

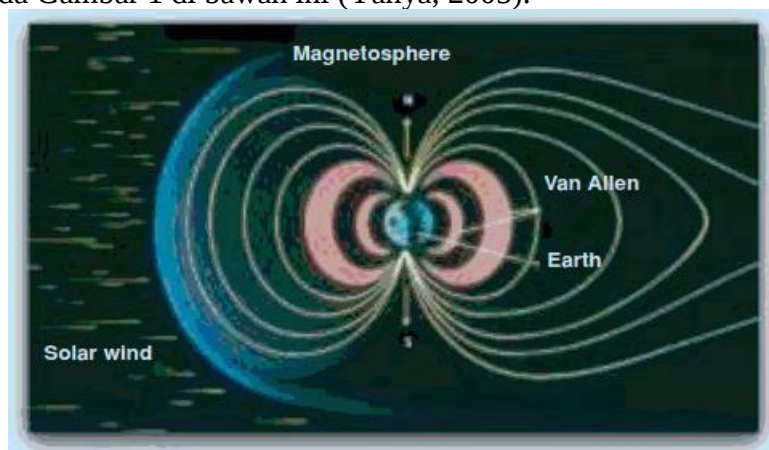
Besi dalam Al-Qur'an dan Hadist: Perspektif Islam dan Kontribusi Metalurgi bagi Teknologi Masa Depan

RIFKY

1. Pendahuluan

Dalam sejarah peradaban manusia, besi telah berperan penting dan strategis. Kehadirannya menandai tonggak perkembangan teknologi dari era prasejarah ke zaman sejarah melalui fase yang dikenal sebagai Zaman Besi (*Iron Age*), di mana masyarakat pada zaman itu mulai meninggalkan penggunaan batu dan perunggu untuk memanfaatkan logam besi dalam kehidupan sehari-hari (Ashby et al., 2007). Dari alat pertanian, senjata, hingga infrastruktur awal, besi menjadi simbol transisi teknologi dan kekuatan dominasi suatu peradaban. Pemanfaatan besi masih berlanjut hingga kini sebagai logam yang paling banyak digunakan di dunia (Pilchin & Eppelbaum, 2006). Dalam era industri 4.0 dan memasuki fase *society 5.0*, besi masih menjadi andalan pada kebutuhan konstruksi, industri, mesin, otomotif, perkakas, dan bidang lainnya baik dalam bentuk mineral, unsur, logam, senyawa, maupun paduannya.

Dalam konteks pembentukan alam semesta, atom-atom besi di pusat bintang bermassa tinggi berakumulasi yang memicu ledakan supernova, sehingga terjadi pembentukan tata surya, bumi, dan pada akhirnya kehidupan. Besi cair di inti bumi menghasilkan medan magnet bumi dan menciptakan sabuk radiasi Van Allen yang melindungi kehidupan di permukaan bumi dari radiasi kosmik yang merusak, berenergi tinggi, dan menembus, serta melindungi lapisan ozon yang penting (Denton, 2020). Sabuk radiasi yang disebut juga lapisan magnetosfer, digambarkan pada Gambar 1 di bawah ini (Yahya, 2005).



Gambar 1 Sabuk Van Allen

Unsur besi membawa oksigen dalam darah sebagai konstituen utama hemoglobin dalam sel darah merah. Besi juga berperan penting dalam pembentukan beberapa enzim dalam tubuh manusia. Unsur besi juga digunakan sebagai obat bagi penderita anemia. Partikel oksida besi dimanfaatkan dalam pengobatan kanker—hipertermia cairan magnetik (cairan magnetik suhu tinggi)—oleh tim yang dipimpin Dr. Andreas Jordan, di Rumah Sakit Charité yang terkenal di dunia di Jerman yang berhasil membunuh sel kanker dengan metode baru (Gheraout, 2017). Dalam tubuh manusia, besi memiliki fungsi untuk mengangkut oksigen dari paru-paru ke jaringan dan mengangkut elektron dalam proses pembentukan energi di dalam sel. Pria dewasa

(berat 75 kg) mengandung ± 4000 mg besi, sedangkan wanita dewasa (berat 55 kg) mengandung ± 2100 mg besi (Umar et al., 2020).

Besi sebagai unsur atau elemen terdiri dari atom besi. Pada penciptaan alam semesta, kehidupan di bumi, dan peradaban manusia, besi berperan sangat penting. Tanpa atom besi, tidak akan ada kehidupan berbasis karbon di kosmos; tidak ada supernova, tidak ada pemanasan bumi purba, tidak ada atmosfer atau hidrosfer. Tidak akan ada medan magnet pelindung, tidak ada sabuk radiasi Van Allen, tidak ada lapisan ozon, tidak ada logam untuk membuat hemoglobin (dalam darah manusia), tidak ada logam untuk menjinakkan reaktivitas oksigen, dan tidak ada metabolisme oksidatif. Hubungan yang menarik dan intim antara kehidupan dan besi, antara warna merah darah dan kematian beberapa bintang yang jauh, tidak hanya menunjukkan relevansi logam terhadap biologi tetapi juga biosentrisitas kosmos (Ghernaout, 2017).

Besi sebagai elemen tidak teknis dan tidak ekonomis dalam aplikasi teknologi dan industri. Besi teknik yang dikenal adalah besi cor dan baja. Besi cor atau besi tuang dengan berbagai spesifikasinya apalagi baja dengan beragam sifat kegunaannya dalam banyak produk dan belum tergantikan sepenuhnya oleh material lain. Besi dan turunannya tersebut tetap menjadi tulang punggung pembangunan teknologi modern, baik dalam bentuk baja struktural, paduan khusus untuk antariksa, hingga nanopartikel besi dalam dunia medis dan energi terbarukan.

2. Besi dalam Perspektif Al-Qur'an

Besi merupakan satu-satunya logam yang mendapat tempat istimewa dalam Al-Qur'an. Besi adalah nama surat ke-57 dalam Al-Qur'an. Awal mula turunnya ayat 25 surat Al-Hadid ini ketika terjadi perang Uhud yang merupakan masa berdirinya Islam di kota Madinah (Kustomo et al., 2022). Besi disebut secara eksplisit dengan penekanan khusus terhadap manfaat dan kekuatannya bagi umat manusia yang termaktub dalam Surat Al-Hadid ayat 25, yang selengkapnya berbunyi:

لَقَدْ أَرْسَلْنَا رُسُلَنَا بِالْبَيِّنَاتِ وَأَنْزَلْنَا مَعَهُمُ الْكِتَابَ وَالْمِيزَانَ لِيَقُومَ النَّاسُ بِالْقِسْطِ وَأَنْزَلْنَا الْحَدِيدَ فِيهِ بَأْسٌ شَدِيدٌ وَمَنَافِعُ لِلنَّاسِ وَلِيَعْلَمَ اللَّهُ مَن يَنْصُرُهُ وَرُسُلَهُ بِالْغَيْبِ إِنَّ اللَّهَ قَوِيٌّ عَزِيزٌ

"Sungguh, Kami telah mengutus rasul-rasul Kami dengan bukti-bukti yang nyata dan Kami turunkan bersama mereka Kitab dan neraca (keadilan) agar manusia dapat berlaku adil. Dan Kami menurunkan besi yang mempunyai kekuatan hebat dan banyak manfaat bagi manusia, dan agar Allah mengetahui siapa yang menolong (agama)-Nya dan rasul-rasul-Nya walaupun (Allah) tidak dilihatnya. Sesungguhnya Allah Mahakuat lagi Mahaperkasa." (QS. Al-Hadid: 25).

Ayat ini meletakkan posisi besi secara spesial: bersanding langsung dengan wahyu (kitab) dan keadilan (mizan), sebagai perangkat peradaban. Penggunaan kata "*anzalnā*" (kami turunkan) pada frasa "*wa anzalnā al-ḥadīd*" menjadi titik kajian penting dalam tafsir klasik dan kontemporer. "Diturunkan" dapat diartikan secara harfiah berarti bahwa besi diturunkan langsung oleh Allah atau hanya Allah yang menciptakan besi (Nasr et al., 2015), sebagaimana turunnya wahyu atau hujan.

Besi bukanlah unsur alami bumi. Besi tidak terbentuk di bumi, melainkan turun ke bumi dari luar angkasa (Dadach, 2015). Fenomena ini sejalan dengan pandangan ilmiah bahwa besi masuk ke atmosfer bumi dari luar angkasa melalui meteorit (kadar besi 10%) sekitar 4,6 miliar tahun lalu (setua usia tata surya itu sendiri), yang memperkuat makna harfiah dari "penurunan"

besi (Herbst & Greenwood, 2019). Menurut kajian Profesor Armstrong atau Mohamed Asadi, seorang ilmuwan dari NASA, menyatakan bahwa besi adalah logam yang unik dimana pembentukannya memerlukan energi yang sangat besar dan melebihi energi yang dihasilkan oleh sistem matahari (Novie et al., 2024).

Selain surat Al-Hadid ayat 25 yang memberi informasi tentang asal muasal besi, dalam Al Qur'an terdapat lima surat dan enam ayat lagi yang membicarakan besi. Surat-surat tersebut adalah, Al-Isra (17) ayat 50, Al-Kahf (18) ayat 96, Al-Anbiya (21) ayat 80, Al-Hajj (22) ayat 21, Saba (34) ayat 10, dan Saba (34) ayat 11. Penyebutan besi pada beberapa surat dan ayat dalam Al-Qur'an menjadi penegas bahwa Allah telah menganugerahkan besi sebagai karunia dengan nilai dan manfaatnya bagi umat manusia. Walaupun, perlu diingat dan penting untuk diketahui bahwa Al-Qur'an bukanlah buku *science*, tetapi sebagai kitab suci bagi umat Islam Al-Qur'an berisi pedoman hidup dan mengandung ayat-ayat yang memberikan inspirasi, petunjuk, dan pengetahuan tentang alam semesta dan kehidupan. Beberapa ayat dalam Al-Qur'an menyentuh aspek ilmiah yang telah terbukti sesuai dengan penemuan ilmiah, termasuk pengakuan tentang besi sebagai material penting dalam kehidupan manusia (Anggara et al., 2023).

3. Besi dalam Perspektif Hadist

Berbeda dari Al-Qur'an yang menyebut besi secara eksplisit dan filosofis, referensi tentang besi dalam hadis cenderung lebih aplikatif dan kontekstual, berkaitan dengan fungsi dan penggunaannya dalam kehidupan sehari-hari. Walaupun tidak banyak hadis yang secara khusus membahas logam besi sebagai tema utama, tetapi eksistensinya muncul dalam berbagai riwayat, terutama yang berkaitan dengan peperangan, kehidupan sosial, dan simbol kekuatan. Pada Shahih Bukhari ada sebanyak 91 hadis yang menyebut kata "hadid" (Aprilia Dewi Ardiyanti, 2022). Namun pada Shahih Bukhari Muslim ditemukan ada 17 hadis yang menyebut kata "besi" dalam terjemahannya (Baqi, 2017).

Hadits tentang besi yang dimaksud, diantaranya adalah. Telah menceritakan kepada kami A'bdullah bin Yusuf, telah mengabarkan kepada kami Malik dari Yahya bin Sa'id berkata, "Aku mendengar Abu al Hubab Sa'id bin Yasar berkata; "Aku mendengar Abu Hurairah radhiyallaahu 'anhu berkata; "Aku diperintahkan (untuk berhijrah) ke suatu tempat yang daya tariknya lebih dominan daripada tempat-tempat lain, yaitu kota Madinah, kota ini membersihkan manusia (yang jahat) sebagaimana alat tempa besi yang membersihkan karat besi." (HR. Bukhari No. 1738) (Salmah, 2016).

Hadist lain yang terkenal diriwayatkan oleh Imam Bukhari dan Muslim berbunyi: "Barang siapa yang membawa senjata (besi) untuk menakut-nakuti saudaranya sesama Muslim, maka para malaikat akan melaknatnya, meskipun dia bersaudara kandung dengannya." (HR. Muslim, no. 2616). Ada riwayat pada hadist ini, bahwa yang dimaksud senjata terbuat dari besi. Hal ini menunjukkan bahwa besi (sebagai senjata) memiliki kekuatan luar biasa, tetapi penyalahgunaannya bertentangan dengan prinsip kasih sayang dan keamanan sosial dalam Islam. Ini memperlihatkan bahwa logam seperti besi tidak netral secara moral dan pemanfaatannya sangat tergantung pada niat dan tujuan manusia. Oleh karena itu, kontrol etis dalam penggunaannya menjadi sangat penting dalam perspektif Islam.

Dalam konteks peperangan dan perlindungan diri, hadist sahih lainnya menyebutkan perlengkapan perang Nabi, seperti: "Rasulullah memasuki Mekah pada hari penaklukan dengan memakai topi besi (*mighfar min hadid*)."(HR. Bukhari, no. 5361). Ini menunjukkan bahwa Rasulullah tidak menolak penggunaan teknologi (dalam hal ini senjata atau

perlindungan bermaterial besi) untuk tujuan strategis dan menjaga keselamatan. Topi besi tersebut adalah bentuk teknologi militer pada masa itu, dan menunjukkan bahwa pemanfaatan material kuat seperti besi adalah bagian dari sunnah yang rasional dan kontekstual. Beberapa hadits juga menyebutkan tentang besi sebagai kursi yang terbuat dari besi (HR. Muslim, No.1450); perlengkapan perang, yaitu baju besi dan tombak (HR. Muslim, No.1482); cincin besi sebagai mahar (HR. Bukhari, No. 4697); dan pemanfaatan besi untuk pengobatan (HR. Muslim Kitab Salam bab 73)(Salmah, 2016).

4. Sejarah Metalurgi

Metalurgi adalah seni, ilmu, dan teknologi yang berkaitan dengan ekstraksi, pengolahan, serta sifat-sifat logam dan paduannya. Sejarah metalurgi mencerminkan jejak panjang evolusi teknologi manusia, dimulai dari pemanfaatan logam alami secara sederhana hingga proses industri canggih berbasis ilmu pengetahuan dan teknik tinggi. Dalam sejarahnya, besi menempati posisi sentral sebagai penanda fase revolusioner dalam perkembangan umat manusia, yaitu transisi dari zaman batu dan perunggu menuju Zaman Besi (*Iron Age*).

4.1 Zaman Logam dan Revolusi Besi

Zaman logam dimulai ketika umat manusia telah menguasai peleburan tembaga sejak 7.000 tahun yang lalu. Ekstraksi tembaga selanjutnya dari bijih yang mengandung tembaga dan pencampurannya dengan timah untuk membuat perunggu (yang lebih keras daripada tembaga) ditemukan secara independen oleh budaya di Dunia Lama dan Dunia Baru, dan mengantarkan Zaman Perunggu di Timur Dekat kuno sekitar 3500 SM (Denton, 2022). Dunia Lama mengacu pada wilayah Eropa Tenggara (Serbia), Asia Barat Daya (Timur Tengah), dan Asia Selatan (Mehrgarh, Pakistan) tempat penggunaan tembaga sebagai logam pertama ditemukan, sementara Dunia Baru merujuk pada wilayah yang belum menggunakannya atau bahkan tidak mengalami Zaman Tembaga seperti di Indonesia dan Asia Tenggara (yang langsung lompat dari Zaman Batu ke Zaman Perunggu) (Sofian, 2021). Timur Dekat Kuno pada Zaman Perunggu mengacu pada wilayah Asia Barat Daya yang subur, seperti Mesopotamia (Sungai Tigris & Efrat), Lembah Sungai Nil (Mesir), Levant (Suriah-Palestina), Anatolia (Turki), dan sebagian Semenanjung Arab sekitar 3000-1200 SM, di mana peradaban-peradaban besar Sumeria, Akkad, Babilonia, Asyur, Mesir Baru, dan Het, yang mengembangkan pertanian intensif, sistem tulisan, kota-negara, hukum tertulis, astronomi, matematika, dan penggunaan logam perunggu secara luas (Nuraini, 2020).

Logam-logam relatif lunak seperti emas dan perak mulai dikenal sejak sekitar 6000 SM. Namun, jarang dijumpai dalam bentuk murni yang tahan lama untuk alat berat atau senjata. Sekitar tahun 3300–1200 SM, manusia mulai mencampurkan tembaga dengan timah untuk membentuk perunggu, yang lebih kuat dan tahan lama. Masa ini dikenal sebagai Zaman Perunggu seperti diulas di atas.

Untuk membuat produk dari logam memiliki proses yang panjang. Setidaknya-tidaknya ada lima tahap yang diperlukan dalam membuat produk logam yaitu, menambang material *ore*, mempersiapkan *ore* untuk dilebur, melebur *ore* ke *ingot*, melebur logam dari *ingot*, dan tahap akhir adalah benda yang dihasilkan. Berdasarkan teknik produksinya, logam dapat dibedakan menjadi dua teknik, yaitu teknik cor dan teknik tempa (Sofian, 2021).

Besi ditemukan sebagai besi meteorik atau besi asli yang diolah oleh orang Mesir Gerzea pada milenium keempat SM, suku-suku Anatolia pada milenium ketiga SM, orang Tionghoa Chou pada milenium pertama SM, orang Indian Hopewell, dan, baru-baru ini, orang Eskimo Greenland (Wertime, 1973). Namun, terobosan besar datang ketika manusia mulai memahami

bagaimana mengolah bijih besi dalam bentuk mineral oksida (hematit, Fe_2O_3 ; magnetit, Fe_3O_4 ; dan limonit, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$), karbonat (siderit, FeCO_3), serta sulfida (pirit, FeS_2) (Pilchin & Eppelbaum, 2006) melalui teknik pembakaran tinggi yang memungkinkan proses reduksi oksida besi menjadi logam besi. Zaman Besi dimulai antara 4000 - 2000 SM. Abad ke-18 SM besi digunakan sebagai perhiasan di kota Babilonia di tepi Sungai Efrat (Wertime, 1964). Sekitar 1500 SM, pengolahan bijih besi berkembang di wilayah Anatolia (Turki), Mesopotamia, dan kemudian menyebar ke Mesir, Yunani, Siprus, dan India (Wertime, 1973). Tahun 1000 SM peradaban besi mencapai Tiongkok, Inggris, dan Nigeria sekitar 400 SM. Amerika Utara dan Selatan serta Australasia (sebutan bagi kawasan di Oseania yang mencakup Australia, Selandia Baru dan pulau-pulau di sekitarnya di Samudra Pasifik) memperoleh pengetahuan mereka tentang pengolahan besi melalui kolonisasi Eropa, yang dimulai sekitar abad ke-15 M (Tylecote, 1992).

Besi memiliki titik leleh tinggi ($\pm 1537^\circ\text{C}$) (Balley, 1967), sehingga awalnya sulit diolah. Teknologi peleburan besi awal menggunakan *furnace* tanah liat sederhana dengan bantuan aliran udara alami atau *bellow* untuk meningkatkan suhu. Produk awalnya adalah *bloom iron*, yang masih berisi *slag* dan perlu ditempa ulang agar menjadi logam padat.

Penemuan tanur tiup (*blast furnace*) di Tiongkok sekitar abad ke-8 SM menjadi revolusi berikutnya dalam metalurgi besi. Arkeolog menemukan artefak besi cor tertua di Jiangsu, Cina (Nanda, 2025). Teknologi metalurgi besi ini memungkinkan produksi besi dalam jumlah besar dan membuka jalan bagi produksi baja secara massal, meskipun pada masa itu kualitasnya masih sangat bervariasi.

4.2 Peran Peradaban Islam

Perang Salib meninggalkan “warisan” berharga buat Eropa, yakni mereka menyalin ilmu pengetahuan dari kaum Muslimin yang memiliki peradaban superior saat itu. Mereka meniru ilmu industri dan keterampilan dalam bidang tekstil, pewarnaan, pelabuhan, tambang dan kaca (Syauqi et al., 2016). Di bawah ini diuraikan peran peradaban Islam terutama kontribusi ilmuwan Muslim dalam pengembangan metalurgi dan dalam riset ilmu dasar (fisika dan kimia) yang mendukungnya.

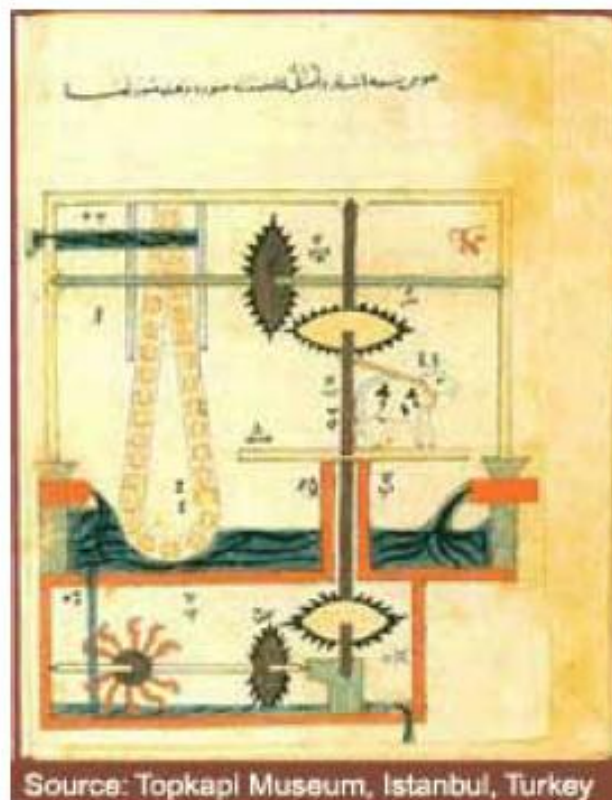
Industri metalurgi mengalami perkembangan pesat pada masa keemasan peradaban Islam (abad ke-8 hingga ke-14 M), yang didukung oleh ilmuwan kimia. Ilmu kimia adalah landasan utama metalurgi. Kimiawan muslim melakukan metodologi, observasi, eksperimen, dan dokumentasi yang teliti, dan berbeda dengan Yunani yang hanya melahirkan sebatas hipotesis. Revolusi kimia dilakukan oleh Abu Musa Jabir bin Hayyan Al-Azdi (721 M – 815 M), dengan eksperimen kuantitatifnya dengan deretan penemuan pada proses kimia, seperti distilasi alkohol, kristalisasi, kalsinasi batu kapur, dan sublimasi, yang pencapaiannya adalah mendirikan industri parfum. Abu Bakr Muhammad bin Zakariya ar-Razi (864 M – 930 M), yang membuat klasifikasi zat alam. Soda serta oksida timah merupakan hasil kreasinya. Al-Razi merupakan ilmuwan pelopor yang menciptakan laboratorium modern. Dari tangannya industri farmakologi muncul di dunia (Noryani, 2022).

Abdullah Muhammad bin Musa al-Khwarizmi (780 M – 850 M), adalah ilmuwan muslim ahli matematika (aljabar, konsep nol, bilangan desimal, dan trigonometri) yang menjadi dasar fisika, kimia, geografi, navigasi, dan astronomi. Al-Khwarizmi merancang solusi persamaan linear dan kuadrat yang menjadi dasar kalkulus dan analisis modern. Al-Khwarizmi menciptakan peta dunia yang detail berdasarkan perhitungan geografis. Al-Khwarizmi juga

mengembangkan metode sistematis yang menjadi dasar pengembangan algoritma modern yang digunakan dalam pemrograman komputer (Aziza & Rafi'i, 2025).

Abū Yūsuf Ya'qūb ibn Ishāq aṣ-Ṣabbāḥ al-Kindī (801 M – 876 M), telah membuat klasifikasi baja pedang, di mana baja dibagi menjadi dua kelas utama, yaitu baja besi dan baja non besi. Al-Kindī membagi baja besi menjadi dua kelompok: baja karbon dan besi tempa. Kemudian ia menyatakan bahwa dari keduanya, dihasilkan baja ketiga yang disebut baja komposit (*murakkab*), "yang kualitasnya berasal dari kombinasi sifat laki-laki dan perempuan, kekerasan dan ketangguhan (Al-Hassani, 2018)."

Badi' al-Zaman Abu al-'Izz ibn Isma'il ibn al-Razzaz al-Jazari (1136 M – 1206 M), seorang insinyur Muslim pada abad ke-12, menciptakan berbagai mekanisme berbasis logam, seperti pengecoran logam dalam kotak cetakan tertutup dengan *green sand*, roda gigi besi, pompa air logam, alat cuci tangan (mesin wudhu), poros engkol dalam mesin, kalibrasi lubang yang akurat, laminasi kayu untuk mengurangi lengkungan, penyeimbangan statis roda, penggunaan model kertas untuk membuat desain, dan jam air berbahan besi dan tembaga. Ini menunjukkan bahwa metalurgi bukan hanya bersifat fungsional tetapi juga menyentuh aspek rekayasa presisi dan inovasi. Karya-karya Al-Jazari dan bukunya menempati tempat penting dalam sejarah automata, mekanika, mekatronika, kontrol otomatis, robotika, dan teater musik otomatis (Uzun & Vatansever, 2008). Al-Jazari, disebut sebagai "Bapak Robotika (Aziza & Rafi'i, 2025)" sebagai perancang pertama robot humanoid (sibernetika). Salah satu karya Al-Jazari, adalah pompa mekanik yang digambarkan pada Gambar 2 di bawah ini.



Gambar 2 Pompa mekanik buatan Jazari (Uzun & Vatansever, 2008)

Ilmuwan muslim bukan sekedar menjadi transisi peradaban Yunani dan Eropa, tetapi menawarkan paradigma ilmiah yang berorientasi pada pencarian kebenaran ilahi (*al-haqq*) dan manfaat universal (*maslahah*). Bayt al-Hikmah (pada masa Dinasti Abasiyah), merupakan

madrasah, observatorium, dan perpustakaan besar. Penerjemahan karya-karya intelektual Yunani, Persia, dan India ke dalam bahasa Arab. Namun, para ilmuwan sekaligus cendekiawan Muslim tersebut tidak hanya berhenti pada penerjemahan saja, tetapi juga mengembangkan teori dan metode baru dalam berbagai disiplin ilmu, termasuk astronomi, matematika, kedokteran, dan kimia (Putra & Mujab, 2025).

Hezârfen Ahmed Çelebi (1609 M – 1640 M), seorang ilmuwan, penemu, ahli kimia, astronom, dokter, musisi Andalusia, dan penyair berbahasa Arab. Ia membawa perubahan revolusioner di bidang astronomi dan teknik. Mostafa Al-Sayed (lahir 1933 M), seorang ahli di bidang kimia fisik, nanoteknologi, spektroskopi, nanosains, dan biofisika. Abdul Qadeer Khan (1936 M – 2021 M), seorang fisikawan nuklir dan insinyur metalurgi Pakistan. Ia dikenal sebagai "Bapak Program Senjata Atom Pakistan (Fahim, 2016)."

Abual-Rihan Al-Beruni (973 M – 1048 M), menetapkan korelasi antara kepadatan berbagai logam termasuk emas, merkuri, timbal, perak, perunggu, tembaga, kuningan, besi, dan timah (Khan, 2023).

Bacharuddin Jusuf (B.J) Habibie (1936 M – 2019 M), pakar konstruksi dan perancangan pesawat terbang. Habibie aktif melakukan berbagai penelitian yang menghasilkan sejumlah teori di bidang termodinamika, konstruksi dan aerodinamika yang diakui dunia internasional, seperti "*Habibie Factor*", "*Habibie Theorem*" dan "*Habibie Method*". Habibie mencetuskan *Crack Progression Theory* (teori perambatan keretakan), yang merupakan model matematika untuk memprediksi perilaku perambatan retak pada struktur pesawat hingga ke tingkat atom. Teori yang dibuat berhasil menghitung letak dan besar retakan pada konstruksi pesawat sehingga titik retak dapat diprediksi lebih awal. Pesawat yang bermanuver menjadi lebih aman, mengurangi risiko kegagalan mendadak, dan membuat perawatannya lebih murah serta mudah. Penemuan ini merupakan sebuah terobosan baru di dunia penerbangan, sehingga dengan teori ini membuatnya dijuluki sebagai "Mr.Crack"(ANRI, 2022). Teori penjalaran retak Habibie sangat bersesuaian dan bahkan terintegrasi kuat dengan *Failure Analysis* dalam ilmu dan teknik metalurgi dan material. Teori ini bukan konsep terpisah, tetapi merupakan penguatan dan pengembangan aplikatif dari *fracture mechanics* yang menjadi tulang punggung *failure analysis modern* khususnya pada struktur kritis seperti pesawat terbang.

Sejarah industri, produksi, dan manufaktur terdistorsi dengan munculnya istilah era Renaisans (Abad Pembaruan) pada abad 14 – 17. Kemudian terjadinya Revolusi Industri di Inggris pada pertengahan abad ke-18 – 19, yang diikuti Prancis, Jerman, Amerika, dan Jepang. Propaganda sejarah menutup peranan kegiatan industri yang sudah ada dan membentangi dari Tiongkok hingga Spanyol selama Peradaban Muslim (sekitar 700 – 1700 M), suatu periode yang disebut sebagai "Zaman Kegelapan" atau "Abad Pertengahan", sejak runtuhnya Kekaisaran Romawi pada 450 M. Produksi industri manufaktur yang bergantung pada mesin yang digerakkan oleh angin dan air, telah ada hampir sepuluh abad sebelum Revolusi Industri Inggris abad ke-18. Selama tahun 700 – 1700 M, produksi industri Muslim berkisar dari penambangan mineral hingga produksi barang melalui proses yang kompleks. Logam dilebur dalam jumlah besar, di dunia Muslim, untuk pasar lokal dan luar negeri. Pada masa Kekhalifahan Abbasiyah industri manufaktur di Irak. Industri pertambangan berkembang dimana Algrava terkenal dengan tambang emas dan peraknya. Tambang-tambang di Spanyol menyediakan emas, perak, timah, tembaga, besi, timbal, tawas, belerang, dan merkuri. Metalurgi berkembang dengan baik di seluruh Spanyol. Cordova dengan besi dan timbalnya. Industri baja Toledo (Spanyol) didirikan oleh umat Islam. Murcia terkenal dengan karya besi dan kuningan. Seni tatahan baja dan logam

lainnya dengan emas dan perak serta dekorasi dengan pola diperkenalkan dari Damaskus (Al-Hassani, 2018).

4.3 Masa Industri dan Era Modern

Revolusi industri abad ke-18 hingga 19 ditandai oleh meningkatnya kebutuhan terhadap besi dan baja. Tokoh seperti Sir Henry Bessemer (1813 – 1898), ahli metalurgi Inggris (Spoerl, 2024), menemukan proses konversi besi kasar menjadi baja secara cepat dan ekonomis. Ini memicu pembangunan massal infrastruktur: rel kereta api, jembatan, gedung bertingkat, dan mesin-mesin industri.

Memasuki abad ke-20 hingga kini, metalurgi berkembang menjadi disiplin sains. Dengan kemajuan dalam metalografi, termodinamika, dan teknik material, manusia kini mampu merancang paduan super (*superalloy*), logam cerdas (*smart metal*), dan logam nano (*nanstructured metals*) untuk teknologi luar angkasa, kedokteran, dan energi berkelanjutan.

5. Metalurgi sebagai Seni, Ilmu, Teknologi, dan Industri

Metalurgi bukan hanya sebuah disiplin ilmu teknik, tetapi juga mencerminkan keterpaduan antara seni, ilmu pengetahuan, teknologi, dan aktivitas industri. Keempat dimensi ini menjadikan metalurgi sebagai jembatan antara pemikiran teoritis dan penerapan praktis, serta antara warisan budaya masa lalu dan inovasi masa depan. Dalam konteks besi, metalurgi telah berperan dalam membentuk wajah peradaban manusia, dari pedang Damaskus yang indah hingga struktur baja pencakar langit masa kini.

5.1 Metalurgi sebagai Seni

Sebelum berkembang sebagai cabang ilmu teknik, metalurgi muncul dalam bentuk keterampilan tukang logam tradisional yang mewarisi dan mengembangkan seni tempa, ukir, dan pembentukan logam. Dalam sejarah Islam, seni pandai besi berkembang dengan motif kaligrafi, geometri, dan estetika tinggi, terutama dalam bentuk pedang, pintu masjid, serta peralatan rumah tangga berbahan besi tempa dan baja Damaskus. Keindahan bilah pedang Zulfiqar, atau desain ukiran pada baja dari peradaban Persia dan Andalusia, menjadi bukti bahwa metalurgi bukan hanya urusan kekuatan material, tetapi juga ekspresi artistik. Zulfiqar adalah nama pedang Rasulullah saw. Pedang ini kemudian diberikan kepada Ali ra, sering digunakannya dalam medan perang, dan akhirnya dianggap sebagai simbol Ali ra. Zulfiqar merupakan pedang bermata dua, sebagaimana pedang Arab kuno. Riwayatnya kini tidak diketahui dengan jelas. Pedang yang asli juga sudah tidak ditemukan lagi sekarang dan yang ada hanya replikanya untuk pameran, di mana tingkat kesamaannya dengan aslinya tidak dapat dipastikan (Nizar, 2011). Salah satu bentuk imajinasi replika pedang Zulfiqar, seperti pada Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3 Imajinasi replika pedang Zulfiqar (Sayed, 2024)

Zulfiqar telah berkembang menjadi sebuah ikonografi tertua dan menjadi motif dalam seni rupa yang tampak pada bendera kerajaan dan bendera perang di Turki dan Iran. Motif Zulfiqar juga ditemukan dalam tiga jenis artefak kesenian Nusantara, yaitu: bendera, tekstil batik, dan meriam. Dari sebaran geografisnya, artefak-artefak yang ditemukan tersebar di Aceh, Sumatera Utara, Jambi, Siak, Selangor, Riau, Johor, Terengganu, Cirebon, Brunei, Kalimantan Tengah, Kalimantan Timur, dan Sulu (Nizar, 2011).

5.2 Metalurgi sebagai Ilmu

Seiring berkembangnya sains modern, metalurgi berevolusi menjadi ilmu sistematis yang mempelajari sifat-sifat logam secara mikroskopik dan makroskopik. Ilmu metalurgi terbagi dalam tiga cabang utama: (1) metalurgi fisik, mengkaji struktur, sifat mekanik, perubahan fasa, dan kristalografi logam; (2) metalurgi ekstraktif, fokus pada proses pemisahan logam dari bijihnya; dan (3) metalurgi mekanik, mempelajari deformasi plastik, pengerjaan logam, serta kekuatan dan keuletan paduan.

Sejarah ilmu metalurgi mencatat, *Damascus Sword* (Pedang Damaskus) adalah pedang baja berteknologi tinggi dari Timur Tengah yang legendaris karena ketajaman, kekuatan, dan pola uniknya yang menyerupai air (pola permukaan bergelombang). Materialnya dari baja *Wootz*, sebuah baja karbon tinggi yang langka yang kemungkinan berasal dari Asia Tengah atau India Selatan. Pedang ini mampu membelah sutra atau batu dalam satu ayunan, memotong pedang lain tanpa tumpul, dan menembus baju zirah tebal. Bentuk pedang Damaskus seperti diperlihatkan pada Gambar 4 di bawah ini (Somayyeh Karami-Mohajeri et al., 2025).



Gambar 4 Pedang Damaskus

Senjata ikonik ini menjadi termashur ketika digunakan oleh panglima muslim Shalahuddin Al-Ayyubi (Saladin) pada Perang Salib ke-3, khususnya saat merebut Yerusalem pada tahun 1187

M. Pedang ini menjadi lambang kehebatan pasukan muslim, dengan rahasia pembuatannya yang dijaga ketat dan masih menjadi misteri hingga kini. Sampai hari ini, belum ada yang mampu mereproduksi karakteristik baja yang luar biasa ini. Para ilmuwan menemukan bahwa baja tersebut mengandung *nanotube* karbon serta *nanowire* sementit, sebuah teknologi yang baru ditemukan pada akhir abad ke-20 (Al-Hassani, 2018).

Selain Pedang Damaskus, yang tergolong pedang legendaris adalah *Katana*, pedang samurai dari Jepang dengan material baja khusus Jepang yang disebut '*Tamahagane*', yang terdiri dari kombinasi baja keras berkadar karbon tinggi dan baja tangguh berkadar karbon rendah yang membutuhkan keahlian tinggi dalam pembuatannya. Pedang Samurai ditampilkan pada Gambar 5 di bawah ini (World Steel Association, 2012).



Gambar 5 Pedang Samurai

Pedang ini adalah senjata militer sebagai pemotong yang sangat kuat dan efektif dan mampu menahan tekanan mendadak yang besar.

Ilmu metalurgi kini mendukung desain material canggih seperti paduan super untuk turbin jet, logam amorf, dan logam memori bentuk (*shape memory alloys*) yang menjadi dasar teknologi kedokteran dan kedirgantaraan.

Pada *shape memory alloys*, setelah mengalami deformasi, memiliki kemampuan untuk kembali ke ukuran dan bentuk semula setelah diberi perlakuan panas yang sesuai. Material tersebut "mengingat" ukuran/bentuk sebelumnya. Deformasi biasanya dilakukan pada suhu yang relatif rendah, sedangkan memori bentuk terjadi saat pemanasan. Material yang memiliki sifat demikian adalah paduan nikel-titanium (Nitinol) dan paduan tembaga (Cu-Zn-Al dan Cu-Al-Ni). Material tersebut mengalami termoelastis, karena deformasi bersifat tidak permanen. Regangan deformasi maksimum yang dapat dipulihkan untuk material ini berkisar sekitar 8%. Aplikasi "material pintar" (karena merasakan dan merespons perubahan lingkungan, yaitu temperatur) ini, adalah untuk sambungan pipa tanpa las, saluran hidrolik pada pesawat terbang, sambungan pipa bawah laut, pada kapal dan kapal selam, bingkai kacamata, kawat gigi untuk meluruskan gigi, antena yang dapat dilipat, pembuka jendela rumah kaca, katup kontrol anti-luka bakar pada pancuran, pakaian dalam wanita, katup *sprinkler* api, dan aplikasi biomedis (seperti filter pembekuan darah, *stent* koroner yang dapat memanjang sendiri, dan jangkar tulang) (William D. Callister & Rethwisch, 2018).

5.3 Metalurgi sebagai Teknologi

Teknologi metalurgi yang paling kuno adalah pengecoran. Produk logam pertama mungkin terbuat dari timbal. Bagian logam yang terbuat dari tembaga dengan cara ditempa (lebih dari 9000 tahun SM) lebih dikenal (Głównia, 2017). Hingga abad ke-18, metalurgi hanya berkaitan dengan praktik metalurgi dengan metode tradisional peleburan, pencairan, dan pengolahan logam. Penyebaran pengetahuan ini tidak merata di seluruh dunia tetapi bergantung pada kemampuan peradaban untuk menciptakan teknik baru dan memanfaatkan teknik yang sudah dikenal (Tylecote, 1992). Metalurgi bertransformasi menjadi teknologi saat prinsip-prinsip ilmiah diterapkan dalam perancangan alat, proses, dan sistem produksi logam.

Salah satu produk teknologi metalurgi untuk memahami tata surya, adalah model objek ruang angkasa yang dinamakan Bola Armiler dengan Globe Langit yang berputar. Pada Gambar 6 di bawah ini adalah Bola Armiler dengan Globe Langit yang terbuat dari kuningan berlapis emas, dengan tinggi 53 cm, dan peninggalan tahun 1713 M (Antiquariaat FORUM & Antiquariat INLIBRIS, 2021).



Gambar 6 Bola armiler dengan globe langit

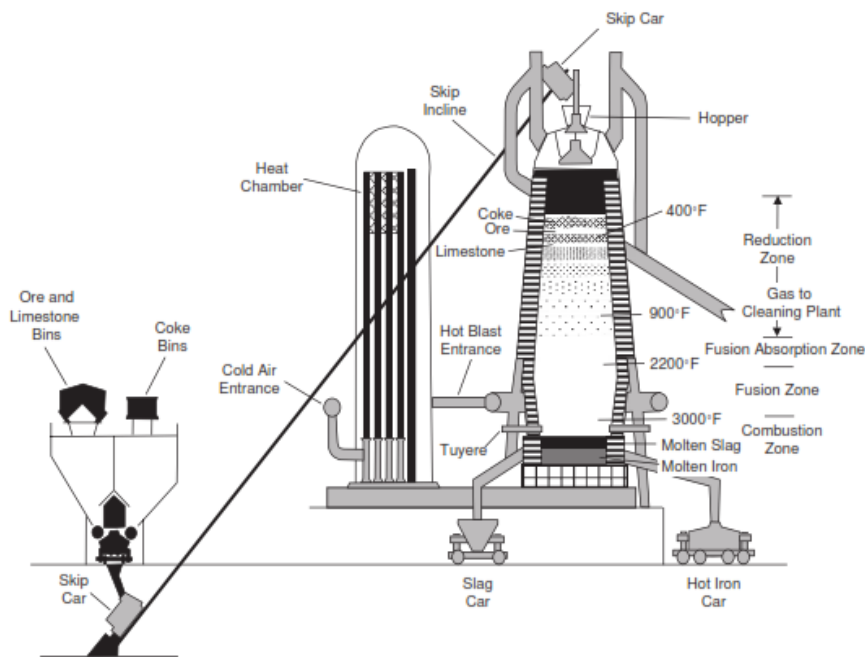
Teknologi metalurgi sebagai penerapan dari ilmu metalurgi, sehingga (1) metalurgi fisik, menerapkan *metallography* dan *heat treatment*; (2) metalurgi ekstraktif, diterapkan pada proses pirometalurgi (menggunakan suhu tinggi, seperti pada peleburan dan pemanggangan), hidrometalurgi (menggunakan larutan akuatik, seperti pelindian/*leaching*, ekstraksi pelarut), dan elektrometalurgi (menggunakan arus listrik, seperti pada proses *electrowinning* dan *electrorefining*); dan (3) metalurgi mekanik, yang aplikasinya pada *metal forming* (pembentukan logam) dan metalurgi *machining*. Selain tiga teknologi pada cabang tersebut, terdapat teknologi yang bersentuhan dengan metalurgi dan mendukung pengembangan teknologi logam. Teknologi tersebut adalah proteksi logam (*coating*, *electroplating*, *electroless plating*) dan korosi; *failure analysis* (analisis kegagalan); *powder metallurgy* (metalurgi serbuk), metalurgi *welding*; *casting* (pengecoran); *steel making* (pembuatan baja); baja khusus & paduan super; *surface engineering* (rekayasa permukaan); dan *material joining* (penyambungan material).

Proses pengelasan otomatis, penempaan presisi, pelapisan logam dengan plasma, dan peleburan menggunakan busur listrik adalah hasil dari perpaduan ilmu material, mekanika, dan rekayasa proses. Dalam industri kendaraan listrik dan energi terbarukan, teknologi metalurgi mendukung pembuatan baja ringan kekuatan tinggi, magnet permanen berbasis neodimium, besi, dan boron ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$), serta komponen penyimpan panas berbasis paduan Fe-Cr-Al.

5.4 Metalurgi sebagai Industri

Sebagai industri, metalurgi mencakup seluruh rantai nilai dari pertambangan, pemrosesan logam, pembuatan komponen, hingga produk akhir. Industri besi dan baja menyumbang utama infrastruktur modern, seperti jalan, jembatan, rel kereta api, gedung bertingkat, hingga kapal laut dan kendaraan berat.

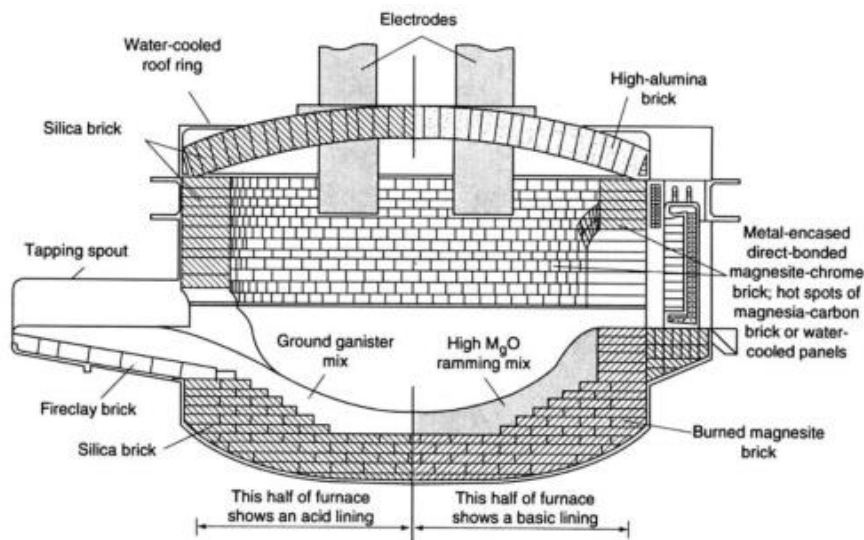
Dalam industri, antara besi dan baja dibedakan baik karakteristik material, proses pembuatan, maupun dalam aplikasinya. Pada proses pembuatan besi (*iron making*) digunakan dapur peleburan yang biasa disebut sebagai tanur atau tungku. Salah satu tungku yang digunakan adalah *blast furnace* (tanur tinggi) yang diperlihatkan pada Gambar 7 di bawah ini (ASM International, 2008).



Gambar 7 Tungku peleburan besi

Pada proses peleburan besi digunakan bahan mentah *ore* (bijih besi) atau dicampur *scrap* (besi tua), kokas, dan batu kapur. Bahan mentah yang berupa mineral besi oksida mengalami reduksi dengan gas reduktor, CO. Hasil dari peleburan besi adalah *pig iron* (besi kasar cair) dengan kadar karbon 4% - 5%.

Proses pembuatan baja (*steel making*) menggunakan bahan baku dari besi kasar dan atau besi tua menggunakan tanur pembuatan baja. Prinsip pembuatan baja adalah mengatur kadar C 0,05% - 2%, mengatur kadar Mn, Si, Ni, Cr, Cu, Sn, dan lain-lain sesuai kebutuhan jenis baja. Selain itu, terdapat proses *dephosphorization* dan *desulphurization*, yakni proses pengurangan kedua unsur pengotor ini (fosfor dan belerang) yang tujuannya adalah untuk meningkatkan kualitas dan kekuatan baja. Proses pembuatan baja yang dikembangkan pada tahun 1856 adalah proses Bessemer dan kemudian tahun 1858 dikembangkan proses tungku terbuka. Tahun 1948 dimulai proses *Basic Oxygen Furnace* (BOF) dan tahun 1900 sejak ditemukan busur listrik dikembangkan *Electric Arc Furnace* (EAF), sebagai industri baja modern menggunakan listrik. EAF atau tanur busur listrik memiliki konstruksi seperti yang ditampilkan pada Gambar 8 di bawah ini (ASM International, 2008).



Gambar 8 Tungku busur listrik pembuatan baja

EAF dapat mengurangi emisi karbon hingga 50% dibandingkan dengan tanur tinggi, terutama jika ditenagai oleh sumber energi terbarukan. Studi menunjukkan bahwa transisi ke produksi baja berbasis EAF di Eropa berpotensi menyebabkan pengurangan emisi CO₂ dari pembuatan baja lebih dari 40% pada tahun 2030. Kemajuan menarik di bidang metalurgi adalah pembuatan baja berbasis hidrogen. Proses ini menggantikan bahan bakar berbasis karbon dengan hidrogen hijau (sebagai agen pereduksi) dalam produksi baja, yang dapat mengurangi emisi CO₂. Proyek percontohan HYBRIT di Swedia, telah menunjukkan bahwa hidrogen dapat menghasilkan baja dengan emisi karbon hampir nol (Azanaw, 2024).

Menurut data World Steel Association (2022), industri baja menyerap lebih dari 6% energi dunia, tetapi juga menjadi target utama dalam agenda dekarbonisasi dan *green technology*. Oleh karena itu, metalurgi juga berperan penting dalam transisi energi berkelanjutan, misalnya melalui pengembangan proses peleburan besi berbasis hidrogen untuk mengurangi emisi karbon.

6. Kontribusi Besi dalam Teknologi Masa Depan

Memasuki era revolusi industri 5.0 dan transformasi digital global, besi tetap mempertahankan perannya sebagai logam fundamental dalam menopang kemajuan teknologi masa depan. Di tengah gelombang inovasi yang mengandalkan kecerdasan buatan (AI), *Internet of Things* (IoT), dan energi terbarukan, besi dan paduannya khususnya baja terus berevolusi untuk memenuhi kebutuhan teknis, lingkungan, dan sosial umat manusia. Paduan baja berkinerja tinggi telah secara signifikan meningkatkan daya tahan dan kekuatan material, lebih efisien untuk membangun struktur yang besar dan kompleks, menawarkan potensi untuk mempercepat jadwal konstruksi, mengurangi biaya tenaga kerja, meminimalkan limbah material, dan berkontribusi pada keberlanjutan dengan mengoptimalkan penggunaan sumber daya (Azanaw, 2024).

6.1 Besi dalam Teknologi Cerdas dan Infrastruktur Masa Depan

Dengan meningkatnya kebutuhan terhadap konstruksi cerdas (*smart infrastructure*), seperti gedung tahan gempa, jembatan pintar, dan rel kereta berkecepatan tinggi, baja ringan kekuatan tinggi (*Advanced High Strength Steel/AHSS*), terutama HSLA (*High Strength Low Alloy*) dan *Ultra High Strength Steel* (UHSS) menjadi pilihan utama. Baja jenis ini, berbasis paduan besi dengan karbon, mangan, dan boron, memiliki kekuatan tarik ultra-tinggi (>1000 MPa), tetapi tetap ringan, sehingga mengurangi konsumsi energi dan biaya transportasi. HSLA dan UHSS

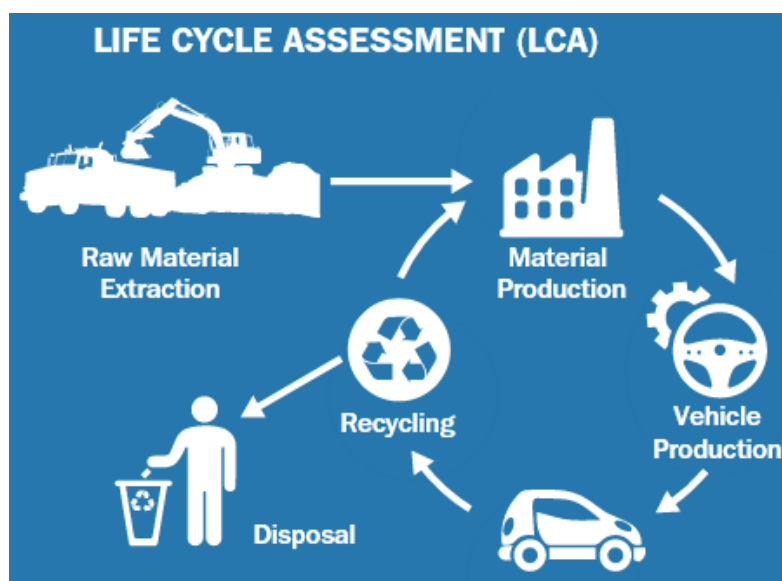
digunakan dalam gedung-gedung tinggi, jembatan bentang panjang, dan infrastruktur penting, dimana kinerja dan daya tahan sangat penting. Misalnya, penggunaan UHSS dalam konstruksi gedung pencakar langit seperti *Jeddah Tower* telah memungkinkan pencapaian ketinggian yang belum pernah terjadi sebelumnya sekaligus memastikan stabilitas terhadap angin dan gempa bumi yang ekstrem (Azanaw, 2024).

Dalam arsitektur masa depan, sistem modular *steel structures* memungkinkan pembangunan cepat, daur ulang tinggi, dan fleksibilitas adaptif terhadap perubahan fungsi bangunan. Struktur cerdas ini untuk meningkatkan ketahanan, keberlanjutan, dan efisiensi infrastruktur (Albzaie, 2024), (Narayanan, 2025). Dengan sistem ini, besi tak lagi hanya digunakan sebagai tulang punggung fisik, tetapi juga sebagai medium konektivitas, integrasi sensor, dan otomasi cerdas.

6.2 Besi dalam Kendaraan Ramah Lingkungan

Industri otomotif dan transportasi masa depan sangat bergantung pada paduan besi untuk pengembangan kendaraan listrik dan transportasi massa rendah emisi. Besi menjadi bahan utama dalam: (1) rangka kendaraan ringan dan aman; (2) cangkang motor listrik dan sistem pendingin; dan (3) pembuatan magnet permanen berbasis paduan neodimium-besi-boron (NdFeB). Industri otomotif telah lama bergantung pada material baja untuk memastikan keamanan, kinerja, dan daya tahan kendaraan. Namun, dalam beberapa tahun terakhir, permintaan material yang lebih efisien, ringan, dan kuat telah menyebabkan peningkatan penggunaan paduan Baja Kekuatan Tinggi Tingkat Lanjut (AHSS). Baja ini direkayasa dengan elemen paduan khusus, seperti karbon, mangan, dan kromium, untuk mencapai sifat mekanik yang unggul. AHSS telah merevolusi cara produsen otomotif mendesain kendaraan, menawarkan kombinasi unik antara kekuatan, kemampuan bentuk, dan keringanan yang tidak dapat diberikan oleh baja tradisional (Jalloh, 2025).

Sifat-sifat baja, termasuk daya tahan dan kemampuan daur ulangnya, menjadikannya vital bagi masyarakat modern. Industri baja harus berkomitmen untuk memproduksi produk yang menerapkan proses yang mencapai keberlanjutan lingkungan, sosial, dan ekonomi. Produksi material (besi baja) dapat menyumbang sebagian besar emisi siklus hidup kendaraan secara keseluruhan, yang memiliki LCA (penilaian siklus hidup), seperti yang digambarkan pada Gambar 9 di bawah ini (AISII, 2020).



Gambar 9 LCA kendaraan

Studi LCA menunjukkan bahwa pengurangan bobot kendaraan dengan AHSS dibandingkan aluminium menghasilkan penghematan dari 300 juta metrik ton emisi emisi gas rumah kaca (GRK) pada tahun 2038, yang setara dengan emisi yang dihasilkan dari pembakaran 45 miliar galon bensin. Pada tahun 2053, tambahan 100 juta metrik ton akan dihemat, sehingga total penghematan emisi GRK mencapai lebih dari 400 juta metrik ton. Oleh karena itu, jika mempertimbangkan siklus hidup kendaraan, baja adalah pilihan paling efektif secara lingkungan karena intensitas energinya yang lebih rendah dan emisi selama fase manufaktur, pengurangan massa yang signifikan selama fase mengemudi dan kemampuan daur ulang di akhir masa pakai kendaraan. Produksi material menyumbang hingga 30 persen dari total emisi GRK pada kendaraan bermesin pembakaran internal (ICE) dan sebanyak 47 persen pada kendaraan listrik baterai (BEV). Pembuatan baja menghasilkan emisi CO₂ yang jauh lebih rendah dibandingkan bahan bodi lainnya seperti aluminium, magnesium, dan plastik yang diperkuat karbon (AISI, 2021).

Baja adalah material vital di sebagian besar kendaraan yang terus memainkan peran dominan di masa depan karena sifat mekaniknya yang sangat baik. Baja memenuhi kriteria utama pemilihan material yaitu kekakuan, kekuatan, kelelahan, kemampuan bentuk, ketahanan benturan, efektivitas biaya, kemampuan daur ulang, dan pengurangan bobot. Baja unggul dalam ketersediaan yang mudah dan rasio harga-kinerja yang ekonomis (Singh, 2016).

6.3 Besi dalam Teknologi Medis dan *Bioengineering*

Perpaduan ilmu teknik dengan biologi dan medis adalah bioteknologi dan teknik biomedis. Teknik biomedis berfokus pada pengembangan perangkat medis, biomaterial, dan teknologi baru. Selain biomaterial, paduan besi juga peran dalam bidang kesehatan dan *bioengineering* masa depan, di antaranya *stainless steel* (Dahi et al., 2025).

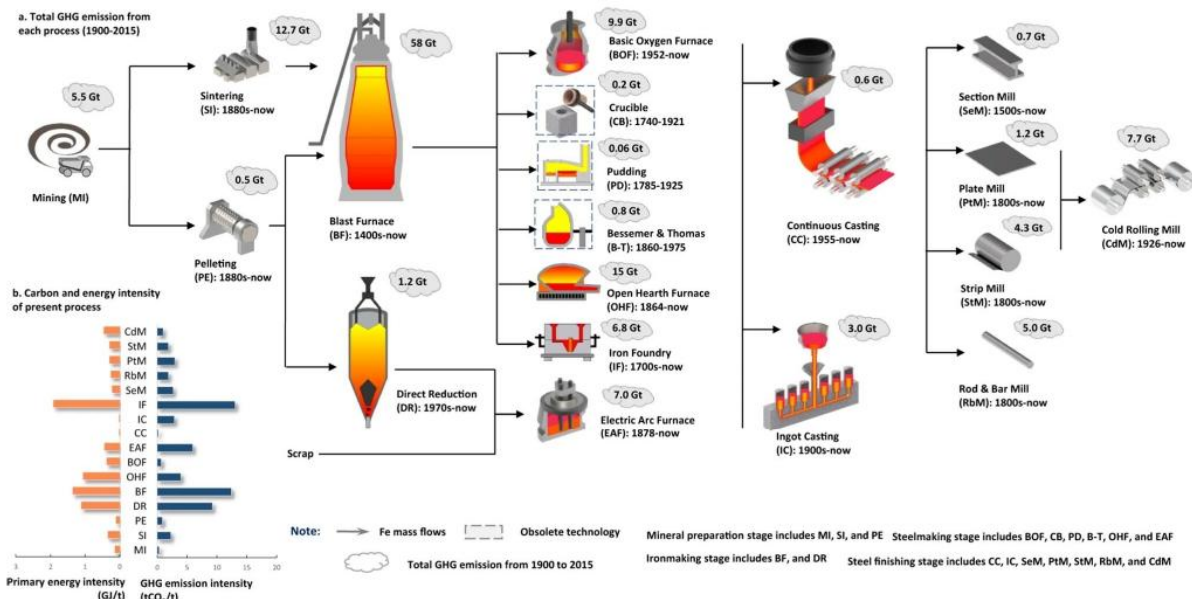
Biomaterial adalah material alami atau buatan yang digunakan untuk membuat implan guna menggantikan struktur biologis yang hilang atau rusak untuk mengembalikan bentuk dan fungsi. Biomaterial yang membutuhkan penggunaan jangka panjang, seperti implan ortopedi, memerlukan stabilitas fisik dan kimia yang baik, seperti baja tahan karat dan paduan titanium (Wang et al., 2022). Implan logam berbasis besi *biodegradable*, yang larut secara bertahap dalam tubuh tanpa menyebabkan reaksi toksik.

Nanopartikel besi magnetik (MnFe₂O₄) digunakan untuk penghantar obat secara presisi, terapi kanker dengan *hyperthermia*, pencitraan MRI (*Magnetic Resonance Imaging*), serta terapi dan diagnostik (*thyranostics*) (Ilhami, 2016). Dengan kemajuan bio-nanoteknologi, material berbasis besi akan memungkinkan munculnya sistem medis cerdas, seperti sensor dalam tubuh dan alat pemantau kondisi kesehatan yang terus menerus.

6.4 Besi dalam Transisi Energi dan Teknologi Hijau

Transisi energi mengacu pada pergeseran dari sumber energi berefisiensi rendah ke sumber energi berefisiensi tinggi. Merujuk kembali pada sejarah, masyarakat manusia telah mengalami dua transisi energi, dari era kayu bakar ke era batubara, dan akhirnya ke minyak. Fase transisi energi terbaru, dari energi berbasis karbon, terutama batubara dan minyak, ke sumber energi rendah karbon seperti gas, angin, matahari, dan tenaga air. Pergeseran menuju sumber energi terbarukan memerlukan transisi seluruh sistem energi, dengan konsekuensi sosial, ekonomi, dan ekologi yang signifikan yang meluas jauh melampaui sektor energi (Yang et al., 2024).

Produksi baja terdiri dari proses produksi primer dan produksi sekunder. Sekitar 90% produksi primer dilakukan menggunakan tanur tinggi (BF) diikuti oleh tanur oksigen dasar (BOF), yang mencakup sekitar 70% produksi baja global. Metode alternatif adalah tungku busur listrik besi reduksi langsung, yang berbeda jenis bijih besi yang digunakan, keadaan material saat direduksi, agen reduksi utama, dan keseimbangan masukan energi. Produksi baja sekunder dilakukan melalui dua jalur utama: (i) BOF, yang menggunakan besi cair dari BF dan skrap baja, dan (ii) tungku listrik (EF), yang dapat menggunakan hingga 100% skrap baja, menghasilkan 30% baja yang dibutuhkan. Produksi baja sekunder membutuhkan listrik dalam jumlah besar. Rute produksi baja dari tahun 1900 hingga 2015 yang menghasilkan emisi *greenhouse gas* digambarkan pada Gambar 11 di bawah ini (Guitar et al., 2025).



Gambar 11 Produksi baja (1900 – 2015) dengan emisi *greenhouse gas*

Dalam agenda global menuju *net zero emissions*, besi menjadi bagian dari solusi melalui inovasi seperti berikut. Dekarbonisasi sektor baja bersamaan dan paralel dengan transisi energi pada perekonomian (Durga et al., 2024). Penggunaan teknologi rendah karbon dan sumber energi terbarukan pada industri baja, dikenal sebagai *Green Steel*, yang sejalan dengan prinsip *Circular Economy*, karena ramah lingkungan, menghasilkan peningkatan penggunaan kembali sumber daya, pengurangan limbah, dan pengurangan jejak karbon selama produksi. Baja hijau adalah baja yang diproduksi dengan metode yang mengurangi emisi karbon secara signifikan, bahkan tanpa bahan bakar fosil, dan menggunakan energi terbarukan seperti hidrogen hijau atau teknologi inovatif seperti EAF yang ditenagai energi terbarukan. Teknologi baja hijau yang dikombinasikan dengan prinsip ekonomi sirkuler dapat mewujudkan pembangunan berkelanjutan. Industri baja juga dapat membantu pertumbuhan ekonomi dan melindungi lingkungan dengan memastikan dapat mengoptimalkan penggunaan sumber daya, meningkatkan daur ulang, dan menggunakan teknologi produksi rendah emisi yang baru (Das & Maji, 2025).

Adopsi teknologi memiliki konsekuensi negatif bagi lingkungan dan masyarakat. Oleh karena itu dibutuhkan teknologi hijau atau teknologi bersih. Teknologi baru ini mempertimbangkan pengaruh inovasi terhadap lingkungan, baik sementara maupun jangka panjang. Efisiensi energi, daur ulang, masalah keselamatan dan kesehatan, sumber daya terbarukan, dan lainnya tercakup dalam teknologi hijau (Kumar, 2020).

Baja adalah material dasar yang matang dan merupakan salah satu produk massal yang paling ramah lingkungan karena tingkat daur ulangnya yang tinggi dan jumlah energi yang relatif rendah yang dibutuhkan untuk pembuatannya. Produksi baja berperan dalam penerapan teknologi hijau melalui manufaktur hijau, yang memproduksi produk menggunakan material dan proses yang meminimalkan dampak negatif terhadap lingkungan, membantu mengurangi gas rumah kaca, menghemat energi dan sumber daya alam, meningkatkan keselamatan bagi konsumen, masyarakat, dan karyawan, serta meningkatkan profitabilitas organisasi. Manufaktur hijau pada produksi baja melalui penggunaan sistem energi terbarukan, peralatan teknologi bersih, mengurangi polusi dan limbah dengan meminimalkan penggunaan sumber daya alam, mendaur ulang dan menggunakan kembali limbah, dan mengurangi emisi. Proses peleburan bebas karbon menggunakan hidrogen sebagai reduktor. Daupulang besi tua untuk meningkatkan kandungan lokal produksi baja, mengurangi konsumsi energi, dan emisi karbon dioksida. Terak pembuatan baja dimanfaatkan sebagai bahan untuk lapisan dasar jalan dalam konstruksi jalan dan proyek teknik sipil lainnya, reformer berbasis kalsium oksida (untuk perbaikan tanah), dan bahan baku untuk semen, serta pupuk karena sifat dan fungsinya yang sangat baik (Tiwari et al., 2017).

7. Penutup

Besi bukan hanya sekadar unsur kimia bernomor atom 26 dalam tabel periodik. Dalam pandangan Islam dan ilmu pengetahuan modern, besi adalah simbol kekuatan, manfaat, serta tanggung jawab peradaban. Penyebutannya secara eksplisit dalam Al-Qur'an memberikan isyarat bahwa besi bukan hanya material strategis, tetapi juga ayat kauniyah yang mengandung pesan teologis, filosofis, dan etik. Melalui hadist-hadist Nabi Muhammad, didapati bagaimana besi digunakan secara bijak dalam konteks perlindungan diri, pertahanan, dan pembangunan.

Dari segi historis dan ilmiah, metalurgi besi (termasuk baja) telah menjadi pilar utama kemajuan peradaban. Besi tetap menjadi tulang punggung teknologi masa depan. Dari kendaraan listrik, sistem energi bersih, teknologi medis presisi, hingga arsitektur pintar, besi bertransformasi dari sekadar bahan struktural menjadi material multifungsi dan bernilai tinggi.

Tulisan ini memandang bahwa, integrasi antara wahyu dan sains bukanlah kontradiksi, melainkan sinergi yang harus terus diperjuangkan. Umat Islam tidak boleh hanya menjadi pengguna teknologi, tetapi juga produsen dan pengembang saintek sekaligus pengarah, koridor, dan penjaga nilai dalam inovasi saintek, termasuk dalam bidang metalurgi. Tulisan ini diharapkan menjadi salah satu upaya kecil dalam mendorong lahirnya paradigma teknologi yang tidak hanya berorientasi pada efisiensi dan profit, tetapi juga berakar pada nilai-nilai transendental yang membentuk manusia seutuhnya.

Referensi

- AISI. (2020). *Steel Sustainability in The Construction Market*. American Iron and Steel Institute. <https://www.steel.org/>
- AISI. (2021). *Steel Industry Role in the Future of Electrified Vehicles*.
- Al-Hassani, S. (2018). *Filling the Gap in the History of Pre- Modern Industry: 1000 Years of Missing Islamic Industry*. <https://muslimheritage.com/filling-gap-history-pre-mod-industry/>
- Albzaie, M. (2024). Smart Materials and Smart Structures: Transforming Engineering and Infrastructure. *International Journal of Civil and Structural Engineering Research*, 12(2), 42–47. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.14092788>
- Anggara, D. R. A., Asnawi, A. R., Nasution, A., & Harun, L. (2023). Mengungkap Rahasia

- Besi dalam Al-Qur'an Menurut Zaġlul Rāġib Muḥ Ammad An-Najjār (Pendekatan At-Tafsīr Al-Ilmī). *MAGHZA: Jurnal Ilmu Al-Qur'an dan Tafsir*, 8(2), 192–206. <https://doi.org/https://doi.org/10.24090/maghza.v8i2.7386>
- ANRI. (2022). *Inventaris Arsip Bacharuddin Jusuf (B.J) Habibie 1959-2010*. Direktorat Pengolahan Deputy Bidang Konservasi Arsip Arsip Nasional Republik Indonesia. https://www.anri.go.id/download/inventaris-arsip-bacharuddin-jusuf-habibie-19592010-1698285281?utm_source
- Antiquariaat FORUM & Antiquariat INLIBRIS. (2021). *The Golden Age of Arab Science: A Catalogue of Early Western Editions and Some Manuscripts*.
- Aprilia Dewi Ardiyanti. (2022). Kajian Integrasi Islam dan Sains pada Pendayagunaan Besi Oksida dalam Bidang Medis. *Kaunia: Integration and Interconnection Islam and Science*, 17(2), 55–60. <https://doi.org/10.14421/kaunia.3362>
- Ashby, M., Shercliff, H., & Cebon, D. (2007). *Materials: Engineering, Science, Processing and Design* (First). Elsevier Ltd.
- ASM International. (2008). *Elements of Metallurgy and Engineering Alloys* (F. C. Campbell (Ed.)). ASM International. <https://doi.org/https://doi.org/10.31399/asm.tb.emea.9781627082518>
- Azanaw, G. M. (2024). Revolutionary Steel Structures: A Comprehensive Review of Current Trends and Future Directions. *Applied Engineering*, 8(2), 89–101. <https://doi.org/https://doi.org/10.11648/j.ae.20240802.14>
- Aziza, A., & Rafi'i, M. (2025). The Legacy of Muslim Scientists and Their Contributions To Modern Science and Islamic Jurisprudence. *Proceeding International Seminar on Islamic Studies*, 6(1), 1543–1550.
- Balley, A. R. (1967). *A Text-book of Metallurgy* (Second). Macmillan Education. <https://doi.org/10.1007/978-1-349-00088-3>
- Baqi, M. F. A. (2017). *Shahih Bukhari Muslim* (M. A. bin Usman & A. F. B. Taqiy (Eds.)). PT Elex Media Komputindo.
- Dadach, Z. E. (2015). *Scientific Facts in the Quran*. <https://zineddinedadach.com/>
- Dahi, F. K. A., Malallah, R. R., Malallah, R. R., & Abdalhassan, N. A. (2025). Biomedical Engineering and Medical Device Technology: Innovations in Life-Saving Solutions and Device Design. *American Journal of Botany and Bioengineering*, 2(3), 278–297. <https://biojournals.us/index.php/AJBB>
- Das, A., & Maji, S. (2025). Circular Economy and Green Steel - A Path to Sustainable Development in Emerging Economies. *Proceedings of the Conference Series on Sustainable Architecture Circular Economy (SACE 2025)*. <https://doi.org/10.2991/978-94-6463-964-3>
- Denton, M. (2020). *The Miracle of The Cell* (First). Discovery Institute Press. <http://www.discoveryinstitutepress.com/>
- Denton, M. (2022). *The Miracle of Man: The Fine Tuning of Nature for Human Existence*. Discovery Institute Press. discoveryinstitutepress.com
- Durga, S., Speizer, S., & Edmonds, J. (2024). The Role of the Iron and Steel Sector in Achieving Net Zero U.S. CO2 Emissions by 2050. *Energy and Climate Change*, 5(August). <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2024.100152>
- Fahim, F. (2016). *THE HOLY QURAN and Science A Book Of Scientific Miracles*.
- Gheraout, D. (2017). The Holy Koran Revelation: Iron Is a “Sent Down” Metal. *American Journal of Environmental Protection*, 6(4), 101–104. <https://doi.org/10.11648/j.ajep.20170604.14>
- Głownia, J. (2017). *Metallurgy and Technology of Steel Castings* (First). Bentham Science Publishers Ltd.
- Guitar, M. A., Thome, A., & Britz, D. (2025). How Green Will the Green-Steel Production be?

- Discover Sustainability*, 6(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/s43621-025-01254-1>
- Herbst, W., & Greenwood, J. (2019). *The tell-tale clue to how meteorites were made, at the birth of the solar system.* The Conversation. <https://doi.org/https://doi.org/10.64628/AAI.nammc6s9c>
- Ilhami, F. B. (2016). Efektifitas Nanopartikel Magnetik (MnFe₂O₄) Berlapis HSA Tertarget Reseptor Folat terhadap Sel Kanker. *Jurnal Biosains Pascasarjana*, 18, 140–152. <https://doi.org/10.20473/jbp.v18i2.2016.140-149>
- Jalloh, M. (2025). Revolutionizing the Automotive Industry with Advanced Strength Steel Alloys. *Journal of Civil and Environmental Engineering ISSN:*, 16(1), 1. <https://doi.org/10.37421/2165-784X.2025.15.589>
- Khan, S. A. (2023). A Study on the Muslim Scientists and Innovators Across the World. *International Journal of Innovative Research in Technology*, 9(9), 253–260.
- Kumar, P. (2020). An Overview on Green Technology. *Journal of The Gujarat Research Society*, 22(1), 1341–1347.
- Kustomo, K., Nuha, M. U., Susilowati, M., Aghnia, T. B., & Pradani, H. G. A. W. (2022). Besi sebagai Unsur Kimia dari Langit: Tinjauan Sains dan Al-Qur'an. *Cakrawala: Jurnal Studi Islam*, 17(2), 99–106. <https://doi.org/10.31603/cakrawala.7389>
- Nanda, I. P. (2025). *Transformasi Teknologi Pengecoran Logam untuk Daya Saing Global.*
- Narayanan, S. (2025). A Vision on the Future of Resilient and Smart Bridge Infrastructure. *International Journal of Bridge Engineering, Management and Research*, 2(2), 1–4. <https://doi.org/10.70465/ber.v2i2.29>
- Nasr, S. H., Dagl, C., Dakake, M. M., Lumbard, J., & Rustom, M. (Eds.). (2015). *The Study Quran: A New Translation and Commentary.* HarperOne.
- Nizar, M. Z. bin. (2011). Ikonografi Zulfikar dalam Sejarah Hubungan Turki dan Nusantara. *Suhuf*, 4(1), 111–141.
- Noryani, I. (2022). Kimia dalam Pandangan Islam: Upaya Mencari Titik Temu Antara Sains dan Agama. *Global Islamika: Jurnal Studi Dan Pemikiran Islam*, 1(1), 44–50. <https://doi.org/https://doi.org/10.5281/zenodo.7030439> Kimia
- Novie, K., Rahmah, N. S. E., & Nafisah, S. H. (2024). Keberadaan Besi dalam Kosmos: Perspektif Ilmiah dan Al-Qur'an. *Religion: Jurnal Agama, Sosial, Dan Budaya*, 3(2), 319–327. <https://maryamsejahtera.com/index.php/Religion>
- Nuraini. (2020). Mesopotamia dan Mesir Kuno: Awal Peradaban Dunia. *ADABIYA*, 22(1), 1–17.
- Pilchin, A. N., & Eppelbaum, L. V. (2006). *IRON and Its Unique Role in Earth Evolution.* Instituto de Geofísica.
- Putra, Y. A., & Mujab, M. (2025). Islamic Contributions to Scientific and Technological Development in Astronomy, Mathematics, Medicine, and Chemistry. *El Harakah: Jurnal Budaya Islam*, 27(2), 367–390. <https://doi.org/10.18860/eh.v27i2.37106>
- Salmah. (2016). Besi dalam Perspektif Hadis. *Batusangkar International Conference*, 641–658.
- Sayed, A. (2024). *Zulfiqar: The Most Powerful and Deadly Sword in the History of the World.* <https://abu-sayed.medium.com/zulfiqar-the-most-powerful-and-deadly-sword-in-the-history-of-the-world-c6b56dc2a59e>
- Singh, M. K. (2016). Application of Steel in Automotive Industry. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 6(7), 246–253. www.ijetae.com
- Sofian, H. O. (2021). Perkembangan Teknologi Tungku Lebur Logam Besi pada Zaman Kuno di Indonesia. *KALPATARU, Majalah Arkeologi*, 30(2), 141–152.
- Somayyeh Karami-Mohajeri, Soltani, M., Oghabian, Z., & Mohammad Khaksari Hadad. (2025). The Role of Metallurgy in the Holy Qur'an: Historical Contexts and Contemporary Scientific Perspectives. *Hamdard Islamicus*, 48(1), 99–116.

- Spoerl, J. S. (2024). *A Brief History of Iron and Steel Production*.
- Syauqi, A., Kastalani, A., Dhaha, A., Asmawati, Widuri, H., Rafiqah, J., Karolina, Lamnah, Humaidi, M., Syarwani, M., Firdaus, M. S., Tupan, M., Mukri, Rafie, Saidaturrabi'ah, Saifurrahman, Fatimah, S., Yunaidah, S., Nisa, S. D., ... Marlina, Y. (2016). Sejarah Peradaban Islam. In Badrian (Ed.), *Sejarah Peradaban Islam* (First). ASWAJA PRESSINDO. www.aswajapressindo.co.id
- Tiwari, M., Ahmad, S., & Alam, S. (2017). Production of Green Steel Through Green Manufacturing using Most Innovative Green and Cleaner Technology. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 6(4), 668–676. <https://doi.org/10.5281/zenodo.557206>
- Tylecote, R. F. (1992). *A History of Metallurgy* (Second). The Institute of Materials.
- Umar, Kiram, Y., & Yudi, A. A. (2020). Hemoglobin Content and Maximum Aerobic Capacity. *Proceedings of the 1st Progress in Social Science, Humanities and Education Research Symposium (PSSHRS 2019)*, 464(Psshers 2019), 966–971. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>
- Uzun, A., & Vatansever, F. (2008). Ismail Al Jazari Machines and New Technologies. *Acta Mechanica Et Automatica*, 2(3), 91–94.
- Wang, L., Xie, L., & Wei, D. (2022). Editorial: Metallic Alloys in Medical Applications. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, Editorial(6 October), 1–2. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2022.1041295>
- Wertime, T. A. (1964). Man's First Encounters with Metallurgy. *Science*, 146(3649), 1257–1267.
- Wertime, T. A. (1973). The Beginnings of Metallurgy: A New Look. *Science*, 182, 875–887.
- William D. Callister, J., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: Introduction*. John Wiley & Sons, Inc. https://doi.org/10.1142/9789814374064_0002
- World Steel Association. (2012). *The White Book of Steel*. Pyramidion.be. worldsteel.org/steelstory
- Yahya, H. (2005). *Allah's Miracles in The Qur'an*. Bookwork. www.goodwordbooks.com%0ATranslated
- Yang, Y., Xia, S., Huang, P., & Qian, J. (2024). Energy Transition: Connotations, Mechanisms and Effects. *Energy Strategy Reviews*, 52, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2024.101320>