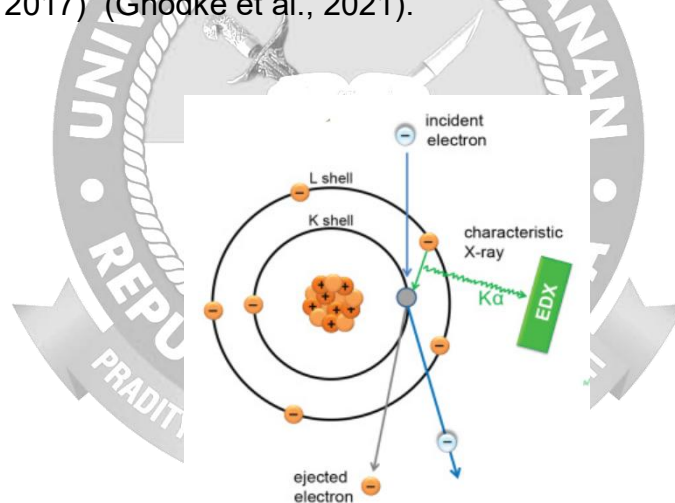
Selain analisis struktur kristal dan regangan kisi melalui karakterisasi XRD, untuk mengetahui morfologi permukaan dan topografi material dapat menggunakan alat *Scanning Electron Microscope* (SEM).

Scanning Electron Microscope (SEM)

Pada prinsipnya, SEM memanfaatkan berkas elektron yang dipancarkan dari katoda dengan tegangan antara 0,5 - 30kV untuk memindai permukaan spesimen (Hawkes 2019). SEM merupakan teknik untuk menggambarkan morfologi material dengan resolusi spasial di bawah 1 nm (Z. L. Wang et al., 2000). Alasan SEM digunakan untuk analisis ukuran partikel adalah resolusi SEM yang mencapai 10 nm, yaitu 100 Å (Goldstein et al., 1975). Selain memberikan informasi morfologi permukaan, SEM juga dapat dilengkapi dengan sistem *Energy Dispersive X-Ray* (EDX) untuk melakukan analisis komposisi unsur dalam material

Energy Dispersive X-Ray (EDX)

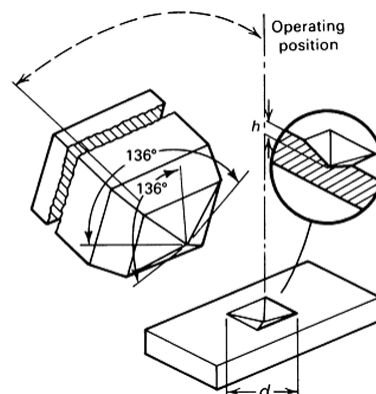
Teknik EDS (*Energy Dispersive Spectroscopy*) digunakan untuk mengetahui komposisi kimia suatu spesimen dengan mendeteksi sinar-X karakteristik yang dihasilkan. Saat elektron berenergi tinggi ditembakkan ke permukaan spesimen, elektron dari kulit dalam atom dapat terlepas, menciptakan kekosongan yang kemudian diisi oleh elektron dari kulit luar. Transisi ini melepaskan sinar-X dengan energi khas yang berbeda untuk setiap unsur, sehingga memungkinkan identifikasi elemen-elemen penyusun material. Prinsip kerja EDX pada Gambar 2.14 (Girão, Caputo, dan Ferro 2017) (Ghodke et al., 2021).



Gambar 2.14 Prinsip Kerja EDX

Sumber : (Pirozzi et al., 2021)

Vickers Hardness



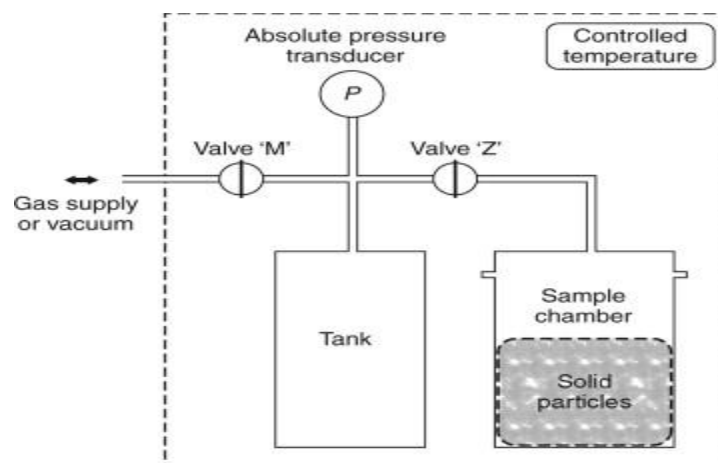
Gambar 2.15 Indentor Piramida Berlian untuk Uji Vickers

Sumber : (Moore & Booth, 2015)

Dalam pengujian kekerasan, nilai yang diperoleh sangat dipengaruhi oleh karakteristik benda yang diuji, seperti kekuatan tarik batas elastis, nilai modulus Young, dimensi, bentuk akhir permukaan, dan homogenitas material tersebut. Uji Vickers merupakan metode pengujian kekerasan dengan jangkauan skala yang luas. Metode ini menggunakan indentor berbentuk piramida intan dengan sudut 136° , yang membentuk lekukan persegi pada permukaan benda yang diuji. Pada prinsip pengujian Vickers, beban diterapkan selama 10-15 detik.

Dua diagonal lekukan yang dihasilkan diukur dalam milimeter dan dirata-ratakan untuk memperoleh nilai d . Nilai kekerasan kemudian ditentukan berdasarkan kalibrasi untuk beban kilogram (P) yang berbeda (Moore & Booth, 2015) seperti yang dilustrasikan pada Gambar 2.15. Angka kekerasan Vickers (HV) didefinisikan sebagai hasil bagi (koefisien) dari beban uji (F) dengan luas permukaan bekas tekan (injakan) dari indentor (diagonalnya) (A) yang dikalikan dengan $\sin(136^\circ/2)$ atau dapat dituliskan dengan rumus dibawah:

$$HV = \frac{1.854 \times F}{d^2} \quad (2.6)$$



Gambar 2.16 Diagram Pycnometer Gas-Volume Konstan

Sumber: (Tamari, 2004)

Helium Autopycnometer

Pycnometer memungkinkan mengukur volume dan kepadatan benda padat dengan cara yang tidak merusak seperti pada Gambar 2.16. Dengan menggunakan prinsip perpindahan fluida Archimedes dan hukum Boyle tentang hubungan volume-tekanan, masing-masing, untuk piknometer cair dan gas (Tamari dan Aguilar-Chavez, 2005).

Helium *autopycnometer* adalah alat untuk mengukur volume sejati (true volume) suatu benda padat tanpa merusaknya, dengan memanfaatkan prinsip hukum Boyle (Boyle's Law) yang menyatakan bahwa (Ruggieri et al., 2009) :

$$P_1 \cdot V_1 = P_2 \cdot V_2 \quad (2.7)$$

Selain itu, prinsip Archimedes digunakan sebagai prinsip alat ini karena suatu benda yang seluruhnya atau sebagian terendam dalam fluida diangkat oleh gaya yang sama dengan berat fluida yang dipindahkan. Idealnya, gas digunakan sebagai cairan pengganti karena menembus pori-pori terbaik, memungkinkan akurasi maksimum. Itulah sebabnya helium digunakan, karena dimensi atomnya yang kecil memungkinkan masuk ke dalam pori-pori sampel dengan nilai mendekati satu Ångström (10^{-10} m) (Tamari 2004).

2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Tabel 2.4 Referensi Penelitian Terdahulu

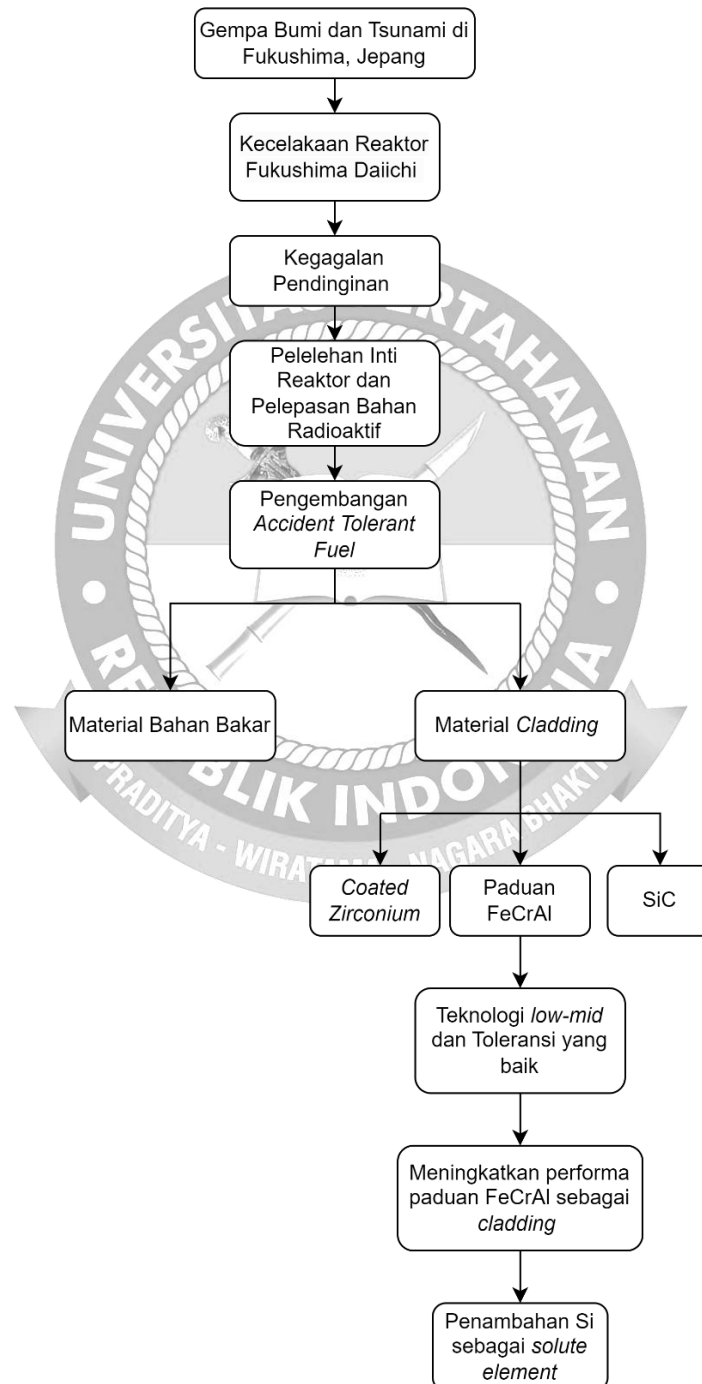
No	Nama Penulis dan Judul	Tujuan	Hasil	Persamaan	Perbedaan
1	(Chang et al., 2019). <i>Theory-guided bottom-up design of the FeCrAl alloys as accident tolerant fuel cladding materials. Journal of Nuclear Materials</i>	Penelitian ini bertujuan untuk merancang material pelapis bahan bakar yang tahan terhadap kecelakaan menggunakan pendekatan teori <i>bottom-up design</i> .	Hasil penelitian menunjukkan bahwa komposisi optimal: yang diusulkan untuk paduan FeCrAl adalah 0-15% Cr dan 11-21% Al. Paduan ini menunjukkan ketahanan oksidasi uap suhu tinggi yang superior dan ketahanan korosi yang lebih baik dibandingkan paduan berbasis Zirkonium.	Menggunakan pendekatan CALPHAD untuk memahami dan mengoptimalkan paduan FeCrAl.	Tidak melakukan teknik sintesis material.
2	(Wafda et al., 2024). Sintesis Paduan Baja Oxide Dispersoid Strengthened (ODS) Feritik Fe-Cr-Al-W-Ti-Zr Dengan Dispersoid Y ₂ O ₃ Sebagai Kandidat Material Cladding Elemen Bakar Reaktor Nuklir Dengan Metode Mekanosintesis.	Penelitian ini bertujuan untuk melakukan sintesis paduan <i>Oxide Dispersion Strengthened</i> (ODS) menggunakan dispersoid Y ₂ O ₃ dengan variasi komposisi Zr.	Hasil observasi menunjukkan bahwa material yang disintesis memiliki homogenitas yang baik. Pada analisis XRD menunjukkan bahwa semua spesimen memiliki fasa major α -Fe, yang dikonfirmasi dengan diagram fasa Fe-Cr-Al. Serta, <i>mapping</i> elemen menunjukkan distribusi yang merata untuk semua	- Menggunakan teknik sintesis <i>powder metallurgy</i>. - Menggunakan Y₂O₃ sebagai partikel dispersi dalam paduan baja.	- Komposisi paduan yang digunakan tanpa mengandung Silikon. - Menggunakan <i>ball milling</i> proses. - Komposisi paduan dengan melakukan variasi komposisi Zirkonium.

	Journal of Nuclear Science and Technology		unsur dalam spesimen, termasuk Zr pada spesimen yang mengandung Zr.		
3	(Sand et al., 2021b) Exploring the Effect of Silicon on the High Temperature Corrosion of Lean FeCrAl Alloys in Humid Air. <i>Journal Oxidation of Metals</i>	Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh silikon pada perilaku oksidasi dan struktur mikro skala oksida dari paduan FeCrAl yang mengandung silikon dan yang tidak, dalam udara kering dan basah pada suhu 600°C dan 800°C.	Paduan FeCrAl dengan silikon mempengaruhi sifat mekanik dan struktur mikro baja paduan rendah. Penambahan silikon meningkatkan kekuatan dan ketahanan aus dengan membentuk karbida silikon yang keras dalam matriks baja.	• Penggunaan Silikon sebagai minor elemen pada paduan FeCrAl.	• Tidak menggunakan material terdespersi atau ODS.
4	Shenyan Huanga <i>et al.</i> , (2022). Microstructure and tensile behavior of powder metallurgy FeCrAl accident tolerant fuel cladding	Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan tabung <i>cladding</i> FeCrAl yang bebas cacat dengan ketebalan <i>cladding</i> 0,3 mm menggunakan metode <i>powder metallurgy</i>	Tabung FeCrAl menunjukkan ukuran butir yang lebih halus, regangan yang rendah, dan sifat tarik yang lebih baik dibandingkan dengan tabung <i>cladding</i> Zircaloy-2, baik pada suhu ruang maupun 315°C.	• Menggunakan teknik sintesis <i>powder metallurgy</i>.	• Tidak menggunakan ODS/Y₂O₃. • Tidak menggunakan uji Difraksi Neutron.
5	(Jannah, 2019) Sintesis dan Karakterisasi Logam Paduan Fe-Cr-Al Sebagai Material Tahan Panas	Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi terhadap morfologi, struktur kristal, densitas,	Hasil XRD pada penelitian ini menunjukkan bahwa senyawa yang terbentuk adalah Fe-Cr. Pada	• Penggunaan Metode teknik sintesis <i>powder metallurgy</i>.	• Tidak menggunakan material terdispersi atau ODS.

		kekerasan, dan ketahanan oksidasi pada paduan Fe-Cr-Al dari proses metalurgi serbuk.	penelitian ini diketahui bahwa aluminium dapat mempengaruhi perubahan karakteristik paduan dan menyebabkan perubahan intensitas. Hasil SEM-EDX menunjukkan bahwa porositas terbesar terjadi karena penambahan Al. Hasil yang optimal pada ketahanan oksidasi terletak pada komposisi Al yang paling rendah.	• Menggunakan karakterisasi XRD dan SEM/EDS.	• Tidak melakukan penambahan variasi komposisi Silikon. • Tidak melakukan variasi terhadap aluminium.
--	--	--	---	--	--

Sumber: diolah oleh penulis

2.3 Kerangka Berpikir



Gambar 2.15 Kerangka Berpikir Penelitian

Sumber: diolah oleh penulis

2.4 Hipotesis

- a. Variasi konsentrasi silikon dalam paduan FeCrAl ODS yang disintesis melalui metode *powder metallurgy* akan mempengaruhi evolusi mikrostruktur, di mana peningkatan kadar Si cenderung memperhalus ukuran butir akibat peningkatan tingkat difusi dan pengendapan partikel oksida penguat.
- b. Penambahan silikon akan menyebabkan penurunan ukuran butir dan ukuran kristalit secara progresif, serta menghasilkan distribusi unsur yang lebih homogen dalam matriks paduan, karena Si berperan dalam menstabilkan batas butir.
- c. Peningkatan konsentrasi silikon dalam paduan FeCrAl ODS memengaruhi densitas nyata. Penurunan densitas diakibatkan perbedaan ukuran atom pada paduan FeCrAl ODS.
- d. Perubahan mikrostruktur akibat penambahan silikon, seperti penyempitan ukuran butir dan penurunan ukuran kristalit, akan berkontribusi langsung terhadap peningkatan kekerasan mikro paduan.