

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Landasan Teori

Dalam penelitian ini menggunakan beberapa literatur teori yang relevan, yaitu : Pertahanan Negara, Industri Pertahanan, Turbin Gas Pesawat, Bilah Turbin Pesawat, Superalloy Bilah Turbin, Material Molibdenum (Mo), Material Silika (Si), Material Aluminium (Al), Material Molibdenum Disilicida (MoSi_2), *Mechanical Alloying* (MA), *Spark Plasma Sintering* (SPS), *Archimedes Density*, *Vicker Hardness*, XRD (X-Ray Diffraction), SEM-EDS dan FESEM-EDS, Oksidasi Temperatur Tinggi.

2.1.1 Pertahanan Negara

Segala sesuatu bentuk penegakkan kedaulatan negara, yakni keutuhan wilayah Negara Kesatuan Republik Indonesia, serta keselamatan segenap bangsa adalah hakikat dari suatu pertahanan negara. Pertahanan hadir sebagai antisipasi dan reaksi atas munculnya kompleksitas ancaman seiring dengan berkembangnya lingkungan strategis yang membawa pada suatu perubahan keadaan (Witarti & Armandha, 2018). Pertahanan negara dipersiapkan secara dini dan diselenggarakan oleh pemerintah melalui pembangunan dan pembinaan kemampuan serta daya tangkal negara dan bangsa dalam suatu sistem pertahanan negara. Dalam Peraturan Menteri Pertahanan Nomor 16 Tahun 2012 tentang Kebijakan Pengintergrasian Komponen Pertahanan Negara mengenai pertahanan negara yang memiliki fungsi untuk mewujudkan dan mempertahankan seluruh wilayah Negara Kesatuan Republik Indonesia sebagai satu kesatuan pertahanan. Perlu adanya suatu analisis strategis terkait kondisi lingkungan wilayah teritori suatu negara yang disandingkan dengan kemungkinan kompleksitas ancaman yang ada, sehingga didapati perumusan suatu sistem tentang identifikasi potensi ancaman terhadap pertahanan negara berikut upaya dalam memilih strategi pertahanan (Kementerian Pertahanan, 2007).

Dalam Peraturan Menteri Pertahanan Republik Indonesia Nomor 19 Tahun 2015 berisi tentang sistem pertahanan negara yang merupakan sistem pertahanan yang bersifat semesta, diselenggarakan dengan memadukan pertahanan militer dan pertahanan nirmiliter. Pertahanan negara merupakan tugas utama dari Tentara Nasional Indonesia (TNI) sesuai yang tertuang pada Undang-Undang nomor 34 tahun 2004 tentang Tentara Nasional Indonesia. TNI merupakan komponen utama pertahanan negara baik dalam pertahanan militer maupun pertahanan nirmiliter.

Dalam menjalankan tugas utamanya, TNI yang merupakan komponen utama yang kemudian diperkuat dengan adanya komponen cadangan, yang merupakan sumber daya nasional yang disiapkan untuk dikerahkan dan di mobilisasi dengan tujuan untuk memperkuat kekuatan dan kemampuan dari komponen utama (Armandha, 2018). TNI dilengkapi dengan alat utama sistem senjata (alutsista) yang merupakan wahana pendukung yang dimiliki TNI untuk melaksanakan tugas pokoknya. TNI perlu diperlengkapi dengan alutsista yang mumpuni dan diupayakan dapat diciptakan dan diproduksi secara mandiri di dalam negeri, sehingga pada tahun 2012 lahirlah Undang-Undang nomor 16 tentang Industri Pertahanan yang mengatur tentang pemanfaatan dan maksimalisasi industri pertahanan dalam negeri demi tercapainya kemandirian dalam pengadaan alutsista TNI guna terwujudnya pertahanan negara yang kokoh secara optimal.

2.1.2 Industri Pertahanan

Dukungan pada suatu kekuatan pertahanan negara erat kaitannya dengan adanya berbagai macam sarana dan prasarana yang mendukung pertahanan negara melalui industri pertahanan yang dimiliki negara tersebut (Ramadhan, 2019). Dalam era modern saat ini negara yang memiliki industri pertahanan yang maju akan mempunyai kemampuan yang lebih dalam kekuatannya. Indonesia sebagai negara kepulauan yang luas memiliki kebutuhan pertahanan yang erat kaitannya dengan

usaha menjaga teritori wilayahnya, mengantisipasi proyeksi ancaman pada masa mendatang, dan tidak terkecuali ikut serta dalam dinamika politik keamanan dan pertahanan. Berdasarkan Undang-Undang nomor 16 tahun 2012 yang menyebutkan bahwa industri pertahanan adalah industri nasional yang terdiri atas badan usaha milik negara dan badan usaha milik swasta baik secara sendiri maupun berkelompok dengan ditetapkan oleh pemerintah untuk sebagian atau seluruhnya menghasilkan alat pertahanan dan keamanan, jasa pemeliharaan untuk kepentingan strategis di bidang pertahanan dan keamanan yang berlokasi di wilayah Negara Kesatuan Republik Indonesia.

Pengembangan industri pertahanan merupakan bagian terpadu dari perencanaan strategis pengelolaan sumber daya nasional untuk kepentingan pertahanan dan keamanan negara. Adanya penelitian dan pengembangan serta perekayasaan yang menumbuhkembangkan ilmu pengetahuan dan teknologi utamanya diperlukan guna mendukung industri pertahanan dalam merespon perkembangan teknologi pertahanan dan keamanan. Seperti yang tercantum pada Undang-undang No.16 tahun 2012 tentang Industri Pertahanan, pasal 29, dimana kegiatan penelitian dan pengembangan serta perekayasaan merupakan salah satu bentuk nyata atas usaha memajukan industri pertahanan agar kuat, mandiri, dan berdaya saing dalam mewujudkan kebutuhan pertahanan negara. Salah satu kunci penting agar suatu industri dapat terus tumbuh dan berkembang adalah dengan peningkatan kualitas produk, tak terkecuali dalam industri pertahanan.

Peningkatan kualitas produk pertahanan yang dihasilkan dalam industri pertahanan dapat terwujud melalui suatu penelitian dan pengembangan serta perekayasaan atas setiap komponen penyusun dalam industri pertahanan. Industri pertahanan yang berbasis pada penelitian pada sumber daya dan didukung oleh kebijakan pendidikan dan pelatihan akan mampu menopang industri strategis dan memperkuat industri

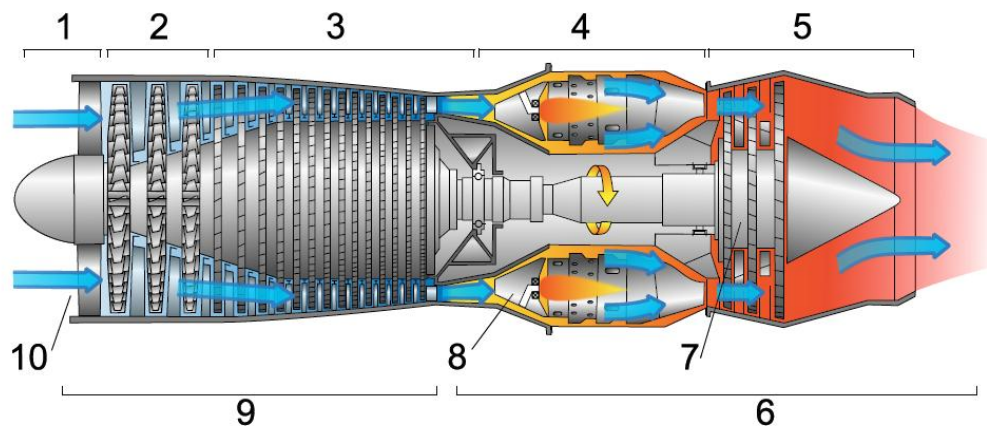
nasional. Terdapat beberapa material maju berbasis penelitian yang telah digunakan dalam industri pertahanan adalah Neodymium yang merupakan bahan baku Actuator Control untuk rudal jarak jauh dan menengah, Praseodymium untuk bahan baku pesawat tempur berkekuatan tinggi, Cerium untuk pembuatan Catalytic Converter dan lensa optik dan Lanthanum untuk pembuatan lensa Night Vision (Supusepa, 2020).

2.1.3 Turbin Gas Pesawat

Turbin gas merupakan mesin pembakaran dalam yang menggunakan udara sebagai fluida kerjanya. Mesin mengekstrak energi kimia dari bahan bakar dan mengubahnya menjadi energi mekanik dengan menggunakan energi gas dari fluida kerja (udara) untuk menggerakkan mesin dan baling-baling, yang kemudian mendorong pesawat (Spittle, 2003). Dalam mesin turbin memiliki bagian yang meliputi bagian saluran masuk, kompresor, bagian pembakaran, turbin, dan bagian pengeluaran. Bagian turbin dari mesin turbin gas memiliki tugas menghasilkan keluaran yang dapat digunakan sebagai daya poros untuk menggerakkan baling-baling, sebagai sumber tenaga untuk menggerakkan kompresor dan semua aksesoris mesin. Turbin bekerja dengan meningkatkan temperatur, tekanan, dan kecepatan gas dan kemudian mengubah energi gas menjadi energi mekanik berupa tenaga poros (Martínez et al., 2011).

Saat udara melewati mesin turbin gas, kebutuhan aerodinamis dan energi membuat perubahan kecepatan dan tekanan udara. Selama kompresi, bukan peningkatan kecepatannya melainkan kenaikan tekanan udara yang diperlukan. Setelah kompresi dan pembakaran telah memanaskan udara, peningkatan kecepatan gas diperlukan dalam agar rotor turbin mengembangkan daya. Ukuran dan bentuk saluran yang dilalui aliran udara mempengaruhi berbagai perubahan yang akan terjadi. Konversi dari kecepatan ketekanan diperlukan pada bagian-bagian yang

berbeda. Sebaliknya, jika konversi dari tekanan ke kecepatan diperlukan, maka saluran konvergen yang kemudian digunakan (Spittle, 2003).



Gambar 2. 1 Diagram dari mesin jet turbin gas, meliputi 1. Intake, 2. Kompresi tekanan rendah, 3. Kompresi tekanan tinggi, 4. Pembakaran, 5. Knalpot, 6. Bagian panas, 7. Turbin tekanan rendah dan tinggi, 8. Ruang pembakaran, 9. Bagian dingin, 10. Saluran masuk udara

Sumber : (*Components of Jet Engines*, n.d.)

Salah satu tipe dari turbin gas pesawat adalah *Allison T56-A-15* yang dikategorikan jenis turboprop. Dengan memiliki kekuatan mesin 2.796kW (3,750 eshp) pada 13.820 rpm, komponen yang dimiliki adalah sebuah kompresor yang terdiri atas 14 *stage* secara terpisah, 6 tabung bakar dan sebuah turbin yang terdiri atas 4 *stage*. Aliran udara panas yang terjadi termasuk aliran aksial, dengan temperatur mencapai 1095⁰ C untuk Turbine Inlet Temperatur (TIT) (Gale, 1982).

2.1.3.1 Bilah Turbin Gas Pesawat

Merupakan deretan baling-baling stasioner diikuti oleh deretan komponen pipih tipis yang berputar. Pada turbin, baling-baling stator meningkatkan kecepatan gas, dan kemudian bilah rotor mengekstrak energi. Baling-baling dan bilah adalah airfoil yang menyediakan aliran gas yang lancar (Spittle, 2003). Aliran udara memasuki bagian turbin dari bagian

pembakaran, dipercepat melalui baling-baling stator tahap pertama. Baling-baling stator terbentuk saluran konvergen yang mengubah energi panas dan tekanan gas menjadi lebih tinggi kecepatan aliran gas.



Gambar 2. 2 The 3-stage Turbine dari GE J79

Sumber :(*Components of Jet Engines*, n.d.)

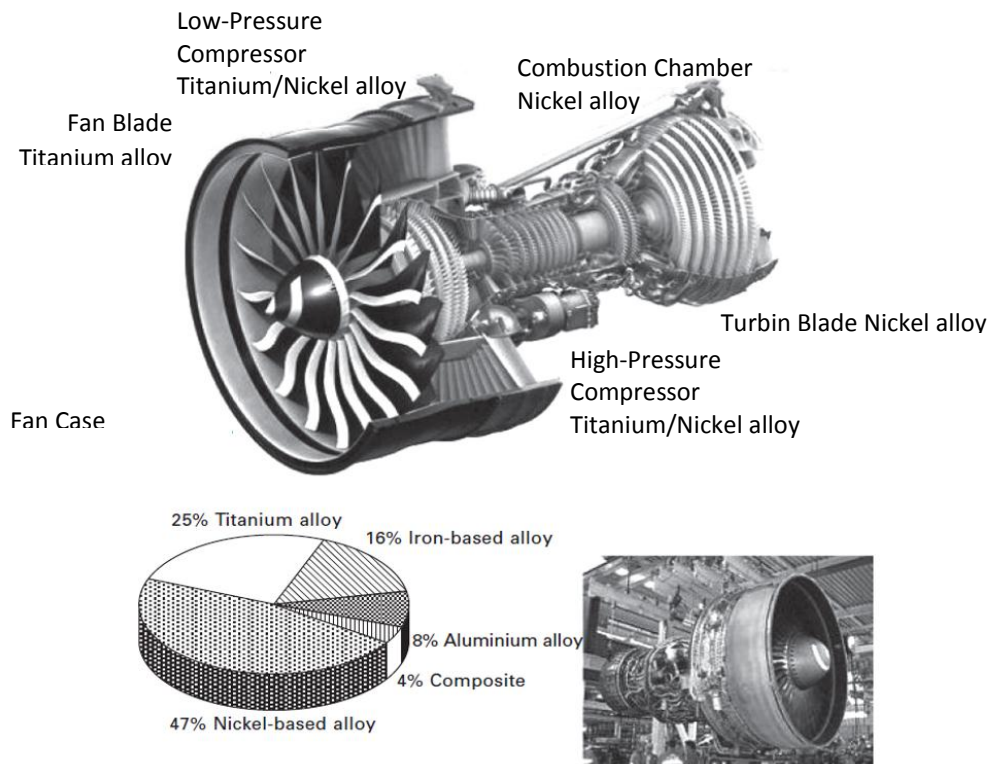
Selain mempercepat gas, baling-baling juga memutar aliran dan mengarahkannya ke bilah rotor pada sudut optimal. Ketika massa gas berkecepatan tinggi mengalir melintasi bilah turbin, energi diubah menjadi energi mekanik. Kecepatan, suhu, dan tekanan gas digunakan sepenuhnya untuk memutar turbin untuk menghasilkan tenaga poros. Bilah turbin dirancang untuk bertahan setidaknya 10.000 jam terbang, yang setara dengan 8 juta km penerbangan, pada temperatur hingga ~ 1200 °C. Pada suhu ini bilah berputar pada lebih 10.000 rpm yang menghasilkan kecepatan 1200 km/h^{-1} pada ujung bilah dan tegangan sekitar 180 MPa (atau 20 ton per inci persegi) pada bagian pangkal bawahnya. Untuk tampil di bawah kondisi ekstrim seperti itu, bahan yang digunakan dalam bagian mesin jet yang panas harus memiliki ketahanan temperatur tinggi, yang meliputi tegangan luluh tinggi dan kekuatan untuk mencegah luluh dan

kegagalan, keuletan tinggi dan ketangguhan patah untuk memberikan ketahanan benturan dan toleransi kerusakan, resistensi yang tinggi terhadap inisiasi dan pertumbuhan retak lelah untuk dapat berumur operasi yang panjang, ketahanan mulur yang tinggi, ketahanan terhadap gas korosif panas dan oksidasi, serta ekspansi termal rendah untuk mempertahankan toleransi yang dekat antara bagian rotasi (“Superalloys for Gas Turbine Engines,” 2012).

2.1.4 Superalloy Bilah Turbin

Material yang digunakan dalam komponen mesin jet salah satunya bilah turbin harus bekerja untuk jangka waktu yang lama dalam tuntutan lingkungan yang melibatkan temperatur tinggi, stres tinggi dan gas korosif panas. Banyak bahan tidak dapat bertahan dalam kondisi ekstrim pada bagian terpanas mesin, di mana suhu mencapai ~1300 °C. Superalloy yang merupakan material campuran dengan sifat lebih unggul dari alloys dengan memiliki banyak sifat yang dibutuhkan oleh bahan komponen mesin jet seperti kekuatan tinggi, umur kelelahan yang panjang, ketangguhan patah, ketahanan mulur pada suhu tinggi. Selain itu, superalloy mampu menahan korosi dan oksidasi pada suhu tinggi, yang menyebabkan kerusakan yang cepat pada banyak bahan logam lainnya. Superalloy adalah kelompok paduan nikel, besi-nikel dan kobalt yang digunakan dalam mesin turbin pesawat karena sifat tahan panasnya yang baik (“Superalloys for Gas Turbine Engines,” 2012). Superalloy dapat beroperasi pada suhu hingga 950-1300 °C untuk waktu yang lama, sehingga cocok sebagai bahan yang digunakan dalam komponen mesin jet modern. Pesawat jet akan meningkat daya dorong mesin jet adalah dengan meningkatkan temperatur operasinya (“Superalloys for Gas Turbine Engines,” 2012). Temperatur ini dibatasi oleh

ketahanan panas dari bahan mesin, yang tidak boleh mendistorsi, melunak, merayap, mengoksidasi atau menimbulkan korosi.



Gambar 2. 3 Distribusi Material pada Mesin Turbin Pesawat : General Electric (CF6) used in the Boeing 787

Sumber : ("Superalloys for Gas Turbine Engines," 2012)

Pengembangan superalloy bersama dengan kemajuan dalam teknologi mesin telah mendorong batas operasi hingga ~ 1300 °C, menghasilkan mesin untuk pesawat sipil besar dan mesin dengan daya dorong tinggi untuk pesawat tempur militer supersonik. Superalloy digunakan dalam komponen terpanas yakni salah satunya bilah turbin di mana suhu 900-1300 °C. Superalloy juga digunakan pada aplikasi turbin tekanan rendah, poros, kaleng burner, afterburner dan pendorong balik. Secara umum, superalloy berbasis nikel digunakan dalam komponen yang beroperasi di atas 550 °C. Superalloy memiliki densitas tinggi 8–9 g/cm³,

yang kira-kira dua kali lebih padat dari titanium dan tiga kali lebih padat dari aluminium (“Superalloys for Gas Turbine Engines,” 2012).

2.1.5 Material Molibdenum (Mo)

Pada tahun 1778 sampai akhir tahun 1880-an oleh Scheele seorang pekerja kasar dari suatu perusahaan logam di Perancis yang mengidentifikasi Molibdenum (Mo) sebagai element yang mempunyai ciri tersendiri dan termasuk unsur logam tahan api yang banyak diaplikasikan dalam paduan baja, besi tuang, dan paduan lainnya untuk meningkatkan kekerasan, kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan korosi. Penambahan Molibdenum kerap dilakukan ke kromium, columbium, mangan, nikel, tungsten, atau logam paduan lainnya untuk mencapai sifat metalurgi yang diinginkan utamanya dalam bentuk oksida molybdcic atau ferromolybdenum. Kesorbagunaan molibdenum ini menjadi peran penting dalam teknologi industri yang membutuhkan bahan yang dapat digunakan di bawah tekanan dan temperatur cukup tinggi, serta lingkungan dengan keadaan lebih korosif.

2.1.6 Material Silikon (Si)

Pada tahun 1824, seorang kimiawan Swedia bernama Jons Jacob Berzelius memproduksi silikon diberi nama “silicium”. Nama silikon diberikan oleh kimiawan Skotlandia bernama Thomas Tomson karena bahan ini mempunyai sifat yang lebih mendekati boron dan karbon dari pada magnesium dan kalsium. Nama Silikon kemudian menjadi umum digunakan di beberapa Negara.

Temasuk dalam kelompok IV dalam tabel periodik dengan berat atom 28.08, jari-jari atom 110 pm, konfigurasi elektron $3s^2 3p^2$, Silikon memiliki densitas 2.33 g/cm^3 , titik leleh 1414°C , dan titik didihnya adalah 3250°C . Sifat logam yang berkaitan dengan termal dan konduktivitas listrik dimiliki silikon dalam bentuk cair, namun dalam keadaan padat silikon merupakan semikonduktor. Berbagai aplikasi seperti dalam pembuatan

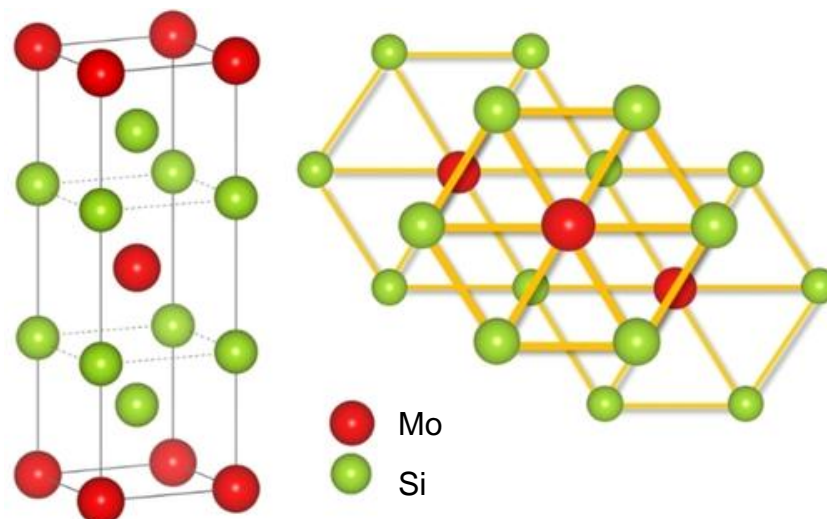
baja, sebagai elemen paduan aluminium untuk meningkatkan sifat mekanik aluminium merupakan bentuk aplikasi dari pemanfaatan Silikon dan ferrosilicon (Gasik, 2013).

2.1.7 Material Aluminium (Al)

Material aluminium (Al) diketahui memiliki densitas material yang rendah yakni 2.70 g/cm^3 dengan kekuatan mekanik dan ketahanan korosi yang cukup tinggi. Namun koefisien ekspansi termal dan karakteristik tribologi yang dimiliki aluminium tidak cukup memadai. Kekakuan dan ketangguhan yang lebih tinggi serta peningkatan karakteristik tribologi dapat diperoleh dengan menambahkan bahan untuk memperkuat dan meningkatkan kemampuan. Keuntungan utama paduan aluminium dibandingkan dengan bahan baja konvensional untuk produksi suku cadang dan rakitan pada komponen suatu alat transportasi adalah daya kendaraan yang lebih tinggi diperoleh dengan massa kendaraan yang lebih rendah, kekakuan yang ditingkatkan, kepadatan (berat) yang berkurang, sifat yang ditingkatkan pada suhu tinggi, koefisien ekspansi termal terkontrol, kinerja listrik yang ditingkatkan dan disesuaikan, ketahanan aus yang ditingkatkan dan redaman kebisingan yang lebih baik. Pada aplikasi temperatur tinggi, Aluminium dapat menjadi sumber untuk pembentukan protektif alumina (Al_2O_3) yang dapat berperan menghambat laju difusi oksigen ke dalam permukaan sampel.

2.1.8 Material Molibdenum Disilicida (MoSi_2)

Molibdenum Disilicida (MoSi_2) merupakan salah satu jenis senyawa molibdenum silikon dengan sifat yang serupa dengan logam dan keramik dikarenakan keduanya memiliki jari-jari atom yang mirip, dan nilai elektronegativitas yang saling mendekati. Memiliki titik leleh hingga 2030°C serta bersifat listrik konduktivitas (Cemal et al., 2012). MoSi_2 adalah material yang dapat mencegah proses oksidasi lebih lanjut karena memiliki lapisan pasif silikon dioksida yang dapat dibentuk di permukaan pada suhu tinggi. MoSi_2 memiliki penampilan berwarna logam abu-abu dengan struktur kristal tipe kuadrat dan ada juga yang dengan struktur kristal termodifikasi heksagonal namun tidak stabil.



Gambar 2. 4 Sel Satuan MoSi_2 (kiri) dan Susunan Lapisan Pseudo-Heksagonal (kanan)

Sumber : (Milosavljević et al., 2021)

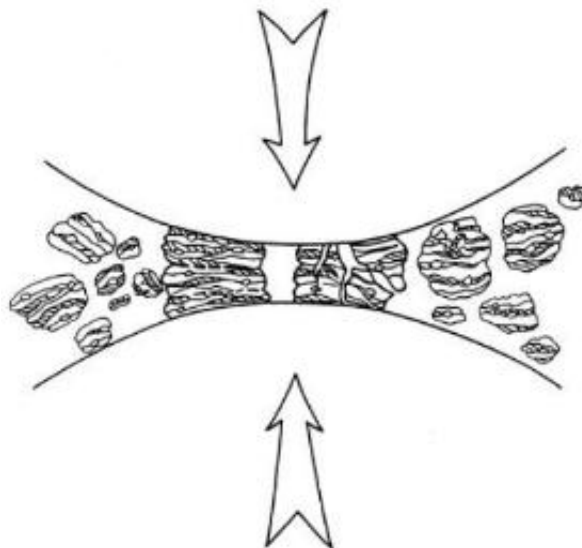
Memiliki kandungan silikon yang paling tinggi dalam sistem paduan biner Mo – Si membuat MoSi_2 merupakan kategori yang disebut mesofasa yakni jenis bahan bersuhu tinggi dengan kinerja yang prima. MoSi_2 memiliki tahanan oksidasi suhu tinggi yang baik, yakni tahan oksidasi hingga suhu 1600°C . Karakteristik lain yang dimiliki MoSi_2 meliputi memiliki kepadatan sedang yakni 6.31g/cm^3 , koefisien muai panas yang relatif rendah pada nilai $8.1 \times 10^{-6} \text{K}^{-1}$, konduktivitas listrik yang baik, serta suhu transisi ulet rapuh tinggi yakni pada 1000°C (Zhang et al., 2013).

Atas dasar sifat dan karakteristik yang dimiliki tersebutlah, MoSi_2 banyak diterapkan pada bidang bahan pelapis anti-oksidasi suhu tinggi, elemen pemanas listrik, film elektroda terintegrasi, bahan struktural, penguat bahan komposit, bahan tahan aus serta aplikasi lainnya yang meliputi industri kimia energi, industri mikroelektronika, dan industri kedirgantaraan. Kerapuhan yang besar pada suhu kamar adalah keterbatasan sifat mekanik yang dimiliki oleh material MoSi_2 . Dalam menyikapi keterbatasan sifat mekanik suatu senyawa dapat diperbaiki melalui paduan dengan unsur yang lain. Hal serupa juga berlaku pada molibdenum disilikat yang kemudian memiliki kestabilan kimiawi dan kapasitas yang baik dengan hampir semua unsur penguat keramik, meliputi Al, Ti, Zr, W dan sebagainya.

2.1.9 Mechanical Alloying (MA)

Mechanical alloying (MA) adalah metode metalurgi serbuk dengan melibatkan dua serbuk penyusun komposit atau lebih dengan distribusi ukuran yang heterogen dan akan mempengaruhi sifat material serta mekanisme pembentukan suatu material. Proses tersebut menghasilkan perubahan ukuran butir dan ukuran kristal sehingga homogenitas material menjadi lebih baik dan mengurangi terjadinya porositas. *Mechanical Alloying* dapat digunakan untuk mensintesis larutan padatan, nano partikel, paduan amorf, intermetalik dan komposisi kimia (Suryanarayana, 2001). *Mechanical Alloying* atau *Mechanical Milling* memiliki tujuan mendapatkan campuran homogen serta memperoleh partikel campuran dengan ukuran yang lebih kecil.

Dalam prosesnya serbuk akan dicampur dalam suatu wadah (*milling jar*) dan dikenai energi tinggi terjadi deformasi yang berulang – ulang sehingga terjadi partikel – partikel yang lebih kecil dari sebelumnya. Efek dari tumbukkan pada tiap tipe dari unsur partikel serbuk akan menghasilkan bentuk yang berbeda juga, untuk bahan yang ulet, sebelum terjadi serpihan akan menjadi flat atau pipih terlebih dahulu, sedangkan untuk bahan yang getas akan langsung terjadi fracture dan menjadi partikel serbuk yang lebih kecil (Suryanarayana, 2001). Saat dua bola bertumbukan ada serbuk dalam jumlah kecil yang terjebak di antara kedua bola tersebut, dan hal tersebut terjadi berulang ulang seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Mekanisme Terjadinya Tumbukan

Sumber : (Suryanarayana, 2001).

2.1.10 Spark Plasma Sintering (SPS)

Merupakan salah satu metode atau teknik fabrikasi sampel serbuk dengan tahap yang mudah dan terbukti efektif. *Sintering* sendiri merupakan proses dimana suatu sampel serbuk diberi perlakuan dengan variasi temperatur tinggi guna mendapatkan sampel dalam bentuk padatan (U.S Geological Survey, 2019). Sistem sintering pertama kali dikembangkan oleh seorang ilmuwan Inggris bernama Arthur G. Bloxam, pada tahun 1906

untuk pembuatan filamen lampu pijar listrik dari paduan tungsten dan molibdenum. Setelah itu berbagai penemuan terkait teknologi sintering terus berkembang sebagaimana tersaji pada Tabel 2. 1.

Tabel 2.1. Penemuan Teknologi Spark Plasma Sintering dan Teknologi Sintering Canggih Lainnya

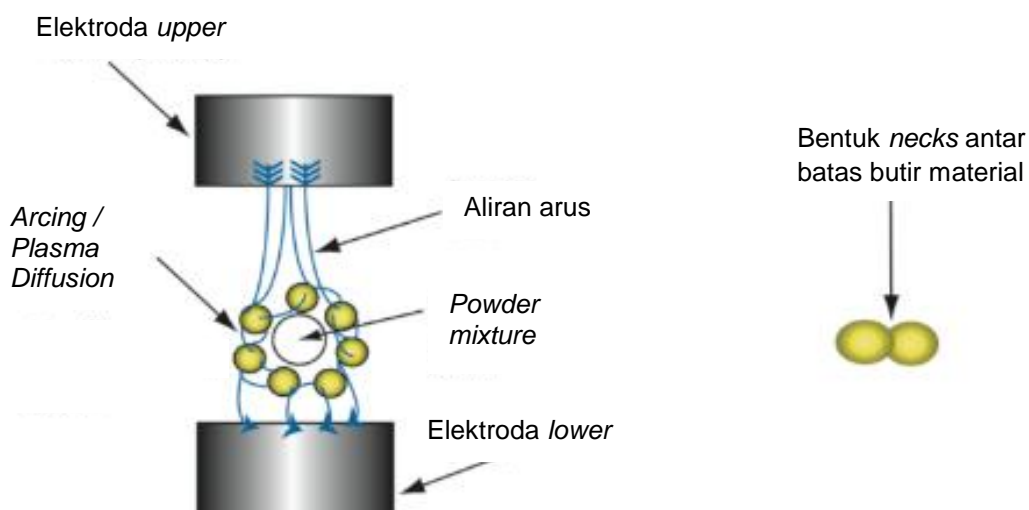
(Sumber : Diolah Penulis, 2021)

Periode	Penemu/Organisasi	Keterangan
1906	Arthur G. Bloxam (Britania Raya)	Memperkenalkan sistem sintering resistan DC pertama untuk pembuatan filamen lampu
1912	George Weintraub dan Harold Rush (Lynn, Mass)	Mengembangkan proses dengan cara sintering bahan tahan api dengan memberikan tekanan dan menggunakan arus listrik
1922	Alexander Duval d'Adrian (Washington Pa)	Proses sintering dengan bantuan arus yang digunakan untuk pembuatan bagian-bagian dari bahan tahan api
1930	George F. Taylor/General Electric Co. (Niskayuna, NY)	Mengembangkan peralatan untuk penekanan panas tungsten karbida/kobalt
1962	Kiyoshi Inoue (Tokyo, Jepang)	Memperkenalkan proses dua langkah di mana tekanan meningkat setelah pelepasan percikan untuk mencapai densifikasi partikel logam hingga 99% dari teori

Pertengahan 1960-an	W.R. Tinga dan AG Voss/Universitas Alberta (Edmonton, Kanada)	Melakukan studi eksperimental pertama pada pemrosesan keramik <i>microwave</i>
Pertengahan 1970-an	-	Terjadi krisis minyak, sebagai alternatif untuk sintering konvensional, mulai diperkenalkan sintering dengan menggunakan gelombang mikro
1980-an	-	Sistem R&D SPS kecil menjadi tersedia
1990	Sumitomo Heavy Industries (Tokyo, Jepang)	Memperkenalkan sistem industri SPS yang pertama
1990-an	-	Sintering plasma busi dan teknologi sintering yang mulai tinggi penggunaannya untuk aplikasi industri
2010	Marco Cologna et al./Universitas Colorado (Boulder, Colo)	Mengembangkan proses sintering ultrafast untuk oksida keramik

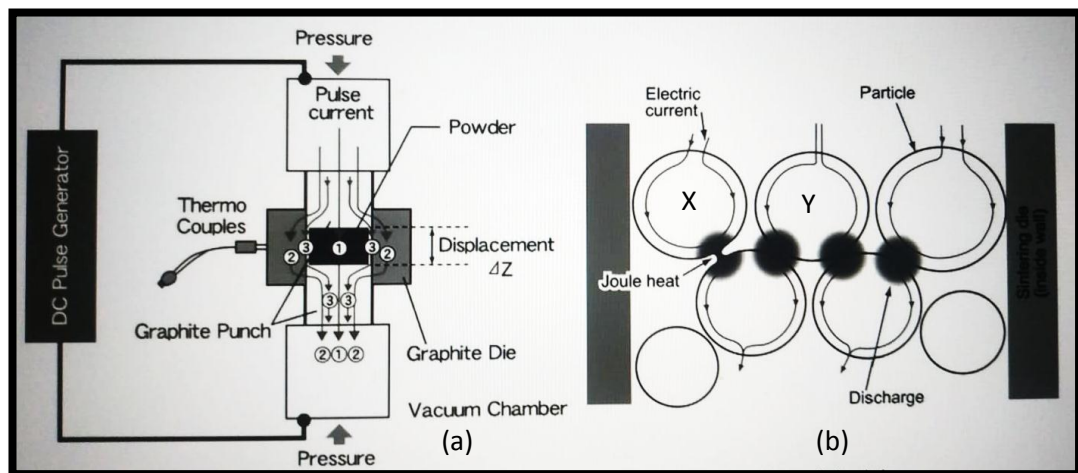
Pemilihan material yang digunakan dalam proses SPS ini memiliki jangkauan yang luas dan sangat beragam, terkait dengan waktu yang dibutuhkan untuk melakukan proses tersebut (kecepatan sintering). Material logam, keramik, polimer, komposit, dan semi konduktor adalah yang termasuk jenis-jenis material yang dimungkinkan untuk dilakukan sintesis melalui proses SPS ini.

Proses SPS diawali dengan melakukan pengaturan dasar yakni dengan diawali sampel yang berupa campuran bubuk (*powder mixture*) yang telah berada di dalam cetakan, untuk diletakkan ke dalam ruang (*chamber*) alat SPS. Pada tahap peletakan ini memerlukan pengaturan terlebih dahulu agar sampel berada tepat di tengah antara elektroda *upper* dan *lower*. Elektroda akan memberikan tekanan terhadap sampel serbuk dengan bantuan tekanan *Direct Current* (DC) dari sistem SPS yang telah diatur dan di kontrol sebelumnya. Tingkat vakum dalam ruang (*chamber*), sistem pendingin alat, dan temperatur adalah hal-hal yang juga diatur dalam sistem alat kontrol SPS ini. Kelebihan dari proses SPS ini adalah dapat memberikan temperatur hingga 2500°C dalam waktu yang cukup singkat.



Gambar 2. 6 Prinsip Kerja Spark Plasma Sintering (SPS)

(Sumber : O'Brien, R.C, 2010)



Gambar 2. 7 Mekanisme Proses SPS

(Sumber : Tokita, 2013)

Proses SPS didasarkan pada fenomena percikan listrik dimana tegangan rendah, energi tinggi dan temperatur tinggi dari arus pulsa listrik akan menghasilkan percikan plasma, dan diantara partikel-partikel tersebut menghasilkan temperatur yang optimum dan difusi elektrolit. Rentang waktu yang sebelumnya dikatakan singkat adalah pada kisaran 5 hingga 20 menit, dimana seluruh prosesnya berlangsung secara keseluruhan, meliputi proses penguapan, peleburan dan sintering, termasuk pula proses kenaikan temperatur dan waktu penahanan. Proses SPS dengan pulsa energi tinggi akan memberikan pergerakan-pergerakan antar batas butir sehingga batas butir akan mengalami perubahan signifikan dibandingkan dengan teknik konvensional *hot-press* dan *hot isostatic press* sintering. Pergerakan-pergerakan batas butir ini terlihat pada Gambar 2.6 dimana pergerakan ini membentuk “necks” antara dua partikel selama di lakukan proses sintering.

Mulai terbentuknya “necks” antara partikel X dan Y yang disebabkan oleh proses penguapan dan peleburan ditunjukkan pada Gambar 2.7. bagian (b). Selanjutnya angka 2 pada Gambar 2.7. bagian (a) menunjukkan proses difusi volume dimana volume partikel akan menyusut ketika udara di dalam

chamber dalam keadaan vakum. Setelah partikel mengalami penyusutan volume, dua partikel tersebut berdifusi pada batas “necks” hingga kemudian menyatu. Pembentukan “necks” merupakan akibat dari penguapan dan peleburan, proses pembentukan ini terjadi di sekitar daerah terdekat antara kedua partikel selama proses sintering. “Necks” akan berkembang secara bertahap kemudian bertransformasi menjadi padat dengan kerapatan massa hingga 99%. Hasil kerapatan yang mendekati sempurna inilah yang menjadikan proses SPS merupakan salah satu proses manufaktur yang unggul dibandingkan dengan teknik konvensional lainnya.

2.1.11 Archimedes Density

Prinsip Archimedes menyatakan bahwa sebuah benda akan mengapung di dalam fluida jika massa jenis suatu benda lebih kecil daripada massa jenis zat cair. Dalam hukum Archimedes, ketika sebuah benda tercelup seluruhnya atau sebagian di dalam zat cair, zat cair akan memberikan gaya ke atas (gaya apung) pada benda. Besar gaya ke atas (gaya apung) sama dengan berat zat cair yang dipindahkan. Prinsip Archimedes menyebutkan bahwa sebuah benda akan mengapung jika kerapatan benda lebih kecil daripada kerapatan fluida maka gaya apung lebih besar daripada berat benda dan benda akan dipercepat ke atas permukaan fluida kecuali apabila benda tersebut ditahan (Tripler, 1991)

Gaya apung yang terjadi pada benda adalah selisih gaya yang bekerja pada benda apabila dicelupkan atau berada dalam fluida. Adapun persamaan yang diperoleh dari hukum Archimedes sebagai berikut :

$$FA = \rho_f \cdot V \cdot g \quad (1)$$

Dimana :

FA = gaya tekan ke atas Archimedes (N)

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

$V = \text{Volume benda (m}^3\text{)}$

$g = \text{percepatan gravitasi (m/s}^2\text{)}$

Gaya tekan ke atas : $FA = \rho_a V g$ (2)

Berat benda di udara $w = mg = \rho_b V g$ (3)

Berat benda di air $w' = m' g$ (4)

Gaya tekan ke atas : $FA = w - w'$

$$\rho_b V g = w - w'$$

$$\rho_a \frac{m}{\rho_b} = m - m'$$

$$\rho_b = \frac{m}{m - m'} \rho_a \quad (5)$$

(massa jenis benda padat yang dicari)

dengan keterangan :

$m = \text{massa benda di udara}$

$m' = \text{massa benda di air}$

$\rho_a = \text{massa jenis air}$

$\rho_b = \text{massa jenis benda}$

2.1.12 Vickers Hardness

Kekerasan vickers merupakan suatu uji kekerasan dengan menggunakan penumbuk piramida intan yang dasarnya berbentuk bujur sangkar. Besarnya sudut antara permukaan-permukaan piramida yang saling berhadapan adalah 136° . Dengan bentuk penumbuk piramida yang kemudian menyebut uji kekerasan ini dengan lebih dikenal sebagai uji kekerasan piramida intan. Angka kekerasan vickers (VHN) diartikan sebagai beban dibagi luas permukaan lekukan.

Pada prakteknya luas ini dihitung dari pengukuran mikroskopik panjang diagonal jejak. VHN dapat ditentukan dari persamaan berikut :

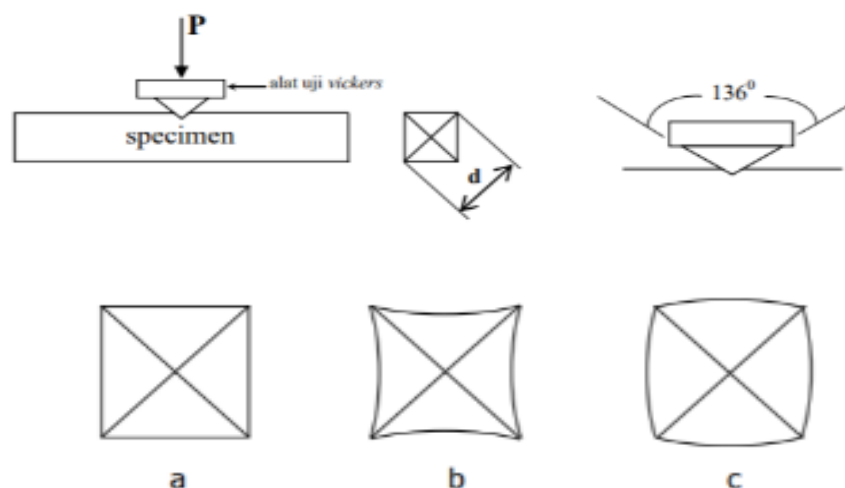
$$VHN = \frac{2P \sin(\theta/2)}{L^2} = \frac{1.854P}{L^2} \quad (6)$$

Dimana P = beban yang diterapkan, kg

L = panjang diagonal rata-rata, mm

θ = sudut antara permukaan intan yang berlawanan = 136°

Dalam pengujian vickers beban yang biasa diuji pada kisaran beban 1kg sampai 120 kg. Jejak yang dibuat dengan penekan piramida serupa secara geometris, dimana lekukan yang benar yang dibuat oleh penekan piramida intan harus berbentuk bujur sangkar. Namun lekukan beban dapat berbentuk bantal jarum atau tong, dimana disebabkan dari sifat mekanik logam yang akan diuji.



Gambar 2. 8 Alat Uji Vickers dan Tipe Lekukan Piramid Intan (a) Lekukan Sempurna, (b) Lekukan Bantal Jarum, (c) Lekukan Berbentuk Tong

(Sumber : (Dieter, 1987))

Lekukan bantal jarum umumnya diakibatkan terjadi dari penurunan logam di sekitar permukaan piramida yang datar. Hal tersebut umumnya terjadi pada logam-logam yang dilunakkan dan mengakibatkan pengukuran panjang diagonal yang berlebihan. Sedangkan untuk lekukan berbentuk tong diakibatkan oleh adanya penimbunan ke atas logam-logam di sekitar permukaan penekan terdapat pada logam-logam yang mengalami proses pendinginan.

2.1.13 XRD (X-Ray Diffraction)

XDR yang dikenal dengan istilah difraksi sinar-X adalah suatu teknik yang digunakan untuk dapat menentukan sistem kristal, geometri kristal, kualitas kristal, parameter kristal yang terdiri atas parameter kisi, jarak antar atom, jumlah atom per unit sel, identifikasi fasa yang terbentuk dan analisis kimia. Prinsip kerjanya adalah disaat sinar-X monokromatik jatuh pada sebuah kristal kemudian sinar-X ini akan dihamburkan ke segala arah, adanya keteraturan letak atom-atom dalam kristal maka pada arah tertentu saja gelombang hambur akan berinterferensi konstruktif dan pada arah lainnya akan berinterferensi destruktif (*Fundamentals of Powder Diffraction and Structural Characterization of Materials*, 2009).

Unsur yang membentuk bidang datar yang mempunyai jarak karakteristik antara bidang inilah yang kemudian dipandang sebagai atom-atom dalam kristal. Dengan memiliki beda jarak lintasan tepat $n\lambda$, dimana selisih jarak antara 2 berkas sejajar adalah $2d \sin \theta$, dan memenuhi persamaan Bragg adalah merupakan syarat yang diperlukan agar berkas yang sejajar ketika dihamburkan atom-atom kristal akan berinterferensi konstruktif.

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (7)$$

Keterangan :

λ = Panjang gelombang sinar-X (Å)

d = Jarak antar kisi (\AA)

θ = Sudut difraksi ($^{\circ}$)

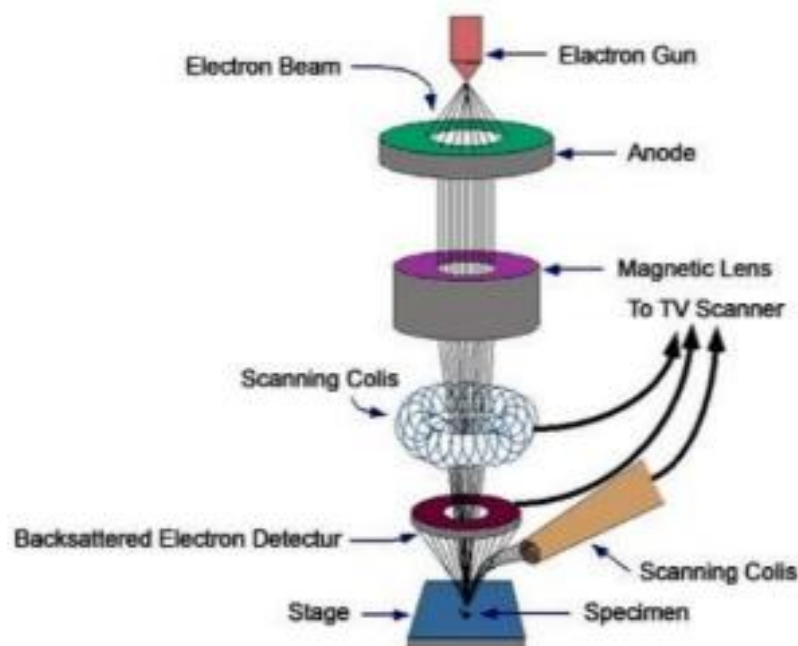
n = 1,2,3, dst. (orde difraksi)

Dalam analisis XRD sampel yang dilakukan uji dapat berupa serbuk, padatan, lapisan tipis, atau berbentuk pita. Dengan jumlah yang besar (gram) akan didapatkan keakuratan yang lebih baik, namun jumlah minimum sampel yang diperlukan cukup hanya beberapa miligram saja sudah dapat memenuhi untuk dilakukan tahapan analisis. XRD merupakan metode yang bersifat non destruktif dimana sampel tidak mengalami kerusakan pada saat dianalisis, sehingga dapat dilakukan analisis lanjutan.

Difraktogram merupakan hasil dari analisis XRD yang berupa susunan garis atau puncak dengan intensitas dan pola posisi yang berbeda serta spesifik sesuai material yang dianalisis. Adanya susunan difraktogram yang berkarakteristik pada tiap fase kristalin sehingga kemudian dapat digunakan sebagai sidik jari untuk uji identifikasi. Penentuan kesesuaian struktur kristal yang terbentuk dilakukan dengan mencocokkan setiap puncak yang muncul pada difraktogram pada nilai sudut 2θ dan d tertentu hasil analisis dengan data dari JCPDS (*Joint Committee Powder Diffraction Standar*) sehingga didapatkan informasi orientasi bidang kristal yang terbentuk. Struktur kristal terdapat kesesuaian dapat dipastikan jika semua orientasi bidang kristal telah teridentifikasi.

2.1.14 SEM-EDS dan FESEM-EDS

Scanning electron microscope (SEM) merupakan jenis mikroskop elektron yang menggunakan berkas elektron untuk menggambarkan bentuk permukaan dari sampel yang dianalisis. Dibandingkan dengan optical microscope (OM), SEM memiliki resolusi yang lebih tinggi. Resolusi OM diketahui hanya 200 nm, sedangkan SEM dapat menghasilkan resolusi mencapai 0.1 – 0.2 nm dikarenakan SEM menggunakan panjang gelombang de Broglie yang memiliki elektron lebih pendek daripada gelombang OM (Pereira-da-Silva & Ferri, n.d.). Semakin kecil nilai panjang gelombang yang digunakan maka semakin tinggi resolusi dari mikroskop tersebut.



Gambar 2. 9 Prinsip Kerja SEM

(Sumber : (Schweitzer, 2014))

SEM memiliki prinsip kerja dengan menggambarkan permukaan benda atau material dengan berkas elektron yang dipantulkan dengan energi tinggi. Permukaan material yang disinari atau terkena berkas elektron akan memantulkan kembali berkas elektron atau dinamakan

berkas elektron sekunder ke segala arah. Dari semua berkas elektron yang dipantulkan terdapat satu berkas elektron berintensitas tertinggi yang dipantulkan oleh sampel yang akan dianalisis.

Diawali dengan sebuah pistol elektron memproduksi sinar elektron dan dipercepat dengan anoda. Kemudian sampel menjadi sasaran objek utama yang menjadi fokus lensa magnetik. Sinar elektron yang terfokus melakukan pemindaian keseluruhan sampel dengan diarahkan oleh koil pemindai. Pada saat elektron mengenai tepat pada sampel, selanjutnya sampel akan mengeluarkan elektron baru yang akan diterima oleh detektor dan kemudian dikirim ke monitor. Penembakan berkas elektron yang berintensitas tinggi pada permukaan sampel merupakan prinsip dasar pengamatan sampel, setelah itu dilakukan pemindaian keseluruhan permukaan material pengamatan. Pilihan melakukan perbesaran lebih detail (*zoom in*) dan perbesaran lebih umum (*zoom out*) dapat dilakukan untuk melakukan pengamatan yang lebih menyeluruh atas keterbatasam bidang tempat sampel yang diamati. Berkas pantulan dari benda tersebut yang kemudian digunakan sebagai informasi lebih lanjut dalam proses pengolahan citra yang terdapat di komputer.

Pantulan inelastis yang ada pada SEM kemudian memberikan sinyal elektron sekunder dan karakteristik sinar-X, sedangkan untuk sinyal *backscattered electron* didapatkan dari pantulan elastis. Terdapat perbedaan tampilan gambar yang berasal dari sinyal elektron sekunder dan dari sinyal *backscattered*, meliputi :

- Elektron sekunder menghasilkan topografi dari benda yang dianalisa
- Permukaan yang tinggi berwarna lebih cerah dari permukaan rendah
- Memberikan perbedaan berat molekul dari atom-atom yang menyusun permukaan, atom dengan berat molekul tinggi akan berwarna lebih cerah daripada atom dengan berat molekul rendah.

Energy dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) merupakan salah satu teknik analisis untuk menganalisis unsur atau karakteristik kimia dari spesimen. Kemampuan karakteristik ini memiliki prinsip dasar yang menyatakan bahwa setiap elemen memiliki struktur atom yang unik dan berciri khas dari struktur atom suatu unsur. Keadaan tersebutlah yang memungkinkan sinar-X untuk dapat melakukan identifikasi atas dasar interaksi beberapa eksitasi sinar-X dengan spesimen (Nasrazadani, Hassani, 2016) .

Sinar energi tinggi yang bermuatan partikel seperti elektron atau proton atau berkas sinar-X difokuskan kepada spesimen yang akan diteliti untuk merangsang emisi karakteristik sinar-X dari sebuah spesimen. Atom dalam spesimen yang mengandung elektron dasar pada masing-masing tingkat energi atau kulit elektron akan terikat pada inti dan menghasilkan sinar. Sinar inilah yang dapat mengeksitasi elektron di kulit dalam dan mengeluarkannya dari kulit hingga menimbulkan lubang elektron di mana elektron itu berada sebelumnya. Kemudian sebuah elektron dari luar kulit dengan energi lebih tinggi akan mengisi lubang, dan perbedaan energi antar kulit yang berenergi lebih tinggi dengan kulit yang berenergi lebih rendah dapat dirilis dalam bentuk sinar-X. Adapun jumlah dan energi dari sinar-X yang dipancarkan dari spesimen dapat diukur oleh spektrometer energi-dispersif. Energi dari sinar-X yang dihasilkan merupakan karakteristik dari perbedaan energi antara dua kulit, dan juga karakteristik struktur atom dari unsur yang terpencar, sehingga memungkinkan komposisi unsur dari spesimen dapat dilakukan pengukuran.

Adalah FESEM-EDS yang merupakan kepanjangan dari *Filed Emmission Scanning Electron Microscope* yang merupakan mikroskop yang bekerja dengan elektron (partikel dengan muatan negatif) bukan cahaya. FESEM-EDS dipergunakan untuk mendapat rincian topografi yang sangat kecil di permukaan atau seluruh objek dari benda. Pertama kali dikembangkan pada tahun 1938 oleh Manfred von Ardenne (ilmuwan Jerman) dengan konsep dasar yang disampaikan oleh penemu Max Knoll

yang merupakan penemu TEM (*Transmission Electron Microscopy*) pada tahun 1935.

Prinsip kerja FESEM-EDS adalah berdasarkan scan sinar elektron pada permukaan sampel, dimana selanjutnya informasi yang didapatkan tersebut diubah menjadi gambar. Terbentuknya gambar pada FESEM-EDS adalah berbeda dengan yang terjadi pada mikroskop optik dan TEM. FESEM-EDS merekonstruksi gambar berdasarkan deteksi elektron baru (elektron sekunder) atau elektron pantul yang muncul dari permukaan sampel saat permukaan sampel dilakukan proses scan dengan sinar elektron. Elektron pantul yang disebut sebagai elektron sekunder yang terdeteksi selanjutnya diperkuat sinyalnya lalu kekuatan amplitudonya ditampilkan dalam gradasi gelap-terang pada layar monitor CRT (*cathode ray tube*). Pada monitor CRT kemudian ditampilkan gambar struktur obyek yang sudah diperbesar. Proses bekerjanya pada FESEM-EDS ini tidak memerlukan sampel yang ditipiskan, sehingga untuk melihat onyek dari sudut pandang 3 dimensi adalah sangat dimungkinkan (Saikiran, H. Dar, Kuladeep, Jyothi Narayana Rao, 2019).

FESEM-EDS memiliki resolusi yang tinggi dan sangat kompatibel untuk mengamati obyek benda hingga berukuran nano meter. Resolusi tinggi tersebut didapatkan dengan scan dalam arah horizontal, resolusi yang tidak cukup tinggi didapatkan bila proses scan dilakukan secara vertikal (tinggi rendahnya struktur). Dalam suatu pengujian FESEM-EDS sebelumnya dilakukan preparasi sampel. Adapun preparasi sampel dilakukan dengan memberikan coating emas agar sampel menjadi lebih konduktif sehingga dapat memantulkan kembali elektron yang dipancarkan alat uji ke dektektor dengan lebih baik.

2.1.14 Oksidasi Temperatur Tinggi

Suatu proses korosi yang terjadi melalui reaksi kimia secara murni yang terjadi tanpa adanya elektrolit atau dapat dikatakan tanpa melibatkan air dengan segala bentuknya adalah yang dimaksud dengan korosi kimia atau korosi kering atau korosi temperatur tinggi. Logam dalam oksigen, nitrogen dan sulfida merupakan bagian yang kerap dilibatkan dalam suatu proses korosi kimia pada temperatur tinggi atau dalam keadaan kering. Tahapan oksidasi diawali dengan absorpsi oksigen, kemudian reaksi kimia untuk membentuk permukaan oksida, nukleasi oksida dan pertumbuhan lapisan untuk membentuk proteksi. Kondisi homogen, berdaya lekat tinggi, tidak terdapat kerusakan baik secara mikro dan makro seperti retakan atau terkelupas merupakan persyaratan dari lapisan yang berfungsi sebagai lapisan proteksi (*High Temperature Corrosion*, 2021).

Penebalan lapisan oksida yang umum terjadi pada permukaan metal. Terdapat beberapa mekanisme yang mungkin terjadi dalam suatu proses penebalan lapisan oksida :

- a. Jika lapisan oksida yang pertama terbentuk adalah berpori, maka molekul oksigen bisa masuk melalui pori-pori tersebut dan kemudian bereaksi dengan metal di perbatasan metal dan oksida. Lapisan oksida bertambah tebal dan bersifat non-protektif, tidak memberikan perlindungan pada metal yang dilapisinya terhadap proses oksidasi lebih lanjut
- b. Jika lapisan oksida tidak berpori, ion metal bisa berdifusi menembus lapisan oksida menuju bidang batas oksida-udara, dan di perbatasan oksida-udara ini metal bereaksi dengan oksigen dan menambah tebal lapisan oksida yang telah ada. Proses berlanjut di permukaan. Dalam hal ini elektron dalam reaksi ini bisa terjadi.
- c. Mekanisme lain yang mungkin terjadi adalah gabungan antara (a) dan (b) dimana ion metal dan elektron bergerak ke arah luar sedang ion oksigen bergerak ke arah dalam. Reaksi oksidasi biasa terjadi di dalam lapisan oksida.

Pada logam yang bereaksi dengan oksigen atau gas lainnya pada temperatur tinggi akan mengalami reaksi kimia. Hukum kinetika parabola, linier dan logaritmik menggambarkan tingkat oksidasi untuk logam umum dan logam paduan. Oksigen yang bereaksi untuk membentuk oksida pada permukaan logam kemudian diukur dengan penambahan berat. Penambahan berat pada setiap waktu (t) selama oksidasi sebanding dengan ketebalan oksida (x). Oksida berkembang terhadap waktu mengikuti hukum parabola ($x^2 \propto t$) untuk hampir semua logam. Hal tersebut terjadi pada temperatur intermediet dan merupakan proses aktivasi-termal dan ion-ion melalui lapisan oksida dengan gerakan termal dan kecepatannya bermigrasi bergantung pada jenis cacat struktur dalam kisi oksida. Lapisan oksida seringkali mengalami tegangan baik tekan maupun tarik yang besar. Keadaan retak dan lepas juga merupakan efek pengelupasan yang terjadi pada lapisan oksida pelindung. Pengelupasan berulang yang terjadi pada skala kecil menghalangi pertumbuhan parabolik yang lebih luas dan oksida memiliki laju linier yang cepat.

Hukum laju logaritmik terjadi pada temperatur yang rendah dan pada lapisan oksida yang tipis. Atom oksigen yang berada pada luar permukaan akan berubah menjadi ion negatif dengan menangkap elektron dari logam yang terletak di bawah lapisan tipis sehingga terjadi gaya tarik elektrostatik pada ion positif di dalam logam. Apabila ketebalan oksida pada kisaran $<10\text{nm}$, maka lapisan ini kemudian membentuk medan listrik yang sangat besar yang menarik ion yang berdifusi melalui lapisan dan mempercepat proses oksidasi. Kekuatan medan akan berkurang sebab jarak antara ion positif dan ion negatif bertambah seiring dengan bertambahnya tebalnya lapisan.

Hukum parabolik terjadi umumnya apabila terjadi penambahan tebal kerak dimana resultan tegangan yang terjadi pada antarmuka bertambah dan akhirnya lapisan oksida mengalami kegagalan perpatahan sejajar dengan antarmuka. Keadaan ini kemudian dikenali dengan istilah

perpatahan geser atau perpatahan tarik melalui lapisan. Laju Oksidasi meningkat seiring dengan terjadinya peningkatan tegangan yang kemudian berkurang lagi akibat perpatahan lokal pada kerak oksida. Apabila pada waktu bersamaan terjadi proses perpatahan kerak meliputi seluruh permukaan spesimen maka laju oksidasi yang bersifat parabolik berubah menjadi rata dan laju oksidasi mengikuti hukum linier.

Kondisi dimana oksida yang terbentuk dalam volume kecil sehingga menyebabkan tidak mampu menghalangi difusi oksigen ke logam yang kemudian disebut sebagai hukum pertumbuhan linier. Pertumbuhan linier ini yang kerap dialami oleh logam pada temperatur tinggi dan biasa terjadi karena reaksi pada permukaan atau batas fasa. Pada beberapa logam alkali atau logam tanah alkali, hukum laju linier biasanya terjadi ketika adanya crack lapisan protektif atau terjadi pengelupasan yang menyebabkan timbulnya akses langsung gas ke logam, sehingga menghasilkan laju oksidasi yang sangat cepat.

2.2 Hasil Penelitian Terdahulu

Terdapat beberapa hasil penelitian terdahulu yang menjadi acuan disajikan secara ringkas terkait hasil penelitian, persamaan dan perbedaan dengan penelitian yang dilakukan ini. Kontribusi terhadap perkembangan ilmu pengetahuan pada masa yang akan datang kiranya menjadi harapan dari penelitian ini. Disampaikan ringkasan penelitian-penelitian terdahulu sebagai berikut :

- a. L. R. Kanyane, N. Malatji, A. P. I. Popoola, O. S. I. Fayomi (2019) dalam penelitian Synthesis of Equi Atomic Ti–Al–Mo–Si–Ni High Entropy Alloy via Spark Plasma Sintering Technique : Evolution of Microstructure, Wear, Corrosion and Oxidation Behaviour, berhasil mengkonsolidasikan Ti–Al–Mo–Si–Ni High Entropy Alloy dengan menggunakan metode *Spark Plasma Sintering* dalam eksperimen yang meliputi persiapan sampel dan uji laboratorium. Hasil yang diperoleh adalah pengaruh suhu sintering pada

densifikasi, kekerasan mikro, korosi, keausan dan oksidasi serta kepadatan relatif dan kekerasan mikro pada 612 HV yakni maksimum pada 98.88%, dimana masing-masing dicapai pada suhu sintering 1000°C. Persamaan dengan penelitian ini adalah objek yang diteliti yakni material Mo, Si dan Al serta teknik *Spark Plasma Sintering* yang digunakan. Sedangkan perbedaan dengan penelitian ini adanya unsur lain yakni Ti dan Ni dalam uji laboratorium yang dilakukan dalam penelitian.

b. John H. Perepezko (2014) dalam penelitiannya terkait bahan kandidat yang dapat bertahan dalam peningkatan suhu operasi mesin dan memberikan peningkatan kinerja serta efisiensi. Hasil dari penelitian ini menyebutkan bahwa bahan kandidat yang dimaksud meliputi Molibdenum (Mo) dan Niobium (Nb) serta paduan dengan Silikon (Si) dan elemen lainnya diantaranya Aluminium (Al) dan Titanium (Ti) yang terbukti dapat menghasilkan fasa yang memperkuat menjadi super paduan. Mo/Nb yang dipadukan dengan Al dan Si dapat mengandalkan Alumina (Al_2O_3) dan kemudian pada bagian atasnya akan ada lapisan silika (SiO_2) yang akan tumbuh lebih banyak secara perlahan memberikan ketahanan oksidasi. Dalam penelitian ini juga menyatakan bahwa setelah periode sementara ketika terjadi penguapan MoO_3 adalah memperkaya lapisan B dan Si sehingga semakin tahan terhadap oksidasi temperatur tinggi. Persamaan dengan penelitian ini adalah pengembangan material dasar yakni Mo-Si-Al untuk aplikasi korosi oksidasi temperatur tinggi pada mesin turbin pesawat terbang, sedangkan untuk perbedaannya adalah tidak dijelaskan lebih lanjut terkait sintesis pengembangan dari material-material dasar yang disebutkan tersebut.

c. L. Ingermarsson, K. Hellstrom, S. Canovic, T. Jonsson, M. Halvarsson, L.-G. Johansson, J.-E. Svensson (2013) melakukan penelitian tentang Formula perilaku oksidasi atas komposit $Mo(Si,Al)_2$ pada temperatur 900°C – 1600°C di udara kering. Dalam penelitian ini komposit $Mo(Si,Al)_2$ membentuk skala alumina eksternal pelindung yang kontinyu di

udara kering pada kisaran temperatur 900°C – 1600°C . Adapun ketebalan lapisan alumina yang terbentuk setelah 72 jam adalah dua kali dari ketebalan silika yang terbentuk pada MoSi_2 . Perubahan kerak alumina menyediakan ruang untuk aluminium yang mempengaruhi substrat dengan mengubahnya komposisi fase dengan menghasilkan konsentrasi gradien di dalamnya. Persamaan dengan penelitian ini adalah pengembangan material berbasis Mo-Si-Al dengan karakterisasi mikrostruktur dan oksidasi temperatur tinggi. Perbedaan dengan penelitian ini adalah proses penyiapan bahan sampel dengan proses sintering dan komposisi material Mo-Si-Al yang dianalisa, serta temperatur yang dimonitoring yakni pada 900°C – 1600°C .

d. Melih Cemal Kushan, Yagiz Uzunonat, Sinem Cevik Uzgur, Fehmi Diltemiz (2012) melakukan penelitian tentang potensi material komposit MoSi_2 dan $\text{MoSi}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$ untuk material pada komponen mesin gas turbin pesawat. Didapati hasil bahwa komposit $\text{MoSi}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$ adalah aplikasi yang menjanjikan aplikasi untuk komponen pesawat terbang, dimana tidak menunjukkan fenomena pesting, serta dapat mengabaikan penambahan bobot setelah 500 jam. Persamaan dengan penelitian ini adalah dilakukannya pengembangan komposit struktural berbasis silisida yakni MoSi_2 untuk aplikasi komponen mesin turbin pesawat terbang, sedangkan untuk perbedaan yang ada dengan penelitian ini adalah paduan komposit yang digunakan adalah Si_3N_4 dengan tidak menjelaskan teknik paduan komposit yang dilakukan.

e. Lynda Meddar, Benoit Magnien, Marlene Clisson, Lionel Rove, dan Daniel Guay (2012) melakukan penelitian bersama terkait efek penambahan aluminium (Al) pada mikrostruktur dan oksidasi temperatur rendah dari pembentukan MoSi_2 . Hasil yang diperoleh adalah dengan penambahan Al memberikan efek yang menguntungkan pada oksidasi suhu rendah. Perilaku oksidasi MoSi_2 penambahan 20 mol% Al ke serbuk MoSi_2 cukup untuk mengurangi massa yang dinormalisasi dari 12 menjadi

2% m⁻². Persamaan dengan penelitian ini adalah penambahan unsur Al pada paduan MoSi₂. Perbedaan dengan penelitian ini adalah pencampuran serbuk melalui proses milling dan oksidasi yang dipantau perilakunya adalah pada temperatur rendah.

Tabel 2.3 Kajian Penelitian Terdahulu

(Sumber : Diolah Penulis, 2021)

No.	Peneliti Terdahulu	Judul	Hasil	Persamaan	Perbedaan
1.	L. R. Kanyane, N. Malatji, A. P. I. Popoola, O. S. I. Fayomi (2019)	<i>Synthesis of equi-atomic Ti-Al-Mo-Si-Ni high entropy alloy via spark plasma sintering technique: Evolution of microstructure, wear, corrosion and oxidation behaviour</i> (ScienceDirect, 2019, Result in Physics, https://doi.org/10.1016/j.rinp.2019.102465)	Konsolidasi Ti – Al – Mo – Si – Ni High Entropy Alloy dengan menggunakan metode Spark Plasma Sintering dengan pengaruh suhu sintering pada desifikasi, kekerasan mikro, korosi, keausan dan oksidasi serta kepadatan relatif dan kekerasan mikro pada 612 HV yakni maksimum pada 98.88%, dimana masing-masing dicapai pada suhu sintering 1000°C.	-Objek yang diteliti yakni material Mo, Si dan Al. -Teknik yang digunakan dalam penelitian yakni <i>Spark Plasma Sintering</i> .	Adanya unsur lain yakni Ti dan Ni dalam uji laboratorium yang dilakukan dalam penelitian.
2.	John H. Perepezko (2014)	The Hotter the Engine, the Better (Jurnal Science (print ISSN 0036-8075; online ISSN 1095-9203), June 2, 2014).	-Bahan kandidat meliputi Molibdenum (Mo) dan Niobium (Nb) serta paduan dengan Silikon (Si) dan elemen lainnya diantaranya Aluminium (Al) dan Titanium (Ti) yang terbukti dapat menghasilkan fasa yang memperkuat menjadi super paduan.	Pengembangan material dasar yakni Mo-Si-Al untuk aplikasi korosi oksidasi temperatur tinggi pada mesin turbin pesawat terbang.	Tidak dijelaskan lebih lanjut terkait sintesis pengembangan dari material-material dasar yang disebutkan tersebut.

			<p>-Mo/Nb yang dipadukan dengan Al dan Si dapat mengandalkan Alumina (Al_2O_3) dan kemudian pada bagian atasnya akan ada lapisan silika (SiO_2) yang akan tumbuh lebih banyak secara perlahan memberikan ketahanan oksidasi.</p> <p>-Periode sementara ketika terjadi penguapan MoO_3 adalah memperkaya lapisan B dan Si sehingga semakin tahan terhadap oksidasi temperatur tinggi.</p>		
3.	L. Ingermars son, K. Hellstrom, S. Canovic, T. Jonsson, M. Halvarsson, L.-G. Johansson, J.-E. Svensson (2013)	Oxidation behavior of a $\text{Mo}(\text{Si},\text{Al})_2$ composite at 900–1600°C in dry air (J Mater Sci (2013) 48:1511–1523 DOI 10.1007/s10853-012-6906-0)	<p>-Ketebalan lapisan alumina yang terbentuk setelah 72 jam adalah dua kali dari ketebalan silika yang terbentuk pada MoSi_2.</p> <p>-Perubahan kerak alumina menyediakan ruang untuk aluminium yang mempengaruhi substrat dengan mengubahnya komposisi fase dengan menghasilkan gradien konsentrasi di dalamnya.</p>	Pengembangan material berbasis Mo-Si-Al dengan karakterisasi mikrostruktur dan oksidasi temperatur tinggi.	Proses penyiapan sampel bahan dengan proses sintering dan komposisi material Mo-Si-Al yang dianalisa, serta temperatur yang dimonitoring yakni pada 900°C – 1600°C
4.	Melih Cemal Kushan, Yagiz Uzunonat, Sinem Cevik Uzgur, Fehmi Diltemiz (2012)	Potential of MoSi_2 and $\text{MoSi}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$ Composites for Aircraft Gas Turbine Engines (Researchgate, publication, chapter February 2012, High	Komposit $\text{MoSi}_2 - \text{Si}_3\text{N}_4$ adalah menjanjikan untuk aplikasi komponen pesawat terbang, dimana tidak menunjukkan fenomena pesting, serta dapat mengabaikan penambahan bobot setelah 500 jam.	Pengembangan komposit struktural berbasis silisida yakni MoSi_2 untuk aplikasi komponen mesin turbin pesawat terbang,	Paduan komposit yang digunakan adalah Si_3N_4 dengan tidak menjelaskan teknik paduan komposit yang dilakukan.

		temperature coatings, DOI: 10.5772/38475 . Source: InTech).			
5.	Lynda Meddar, Benoit Magnien, Marlene Clisson, Lionel Rove, dan Daniel Guay (2012)	P (J Mater Sci (2012) 47:6792–6800 DOI 10.1007/s10853-012-6623-8)	-Dengan penambahan Al memberikan efek yang menguntungkan pada oksidasi suhu rendah. -Perilaku oksidasi MoSi ₂ dengan penambahan 20 mol% Al ke serbuk MoSi ₂ cukup untuk mengurangi massa yang dinormalisasi dari 12 menjadi 2% m ⁻² .	Penambahan unsur Al pada paduan MoSi ₂ .	-Pencampuran serbuk melalui proses milling. -Oksidasi yang dipantau perilakunya adalah pada temperatur rendah.

2.3 Kerangka Pemikiran

Ketahanan negara dapat terwujud dengan baik salah satunya melalui dukungan sarana dan prasarana yakni berupa alat utama sistem senjata (alutsista) pada Tentara Nasional Indonesia (TNI) selaku komponen utama dalam suatu sistem pertahanan negara. Alutsista hasil dari industri pertahanan dalam negeri yang terus dikembangkan, salah satunya melalui penelitian, pengembangan dan rekayasa atas teknologi yang digunakan. Fokus pada matra udara, dimana didominasi oleh wahana pesawat dengan sumber daya gerak utama yakni berupa mesin gas turbin dimana bilah turbin merupakan salah satu komponen yang kerap mengalami penurunan fungsi dikarenakan karakteristik mesin turbin pesawat yang beroperasi pada keadaan ekstrim (temperatur tinggi mencapai 1500°C dan tingkat oksidasi tinggi). Suatu mesin gas turbin dapat beroperasi pada suhu yang lebih tinggi, maka efisiensi mesin akan lebih baik, secara otomatis akan mengurangi konsumsi bahan bakar dan berujung pada rendahnya emisi yang akan dihasilkan.

Teknologi *advance material* merupakan yang sangat erat pengaplikasiannya dalam bidang kemiliteran yang menjadi obyek utama

dari suatu industri pertahanan. Melalui penggabungan antara dua atau lebih unsur dengan karakteristik kelebihan masing-masing, diharapkan dapat meningkatkan kelebihan yang ada bahkan menjadi superior atas karakter dari material hasil paduan yang dilakukan tersebut. Pengembangan atas material berbasis Mo-Si-Al kemudian dilakukan dengan didasari keunggulan material Molibdenum Disilida (MoSi_2) yang tahan pada temperatur tinggi dengan memiliki titik leleh 2030°C namun tetap memiliki keterbatasan yakni mudah rapuh pada suhu ruangan. Terkait keterbatasan tersebut kemudian dilakukan paduan dengan unsur aluminium (Al) yang pada penelitian sebelumnya memiliki karakteristik sangat efektif dalam menghilangkan inisiasi fase silika amorf pada material butir, dimana fase silika amorf ini yang umumnya menurunkan ketahanan mulur suhu paduan MoSi_2 , yakni penyebab terjadinya kerapuhan pada suhu ruangan. Al juga memiliki karakteristik fisik yang cukup ringan (density $2,70 \text{ g/cm}^3$) serta tahan terhadap korosi dan oksidasi. Proses paduan yang dilakukan terdiri atas komposisi material Al yang bernilai 0%, 1 %, 3 % dan 5 %, kemudian dilakukan melalui metalurgi serbuk dengan menggunakan teknik *Spark Plasma Sintering* (SPS) yang merupakan teknik sintering dengan waktu proses cukup singkat dengan hasil yang baik.

Hasil dari proses sintering sesuai komposisi yang telah ditetapkan sebelumnya kemudian dilakukan proses karakterisasi phase dan identifikasi mikrostruktur. Selanjutnya dilakukan proses pengukuran densitas dan pengukuran kekerasan dan oksidasi pada temperatur tinggi. Dari keseluruhan proses tersebut pada akhirnya akan dilakukan analisa yang meliputi bobot, kekuatan mekanik dan ketahanan oksidasi temperatur tinggi atas tiap komposisi dari *material advance* yang selesai diteliti tersebut. Suatu riset dasar terkait *material advance* yang memiliki ketahanan pada temperatur tinggi, kekerasan yang baik namun dengan sifat yang ringan, yang kemudian dapat acuan atas pengembangan material komponen bilah turbin, dalam rangka memperkuat alutsista matra udara dan mendukung industri pertahanan Indonesia.

