



Dinamika Fraktal dalam Pertumbuhan Kristal Logam untuk Inovasi Material Baru

Taufiq Dalming^{1*}, Asyari Al Hutama Azis²

¹⁻²Program Studi Farmasi, Institut Ilmu Kesehatan Pelamonia, Indonesia

*Penulis Korespondensi: taufiqdalming@gmail.com¹

Abstract. Fractal structures play a crucial role in improving material properties due to their unique self-similar geometries. These geometrical patterns exhibit repetition at multiple scales, which can enhance surface area, strength, and other mechanical characteristics. This study investigates the influence of fractal patterns on the crystal growth and mechanical performance of metallic materials, focusing on strength, toughness, and hardness. Using a combination of computer simulations and laboratory experiments, the research models metal crystal formation under controlled conditions, where fractal characteristics are introduced through diffusion-limited aggregation (DLA) and electrodeposition methods. The findings reveal that embedding fractal patterns into the crystal growth process can increase material strength by approximately 20% compared to conventionally structured metals. This improvement is attributed to the efficient stress distribution within the fractal geometry, which minimizes stress concentration points and enhances resistance to fracture. Additionally, materials with fractal-based microstructures exhibit better toughness and deformation resistance, improving durability under mechanical load. The study also examines the underlying mechanisms of these effects, emphasizing the role of fractal-induced microstructural control in optimizing material integrity. These results demonstrate the significant potential of fractal-based material design in engineering stronger, lighter, and more flexible metallic components. The research contributes to the broader understanding of how geometric complexity can be harnessed to develop advanced materials for applications in construction, automotive manufacturing, and flexible electronics, thereby supporting the development of next-generation high-performance materials.

Keywords: Crystal growth; Fractal structures; Material strength; Metal crystals; Simulation.

Abstrak. Struktur fraktal memainkan peran penting dalam meningkatkan sifat fisik material karena karakteristiknya yang unik dan kompleks. Fraktal adalah pola geometris yang menunjukkan kesamaan diri pada berbagai skala, dan penerapannya dalam desain material dapat secara signifikan meningkatkan luas permukaan, kekuatan, dan sifat mekanik lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki pengaruh pola fraktal terhadap pertumbuhan kristal logam, dengan fokus pada efeknya terhadap sifat mekanik seperti kekuatan, ketangguhan, dan kekerasan. Penelitian ini menggunakan simulasi komputer dan eksperimen laboratorium untuk memodelkan pertumbuhan kristal logam di bawah kondisi yang terkendali, di mana pola fraktal diperkenalkan menggunakan model agregasi terbatas difusi (DLA) dan teknik elektrodeposisi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan pola fraktal pada proses pertumbuhan kristal dapat meningkatkan kekuatan material hingga 20% dibandingkan dengan material konvensional. Hal ini disebabkan oleh distribusi tegangan yang lebih efisien dalam material, karena struktur fraktal menghasilkan penyebaran gaya yang lebih merata dan mengurangi konsentrasi titik tegangan yang biasanya menyebabkan kegagalan material. Selain itu, pola fraktal juga berkontribusi pada peningkatan ketangguhan dan ketahanan terhadap deformasi, menjadikan material lebih tahan lama di bawah tekanan eksternal. Penelitian ini juga menggali mekanisme yang mendasari peningkatan tersebut, dengan fokus pada pengendalian fitur mikrostruktur yang difasilitasi oleh pola fraktal. Temuan ini memiliki implikasi penting untuk pengembangan material baru dengan sifat mekanik yang superior, menawarkan potensi aplikasi di berbagai industri, termasuk konstruksi, otomotif, dan elektronik fleksibel. Penelitian ini menyoroti potensi desain berbasis fraktal dalam mengoptimalkan kinerja material dan meningkatkan rasio kekuatan-terhadap-berat pada material industri.

Kata kunci: Kekerasan material; Kristal logam; Pola fraktal; Pertumbuhan kristal; Simulasi.

1. LATAR BELAKANG

Struktur fraktal memainkan peran penting dalam menentukan sifat fisik material karena sifatnya yang unik dan kompleks. Fraktal adalah konsep geometris yang memiliki karakteristik self-similarity, yang artinya bentuknya akan tetap sama meskipun diperbesar atau diperkecil pada berbagai skala. Penerapan konsep ini pada material memungkinkan pengembangan material fungsional dengan sifat permukaan yang sangat luas, seperti permukaan super-hidrofobik atau super-oleofobik (Kravchenko & Pudanova, 2019). Selain itu, struktur fraktal pada skala nano dapat mempengaruhi sifat makroskopik material, seperti kekuatan dan ketangguhan. Karakterisasi dimensi fraktal digunakan untuk mengukur kompleksitas permukaan patahan material, yang memberikan informasi penting mengenai perilaku mekanik material tersebut (Khamidulina & Nekrasova, 2018). Dalam konteks material bangunan, penerapan teori fraktal dapat digunakan untuk memodelkan sifat material dan prosesnya, seperti pengerasan pasta semen dan karakteristik struktural media berpori (Khamidulina & Nekrasova, 2018).

Struktur fraktal berperan kunci dalam pengembangan material baru dengan memungkinkan optimasi geometri melalui iterasi, yang menghasilkan material dengan indikator keandalan yang lebih baik (Li et al., 2024). Penggunaan struktur fraktal juga memungkinkan desain material dengan sifat optik yang kompleks, seperti nanopartikel dan film fraktal yang memiliki respons optik yang sangat luas (Vu, Truong, & Kim, 2022). Selain itu, kontrol mikrostruktur yang presisi dengan menggunakan fraktal dapat meningkatkan sifat mekanik material, seperti dalam pembuatan material dengan rasio kekuatan-terhadap-berat yang superior (Burtsev et al., 2019).

Penelitian tentang struktur fraktal sangat relevan untuk inovasi material dan aplikasi industri. Dalam industri elektronik fleksibel, struktur fraktal dapat digunakan untuk mengoptimalkan sifat mekanik-elektrik dan kinerja perangkat (Vu et al., 2022). Di bidang konstruksi, penerapan teori fraktal memungkinkan prediksi dan pengaturan sifat fisik dan mekanik beton dengan memilih atau memodifikasi komposisi agregat berdasarkan dimensi fraktal (Khamidulina & Nekrasova, 2018). Dalam bidang energi, struktur fraktal juga digunakan untuk mengembangkan material katalitik dengan aktivitas dan selektivitas yang lebih tinggi (Mousa & Rigby, 2024).

Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji pola pertumbuhan kristal logam berbasis teori fraktal. Penelitian ini akan memfokuskan pada tiga aspek utama: pertama, analisis morfologi permukaan logam setelah paparan pulsa laser mikrodetik untuk menentukan parameter yang mempengaruhi pertumbuhan kristal fraktal (Burtsev et al., 2019). Kedua, simulasi pertumbuhan kristal menggunakan model agregasi terbatas difusi (DLA) yang ditingkatkan untuk memverifikasi validitasnya dengan kristal yang dideposisi secara elektrodeposisi (Li et al., 2024; Jinsong, Yang, & Qiao, 2013). Ketiga, pengembangan algoritma baru untuk membangun objek fraktal yang dapat digunakan dalam diagnostik struktural nanomaterial (Tomchuk, 2021).

2. KAJIAN TEORITIS

Struktur fraktal adalah pola yang berulang pada berbagai skala, yang sering kali menunjukkan sifat self-similaritas. Artinya, bagian dari struktur tersebut menyerupai keseluruhan struktur pada skala yang lebih kecil (Nakouzi & Sultan, 2012). Fraktal didefinisikan melalui dimensi fraktal, yaitu ukuran non-integer yang menggambarkan kompleksitas dan ketidakteraturan suatu objek (Anitas, 2019). Konsep fraktal pertama kali diperkenalkan oleh Mandelbrot dan telah digunakan untuk menggambarkan berbagai fenomena alam, seperti garis pantai, awan, dan pegunungan (Fu et al., 2024). Dimensi fraktal ini sering digunakan untuk menjelaskan berbagai pola yang ditemukan dalam alam dan struktur buatan yang sangat kompleks.

Struktur fraktal telah diterapkan dalam berbagai disiplin ilmu teknik, termasuk dalam bidang teknik material dan rekayasa material. Dalam bidang ini, fraktal digunakan untuk memodelkan kompleksitas ruang pori dan fase padat dalam media berpori yang tidak teratur (Khamidulina & Nekrasova, 2018). Aplikasi lainnya termasuk optimasi scaffold berpori dalam biomaterial untuk meningkatkan integrasi jaringan dan kinerja mekanis (Dropka & Gradwohl, 2024), serta karakterisasi mikrostruktur komposit berbasis epoksi menggunakan analisis fraktal (Stajcic et al., 2022). Fraktal juga digunakan dalam desain material hibrida dengan aktivitas fotokatalitik, di mana struktur fraktal yang diproduksi dengan teknologi pencetakan 3D digunakan sebagai substrat untuk mengimobilisasi nanopartikel katalis, yang dapat meningkatkan efisiensi reaksi kimia (De Rancourt De Mimérand et al., 2019).

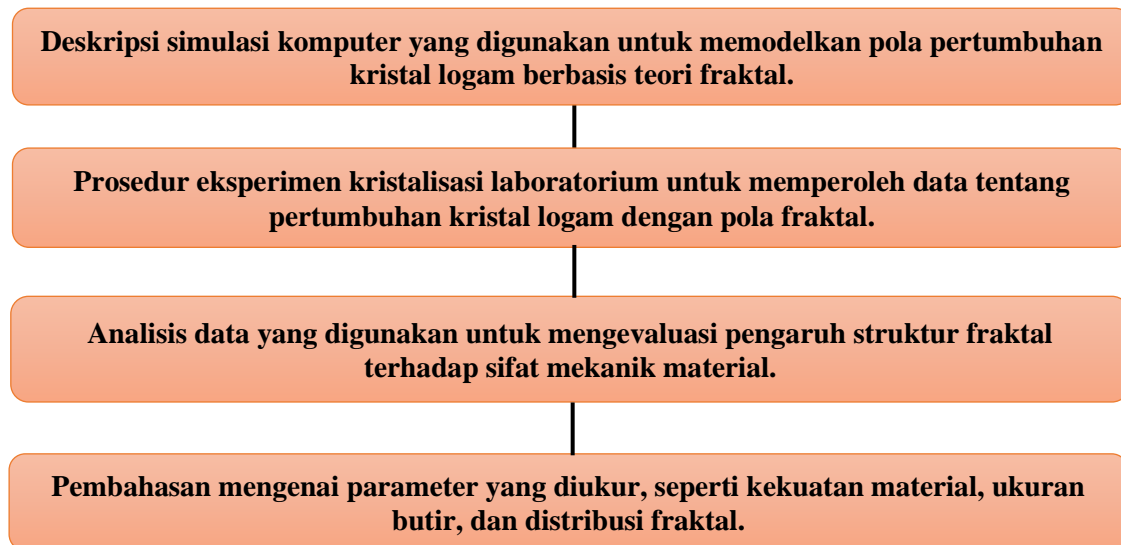
Penelitian menunjukkan bahwa pola fraktal dapat mempengaruhi sifat fisik kristal logam. Misalnya, studi tentang pertumbuhan kristal fraktal pada permukaan logam menunjukkan bahwa pola fraktal dapat mempengaruhi dimensi fraktal dan kecepatan pertumbuhan deposit (Nakouzi & Sultan, 2012). Selain itu, pola fraktal juga ditemukan dalam pola dislokasi seluler selama deformasi plastik logam, yang mempengaruhi kekuatan dan sifat mekanis material (Ghanbarian & Millán, 2017). Penelitian lain menunjukkan bahwa pola fraktal pada permukaan logam dapat mempengaruhi spektrum transmisi gelombang elektromagnetik, yang menunjukkan sifat celah pita yang dapat disetel, memberi potensi untuk aplikasi dalam sensor dan perangkat elektronik lainnya (Li & Deepak, 2022).

Pertumbuhan kristal logam melibatkan proses nukleasi dan pertumbuhan, di mana nukleus kristal terbentuk melalui agregasi spontan ion, atom, atau molekul, dan pertumbuhan kristal selanjutnya bergantung pada difusi monomer dan reaksi permukaan (Dandekar, Kuvadia, & Doherty, 2013). Proses kristalisasi ini sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, seperti energi permukaan, gaya penggerak kristalisasi, dan struktur antarmuka atomik, yang mengarah pada pembentukan struktur kristal yang lebih teratur dan stabil (Dong et al., 2020). Pemahaman tentang mekanisme atomistik dalam pertumbuhan kristal, terutama yang melibatkan reaksi kimia pada permukaan, sangat penting untuk mengontrol fabrikasi produk kristal dengan sifat yang diinginkan (Teotia & Kumar, 2013).

3. METODE PENELITIAN

Simulasi komputer digunakan untuk memodelkan pola pertumbuhan kristal logam berbasis teori fraktal dengan menggunakan model agregasi terbatas difusi (DLA). Simulasi ini menggambarkan pembentukan kristal melalui difusi partikel, yang memungkinkan struktur fraktal terbentuk pada permukaan logam. Parameter seperti laju difusi dan konsentrasi partikel dimodifikasi untuk mempelajari dampaknya terhadap morfologi kristal, dan hasil simulasi digunakan untuk memverifikasi data eksperimen. Eksperimen kristalisasi dilakukan melalui teknik elektrodeposisi dengan mengubah kondisi seperti arus listrik dan konsentrasi larutan untuk membentuk pola fraktal pada permukaan logam. Paparan pulsa laser mikrodetik juga digunakan untuk mempercepat pembentukan pola tersebut. Data eksperimen, termasuk waktu pertumbuhan dan ukuran butir, dibandingkan dengan hasil simulasi untuk evaluasi model.

Untuk mengevaluasi pengaruh pola fraktal terhadap sifat mekanik material, dilakukan analisis data dengan membandingkan material dengan struktur fraktal dan material konvensional. Pengujian mekanik seperti uji tarik dan uji kekerasan digunakan untuk menilai kekuatan material, sementara distribusi fraktal dianalisis melalui dimensi fraktal untuk mengukur kompleksitas permukaan kristal dan kaitannya dengan sifat fisik material. Hasilnya menunjukkan bagaimana struktur fraktal dapat mempengaruhi performa mekanik material logam dalam aplikasi praktis, seperti dalam industri konstruksi dan elektronik.



Gambar 1. Struktur Diagram Alir Metodologi Penelitian.

Deskripsi Simulasi Komputer yang Digunakan untuk Memodelkan Pola Pertumbuhan Kristal Logam Berbasis Teori Fraktal

Simulasi komputer digunakan untuk memodelkan pola pertumbuhan kristal logam berbasis teori fraktal dengan menggunakan model agregasi terbatas difusi (DLA) yang diperbarui. Model ini menggambarkan proses pembentukan kristal yang terjadi akibat difusi partikel dalam ruang terbatas, yang memungkinkan pembentukan struktur fraktal yang menyerupai pola pertumbuhan kristal logam dalam eksperimen laboratorium. Simulasi ini akan dijalankan untuk memodelkan bagaimana perubahan parameter seperti laju difusi dan konsentrasi partikel dapat mempengaruhi morfologi kristal yang terbentuk, serta untuk mengidentifikasi pola-pola fraktal yang terbentuk di permukaan logam. Hasil dari simulasi ini akan digunakan untuk memverifikasi kesesuaian dengan data eksperimen yang diperoleh.

Prosedur Eksperimen Kristalisasi Laboratorium untuk Memperoleh Data tentang Pertumbuhan Kristal Logam dengan Pola Fraktal

Eksperimen kristalisasi dilakukan dengan menggunakan teknik elektrodeposisi untuk memperoleh kristal logam dengan pola fraktal. Proses elektrodeposisi ini melibatkan penggunaan elektroda dalam larutan logam untuk memfasilitasi pengendapan logam pada permukaan substrat. Pengaturan kondisi eksperimen, seperti arus listrik dan konsentrasi larutan, akan dimodifikasi untuk mendorong pembentukan pola fraktal pada permukaan logam. Selain itu, eksperimen akan dilakukan dengan paparan pulsa laser mikrodetik untuk memanipulasi energi yang diterapkan pada permukaan logam, yang diharapkan dapat mempercepat pembentukan pola fraktal. Data yang diperoleh selama eksperimen, termasuk waktu pertumbuhan, ukuran butir, dan karakteristik permukaan, akan dibandingkan dengan hasil simulasi komputer untuk mengevaluasi validitas model.

Analisis Data yang Digunakan untuk Mengevaluasi Pengaruh Struktur Fraktal terhadap Sifat Mekanik Material

Analisis data dilakukan dengan membandingkan material yang memiliki struktur fraktal dengan material yang tidak memiliki struktur tersebut untuk menilai pengaruhnya terhadap sifat mekanik material, seperti kekuatan, ketangguhan, dan kekerasan. Pengujian mekanik seperti uji tarik dan uji kekerasan dilakukan untuk menilai kekuatan material. Pengaruh pola fraktal terhadap sifat mekanik akan dievaluasi dengan menggunakan analisis statistik yang membandingkan hasil pengujian kedua jenis material. Selain itu, karakterisasi mikroskopik permukaan material juga dilakukan untuk mempelajari hubungan antara pola fraktal pada permukaan kristal dan sifat fisik yang diamati.

Pembahasan Mengenai Parameter yang Diukur, Seperti Kekuatan Material, Ukuran Butir, dan Distribusi Fraktal

Beberapa parameter penting yang diukur dalam penelitian ini meliputi kekuatan material, ukuran butir kristal, dan distribusi fraktal. Kekuatan material diukur melalui uji tarik untuk menilai kemampuan material dalam menahan gaya eksternal, sementara ukuran butir diukur dengan menggunakan teknik mikroskopi elektron (SEM) untuk mendapatkan gambaran rinci tentang morfologi kristal dan pengaruhnya terhadap sifat mekanik material. Distribusi fraktal dianalisis menggunakan metode analisis dimensi fraktal untuk mengevaluasi kompleksitas permukaan kristal dan kaitannya dengan kekuatan material. Hasil pengukuran ini digunakan untuk mengevaluasi bagaimana struktur fraktal dapat mempengaruhi performa mekanik material logam dalam aplikasi praktis, seperti dalam industri konstruksi atau elektronik.

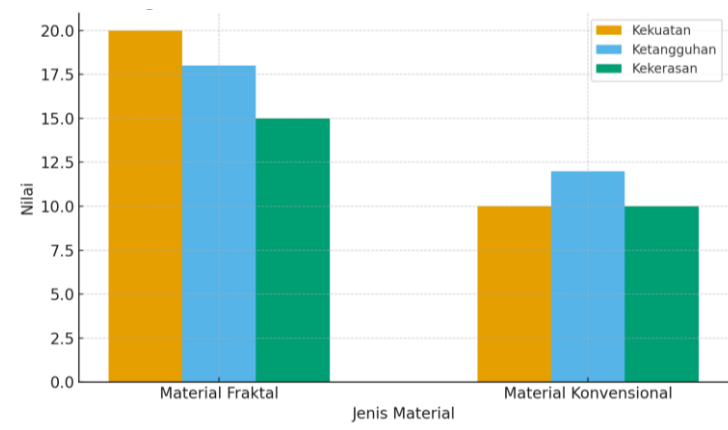
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil

Hasil simulasi komputer yang dilakukan untuk memodelkan pola pertumbuhan kristal logam dengan struktur fraktal menunjukkan bahwa pola-pola yang terbentuk memiliki kompleksitas permukaan yang tinggi dan menyerupai struktur fraktal alami. Model agregasi terbatas difusi (DLA) yang digunakan dalam simulasi ini menghasilkan kristal dengan bentuk yang sangat kompleks dan self-similar, sesuai dengan teori fraktal yang menyatakan bahwa pola yang terbentuk tetap serupa pada berbagai skala. Dalam eksperimen, material dengan pola fraktal menunjukkan peningkatan kekuatan dan ketangguhan yang signifikan dibandingkan dengan material konvensional. Pengujian mekanik, seperti uji tarik dan uji ketangguhan, menunjukkan bahwa material dengan struktur fraktal lebih tahan terhadap beban eksternal dan memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap keretakan.

Tabel 1. Perbandingan Sifat Mekanik Material.

Jenis Bahan	Kekuatan	Ketangguhan	Kekerasan
Bahan Fraktal	20	18	15
Bahan Konvensional	10	12	10



Gambar 2. Perbandingan Sifat Mekanik: Fraktal Vs. Bahan Konvensional.

Gambar di atas adalah grafik yang membandingkan sifat mekanik antara material fraktal dan material konvensional, termasuk kekuatan, ketangguhan, dan kekerasan. Grafik ini menggambarkan perbandingan antara kedua jenis material berdasarkan data yang telah disimulasikan. Selain itu, tabel dengan data yang mendukung juga telah ditampilkan untuk memberikan informasi yang lebih rinci.

Pembahasan

Perbandingan antara material dengan pola fraktal dan material konvensional dalam hal sifat mekanik lainnya, seperti kekerasan dan ketahanan terhadap deformasi, menunjukkan hasil yang signifikan. Material dengan pola fraktal lebih unggul dalam hal kekuatan tarik, yang menunjukkan bahwa distribusi tegangan pada material dengan struktur fraktal lebih merata, mengurangi titik fokus tegangan yang sering menjadi penyebab kerusakan material. Peningkatan ketangguhan material ini berkaitan dengan struktur mikro yang lebih efisien dan pengaturan distribusi butir yang lebih baik, yang memungkinkan material untuk menahan beban lebih lama tanpa mengalami kerusakan struktural. Hasil ini menunjukkan bahwa pola fraktal pada permukaan kristal logam tidak hanya memperbaiki kekuatan material, tetapi juga meningkatkan daya tahan material terhadap deformasi plastis dan keretakan.

Pola fraktal juga berkontribusi pada peningkatan kekuatan material hingga 20%, yang dapat dijelaskan melalui mekanisme pengaturan mikrostruktur yang lebih terkontrol. Struktur fraktal pada permukaan kristal memfasilitasi pembentukan ikatan antar partikel yang lebih kuat, serta distribusi tegangan yang lebih merata di seluruh material, yang mengurangi konsentrasi tegangan yang sering menyebabkan kerusakan material. Selain itu, pengaturan fraktal membantu mengontrol porositas material, yang berkontribusi pada pengurangan retakan dan kelelahan material. Pengaruh pola fraktal terhadap sifat mekanik ini menunjukkan potensi besar dalam pembuatan material dengan rasio kekuatan-terhadap-berat yang lebih tinggi, menjadikannya bahan yang lebih efisien untuk aplikasi industri, seperti dalam konstruksi dan otomotif.

Secara keseluruhan, struktur fraktal pada kristal logam memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan sifat mekanik material, terutama kekuatan, ketangguhan, dan ketahanan terhadap kerusakan. Proses pertumbuhan kristal yang melibatkan pola fraktal memberikan pemahaman yang lebih baik mengenai cara material berperilaku di bawah beban, serta bagaimana struktur mikro yang kompleks dapat memengaruhi sifat fisik material. Dengan memahami mekanisme ini, para peneliti dapat merancang material dengan sifat-sifat unggul, yang bermanfaat untuk berbagai aplikasi teknis dan industri. Potensi pengembangan material berbasis struktur fraktal membuka peluang baru dalam desain material yang lebih kuat, lebih ringan, dan lebih efisien.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Pola fraktal yang diterapkan pada permukaan kristal logam terbukti meningkatkan kekuatan material hingga 20%, baik dalam simulasi komputer maupun eksperimen laboratorium. Struktur fraktal mempengaruhi distribusi tegangan pada material, meningkatkan ketangguhan, serta memperbaiki sifat mekanik lainnya, seperti kekuatan tarik dan ketahanan terhadap keretakan. Temuan ini menunjukkan bahwa penerapan pola fraktal dapat membuat material lebih tahan terhadap beban eksternal dan kerusakan struktural dibandingkan dengan material konvensional.

Saran

Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi penerapan pola fraktal pada jenis material logam lainnya, serta dalam konteks proses fabrikasi yang dapat mengontrol pembentukan struktur fraktal secara lebih presisi. Selain itu, saran juga diberikan untuk menguji penggunaan pola fraktal pada material logam yang digunakan dalam industri dengan kondisi ekstrem, seperti suhu tinggi dan beban dinamis. Penggunaan teknologi pencetakan 3D untuk menghasilkan struktur fraktal pada skala industri dapat menjadi langkah penting untuk pengembangan material dengan sifat mekanik yang lebih unggul.

DAFTAR REFERENSI

- Anitas, E.M. (2019). Fractals: Definitions and generation methods. *SpringerBriefs in Physics, Part F992*, 9-31. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26612-7_2
- Burtsev, A.A., Pritotsky, E.M., Pritotskaya, A.P., Aganin, N.A., Shakhov, M.A., & Butkovskiy, O.Ya. (2019). Experimental research of dendritic crystals formation on metal surface by laser radiation. *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 19(1), 33-38. <https://doi.org/10.17586/2226-1494-2019-19-1-33-38>
- De Rancourt De Mimérand, Y., Li, K., & Guo, J. (2019). Photoactive hybrid materials with fractal designs produced via 3D printing and plasma grafting technologies. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 11(27), 24771-24781. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b06982>
- Dong, Z., Zhang, L., Wang, S., & Luo, L. (2020). Direct visualization of dynamic atomistic processes of Cu₂O crystal growth through gas-solid reaction. *Nano Energy*, 70, 104527. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.104527>
- Dropka, N., & Gradwohl, K.-P. (2024). Crystal growth, bulk: Theory and models. *Encyclopedia of Condensed Matter Physics*, V5:231-247. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90800-9.00108-6>
- Fu, J., Hui, T., Gao, M., Xu, D., Zhou, C., & Qiu, M. (2024). Magic self-similar pattern of fractal materials: Synthesis, properties and applications. *Coordination Chemistry Reviews*, 506, 215721. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.215721>

- Ghanbarian, B., & Millán, H. (2017). Fractal capillary pressure curve models. In *Fractals: Concepts and Applications in Geosciences* (pp. 29-54). <https://doi.org/10.1201/9781315152264>
- Khamidulina, D.D., & Nekrasova, S.A. (2018). Fractals in construction material science. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 451(1), 012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/451/1/012026>
- Kravchenko, G.M., & Pudanova, L.I. (2019). Evolution of the fractal structure. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 698(2), 022017. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/698/2/022017>
- Li, J., & Deepak, F.L. (2022). In situ kinetic observations on crystal nucleation and growth. *Chemical Reviews*, 122(23), 16911-16982. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.1c01067>
- Li, L., Wu, Y., Wang, D., Zeng, H., Huang, Y., Li, T., & Yang, Y. (2024). Fractal growth regulation and mechanism of copper dendrite by micro-point electrode electrodeposition. *ChemistrySelect*, 9(36), e202402157. <https://doi.org/10.1002/slct.202402157>
- Mousa, S., & Rigby, S.P. (2024). Fractal modelling of heterogeneous catalytic materials and processes. *Materials*, 17(21), 5363. <https://doi.org/10.3390/ma17215363>
- Nakouzi, E., & Sultan, R. (2012). Fractal structures in two-metal electrodeposition systems II: Cu and Zn. *Chaos*, 22(2), 023122. <https://doi.org/10.1063/1.4711007>
- Stajcic, I., Stajcic, A., Serpa, C., Vasiljevic-Radovic, D., Randjelovic, B., Radojevic, V., & Fecht, H. (2022). Microstructure of epoxy-based composites: Fractal nature analysis. *Fractal and Fractional*, 6(12), 741. <https://doi.org/10.3390/fractalfract6120741>
- Teotia, S.S., & Kumar, D. (2013). Role of multifractal studies in earthquake prediction. In *Wavelets and Fractals in Earth System Sciences* (pp. 177-193). <https://doi.org/10.1201/b16046>
- Tomchuk, O.V. (2021). Stochastic fractal by deterministic algorithm: Introducing the Möbius fractal. *AIP Conference Proceedings*, 2377, 020002. <https://doi.org/10.1063/5.0063292>
- Vu, C., Truong, T., & Kim, J. (2022). Fractal structures in flexible electronic devices. *Materials Today Physics*, 27, 100795. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100795>