

Pengembangan Paduan Cor Oxide Dispersion Strengthened Fe-Ni-Cr/YO: Material Tahan Suhu Tinggi untuk Aplikasi Potensial di Bidang Energi dan Nuklir = Development of Cast Oxide Dispersion Strengthened Fe-Ni-Cr/YO Alloys: High-Temperature-Resistant Materials for Potential Applications in the Energy and Nuclear Fields

Parikin Farihin, author

Deskripsi Lengkap: <https://lib.ui.ac.id/detail?id=9999920573833&lokasi=lokal>

Abstrak

Indonesia tengah memasuki era baru dalam pemanfaatan energi nuklir sebagai bagian dari strategi nasional untuk memenuhi kebutuhan energi secara berkelanjutan. Target nasional Net Zero Emissions (NZE) pada tahun 2060 menuntut pengurangan signifikan emisi karbon, sehingga mendorong pengembangan teknologi energi bersih, termasuk energi nuklir. Dalam konteks ini, Pusat Riset dan Teknologi Reaktor Nuklir di bawah Organisasi Riset Tenaga Nuklir – BRIN tengah mengembangkan desain Small Modular Reactor (SMR) dan Microreactor sebagai bagian dari reaktor generasi lanjut. Pengembangan reaktor nuklir generasi lanjut menuntut material struktur yang mampu beroperasi pada kondisi ekstrem, khususnya suhu tinggi hingga 1200°C sesuai kebutuhan reaktor Generasi IV. Kejadian kecelakaan nuklir Fukushima mendorong kebutuhan eksplorasi material baru yang tidak berbasis zirkonium, sehingga menantang para periset material untuk merancang paduan yang lebih andal dan aman. Salah satu kandidat unggulan untuk aplikasi ini adalah paduan Oxide Dispersion Strengthened (ODS) berbasis Fe, yang dikenal memiliki ketahanan termal, iradiasi, oksidasi, serta sifat mekanik yang superior. Paduan ini mengandung partikel oksida nanoskala yang terdispersi merata dalam matriks logam berbasis Fe, membentuk sistem komposit yang tahan terhadap pembengkakan, oksidasi, dan deformasi perayapan. Meskipun ODS feritik unggul dalam ketahanan terhadap pembengkakan akibat iradiasi, sistem austenitik (Fe–Ni–Cr) menawarkan stabilitas fasa dan kekuatan mekanik yang lebih tinggi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan paduan cor ODS berbasis Fe–Ni–Cr–YO dengan pendekatan sintesis baru (new process) yang menggabungkan metode powder metallurgy (P/M) dan pengecoran (melt casting). Pendekatan ini dirancang untuk mengatasi keterbatasan metode konvensional, terutama terkait homogenitas dispersi oksida dan skalabilitas produksi. Proses sintesis dilakukan melalui pendekatan new route, yang mencakup tahap pra-pengikatan (pre-linking) serbuk Fe–YO, proses ball milling selama 20 jam, sintering pada suhu 900°C, serta peleburan menggunakan metode arc melting dalam atmosfer argon. Variasi penambahan YO dalam rentang 0 hingga 2,0% berat digunakan untuk mempelajari secara komparatif pengaruhnya terhadap struktur mikro dan sifat-sifat material. Karakterisasi material dilakukan menggunakan berbagai metode, termasuk mikroskop optik, SEM, TEM, EDX, XRD, HRPD, pengujian mekanik (UTM), analisis ukuran partikel (PSA), dan pengukuran porositas dengan metode Archimedes. Pengujian ketahanan termal dilakukan menggunakan Simultaneous Thermal Analyzer (STA), sedangkan ketahanan oksidasi dievaluasi dengan menggunakan Magnetic Suspension Balance (MSB). Hasil menunjukkan bahwa metode sintesis yang dikembangkan mampu menghasilkan dispersi partikel oksida nano yang lebih merata dan struktur mikro yang padat serta isotropik. Ketahanan oksidasi meningkat signifikan dengan penambahan 1,0% YO, ditandai dengan penurunan laju oksidasi dari 0,060 mpy menjadi 0,0112 mpy. Pengujian STA menunjukkan stabilitas termal hingga 1450°C. Evolusi morfologi butir dari bentuk menyerupai jarum menjadi dendritik memperkuat sifat isotropik. Temuan menarik berupa

pola dispersi oksida YO berbentuk “nets-wrap” pada batas butir, yang berbeda dari pola “dots-nail” pada ODS konvensional, diduga memberikan kontribusi pada penguatan antar butir. Penambahan 1,0% berat YO menghasilkan material struktural suhu tinggi yang unggul, dengan titik leleh tinggi, ketahanan oksidasi tinggi, serta sifat mekanik baik pada 900°C. Komposisi optimal yang direkomendasikan adalah 57Fe–25Ni–17Cr–1YO (dalam % berat). Sistem paduan ini sangat potensial untuk komponen suhu tinggi seperti turbin gas, pipa uap super-panas, steam boiler, sistem penyimpanan energi (liquid battery), serta struktur reaktor generasi IV, khususnya pada heat exchanger dan sistem pendingin teras. Penelitian ini memberikan kontribusi penting dalam pengembangan material struktur reaktor generasi lanjut dan mendukung kemandirian teknologi material logam di Indonesia.

.....Indonesia is entering a new era in the utilization of nuclear energy as part of a national strategy to meet sustainable energy demands. The national target of achieving Net Zero Emissions (NZE) by 2060 requires a significant reduction in carbon emissions, thereby driving the development of clean energy technologies, including nuclear energy. In this context, the Center for Nuclear Reactor Research and Technology under the Nuclear Energy Research Organization – BRIN is currently developing designs for Small Modular Reactors (SMRs) and Microreactors as part of advanced reactor systems. The development of advanced nuclear reactors, such as Generation IV reactors, necessitates structural materials capable of operating under extreme conditions, particularly at high temperatures of up to 1200°C. Furthermore, the Fukushima nuclear accident has highlighted the urgent need to explore alternative structural materials that are not based on zirconium, thereby challenging materials researchers to design alloys that are more reliable and inherently safer under accident conditions. One of the most promising candidates for this application is the Fe-based Oxide Dispersion Strengthened (ODS) alloy, known for its superior thermal, irradiation, oxidation resistance, and mechanical properties. This alloy contains nanoscale oxide particles uniformly dispersed within an Fe-based metallic matrix, forming a composite system resistant to swelling, oxidation, and creep deformation. While ferritic ODS alloys excel in irradiation swelling resistance, austenitic systems (Fe–Ni–Cr) offer higher phase stability and mechanical strength. This study aims to develop cast Fe–Ni–Cr–YO ODS alloys using a novel synthesis (new process) approach that combines powder metallurgy (P/M) and melt casting methods. This approach is designed to overcome limitations of conventional methods, particularly regarding oxide dispersion homogeneity and production scalability. The synthesis process involves a new route comprising pre-linking of Fe–YO powders, ball milling for 20 hours, sintering at 900°C, and melting using arc melting in an argon atmosphere. Variations in YO content ranging from 0 to 2.0 wt.% were employed to comparatively study their effects on microstructure and material properties. Material characterization was conducted using multiple techniques, including optical microscopy, SEM, TEM, EDX, XRD, HRPD, mechanical testing (UTM), particle size analysis (PSA), and porosity measurement via the Archimedes method. Thermal stability was evaluated by Simultaneous Thermal Analyzer (STA), while oxidation resistance was assessed using Magnetic Suspension Balance (MSB). Results indicate that the developed synthesis method produces a more uniform dispersion of nanoscale oxide particles and a dense, isotropic microstructure. Oxidation resistance significantly improved with the addition of 1.0 wt.% YO, evidenced by a reduction in oxidation rate from 0.060 mpy to 0.0112 mpy. STA testing demonstrated thermal stability up to 1450°C. The grain morphology evolved from needle-like to dendritic forms, reinforcing isotropic properties. Notably, the YO oxide dispersion exhibited a “nets-wrap” pattern along grain boundaries, differing from the conventional “dots-nail” pattern of typical ODS alloys, which is believed to contribute to enhanced grain boundary strengthening. The addition of 1.0wt%

YO yields a superior high-temperature structural material with a high melting point, excellent oxidation resistance, and good mechanical properties at 900°C. The recommended optimal composition is 57Fe–25Ni–17Cr–1YO (wt.%). This alloy system shows high potential for high-temperature components such as gas turbines, superheated steam pipes, steam boilers, energy storage systems (liquid batteries), and Generation IV reactor structures, particularly heat exchangers and core cooling systems. This research provides significant contributions to the development of structural materials for advanced reactors and supports the independence of metal material technology in Indonesia.