

Kajian Pemodelan Kekuatan Tekan Busa Aluminium Berbasis Geometri Fraktal

Sutarno^{1a)} dan Kusharjanto^{1b)}

¹ Jurusan Teknik Metalurgi Universitas Jenderal Ahmad Yani (UNJANI) Bandung
Jl. Jenderal Gatot Subroto PO Box 807 (PINDAD) Bandung 40285,
Tlp. (022) 7320920;

^ahartosuwarno@gmail.com

^bkusharjanto@lecture.unjani.ac.id

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi kekuatan tekan busa aluminium berbasis morfologi rongga pori dengan pendekatan konsep geometri fractal. Busa aluminium ini disintesa menggunakan kalsium karbonat (CaCO_3) sebagai agen pembusa dan SiO_2 sebagai stabilizer. Morfologi rongga pori busa aluminium bersifat acak, tidak teratur dan stokastik sehingga persoalan dimensi tidak dapat dideskripsikan dengan geometri Euclidean melainkan dengan konsep geometri fraktal. Simulasi kekuatan tekan terhadap porositas berbasis fraktal dengan iterasi menunjukkan bahwa porositas berbanding terbalik dengan dimensi fraktal. Nilai kelengkungan suatu kurva berbanding lurus dengan nilai k pada model Balshin. Dari plot data hasil percobaan diperoleh distribusi kekuatan tekan berbasis porositas fraktal diperoleh $Y = 14.80e^{-3.019X}$.

Kata kunci: Rongga pori, stokastik, kekuatan tekan, frakta

PENDAHULUAN

Busa aluminium merupakan material yang masih relatif baru memiliki struktur rongga pori, kekakuan dan kekuatan tinggi serta densitas rendah, berpotensi menjadi material konstruksi ringan dan material fungsional [1]. Busa aluminium ini mempunyai morfologi rongga pori yang direpresentasikan oleh bentuk, ukuran dan distribusinya mempunyai struktur acak, tidak teratur dan stokastik. Morfologi busa demikian, persoalan dimensi tidak dapat dijelaskan dengan konsep geometri klastik atau yang dikenal sebagai geometri Euclidean, namun dengan dapat dijelaskan secara baik dengan konsep geometri fraktal.[2]

Istilah fraktal berasal dari bahasa latin yang berarti fractus "patah-broken" atau "retak- fractured" yang terfragmentasi secara acak, diperkenalkan oleh Benoit Mandelbrot pada tahun 1975.[3] Sebuah fraktal umumnya bentuk yang terfragmentasi kasar yang dapat dibagi dalam bagian, dimana setiap bagian mirip dengan ukuran aslinya bila diperbesar. Geometri fraktal mengulangi pola dasar dengan variasi dan bentuk tak terbatas, merupakan konsep geometri pecahan yang menggunakan konsep serupa-diri untuk mendeskripsikan secara sederhana dari struktur geometri kompleks dan pola yang nampak kacau, seperti awan yang bukan bola, gunung yang bukan berupa kerucut, garis pantai bukan lingkaran.[2,3]

Seperti diketahui, pada geometri Euclidean, garis berdimensi 1, bidang berdimensi 2, dan ruang atau volume berdimensi 3, maka pada geometri fraktal, baik garis, bidang dan ruang atau volume selalu berdimensi pecahan. Ciri khas dari geometri fraktal antara lain (1) serupa diri, dimana setiap bagian yang terfragmentasi mirip dengan bentuk fraktal aslinya, (2) dimensi fraktal berada antara 0-1 untuk garis, 1-2 untuk bidang dan 2-3 untuk ruang atau volume [4]. Sebagai contoh, karpet Sierpinski #4 berupa bidang dengan dimensi fraktal 1,89. Nilai dimensi fraktal ini tetap terhadap perubahan akibat iteratif.

TEORI DAN EKSPERIMEN

Teori pembentuk rongga pori

Prinsip dasar busa aluminium adalah adanya gas yang terjebak pada koloid yang dalam hal ini lelehan aluminium dan membentuk rongga pori selama proses solidifikasi. Selama peleburan, lelehan aluminium dengan oksigen bereaksi [5, 6, 7]



Penambahan CaCO₃ ke dalam lelehan aluminium pada rentang 650-860°C terjadi reaksi dekomposisi



CaO dengan Al₂O₃ membentuk kalsia alumina menurut reaksi



Penggunaan SiO₂ dengan CaO dan Al₂O₃ bereaksi membentuk senyawa CaO·Al₂O₃SiO₂ (s) yang mendegradasi kekuatan tekan.

Kalsia alumina berperan penting dalam menstabilkan rongga pori yang terbentuk oleh CO₂ dan terjebak selama proses solidifikasi. Bentuk dan ukuran serta distribusi rongga pori sangat tergantung dari ukuran dan distribusi CaCO₃ yang dipengaruhi oleh pengadukan dan suhu sintesa.

Karakterisasi busa aluminium mencakup densitas relatif, diameter rongga pori, porositas, kekuatan tekan yang direpresentasikan oleh *plateau stress*

Densitas relatif

Densitas relatif (ρ_r) merupakan rasio antara densitas busa (ρ_b) dengan densitas aluminium padat (ρ_o), dituliskan dengan persamaan

$$\rho_r = \frac{\rho_b}{\rho_o} \quad (4)$$

Pengukuran densitas dilakukan dengan menimbang berat spesimen lalu dibagi dengan volume spesimen. Perhitungan volume dilakukan dengan metode Archimedes.

Porositas

Porositas merupakan selisih dari volume busa dan volume padat yang dihitung menggunakan persamaan :

$$V_p = V_b - \frac{W_b}{\rho_o} \quad (5)$$

Berat busa, W_b ditimbang dan volume busa V_b diukur.

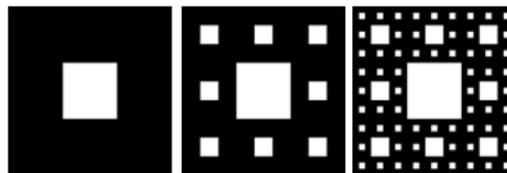
Konsep geometri fraktal

Hubungan N sebagai pecahan dengan l pembagi, dimensi fraktal, D dinyatakan dengan persamaan [8]:

$$N=l^D \quad (6)$$

Persamaan (6) dapat disusun ulang sehingga Nilai dimensi fraktal, D dapat dihitung dalam bentuk:

$$D = \frac{\log N}{\log l} \quad (7)$$



Gambar 1. Generator dengan 3 iterasi

Satu kotak putih merupakan generator yang dapat ditempatkan secara teratur atau acak. Generator ini berfungsi sebagai rongga pori suatu busa yang akan diiterasikan. Pada kasus ini, N = 8 sebagai representasi dari padatan dan ada 1 generator yang setara dengan 1/9 bagian. Dengan kata lain, ada 9 kotak dimana satu kotak berupa ronggan pori dengan pembagi, l = 3. Bila ada N = 8ⁿ dan l=3ⁿ maka dimensi fraktal, D dapat dihitung :

$$D = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\log N(l)}{\log l} = \frac{\log 8^n}{\log 3^n} = \frac{n \log 8}{n \log 3} = 1.89$$

Untuk dimensi ruang, terdapat 6 bidang (@ 1 generator setiap bidang) dan 1 generator bidang tengah, sehingga terdapat 7 generator atau rongga pori, maka dimensi fraktal ruang adalah

$$D = \frac{\log N}{\log l} = \frac{\log 20}{\log 3} = 2.73$$

Sebagai representasi rongga pori, jumlah generator dalam suatu karpet Sierpinski bisa lebih dari 1 generator. Semakin banyak jumlah generator berarti semakin banyak jumlah rongga pori terbentuk, yang berarti semakin besar prosentasi porositas suatu busa.

Teori Fraktal

Formulasi porositas berbasis fraktal

Prinsip dasar dari perhitungan porositas berbasis fraktal adalah intiasi dari generator Berbasis Gambar 1 diatas, ada satu generator yang merupakan representasi rongga pori dan sisanya ada 8 kotak sehingga porositas pada iertasi 1 adalah 1/9 atau 11%. Selanjutnya iterasi kedua, ketiga dan ke n, maka porositas dapat diformulasi dengan persamaan.[9]

Porositas, $\phi = [(p^2 - q)/p^2]^N \dots\dots\dots(12)$

Pada kasus bidang yang terdiri dari 9 kotak dengan 1 generator, maka p =3 dan q=1 dan N jumlah iterasi. Nilai q mempengaruhi porositas mencapai 1 dengan interasi yang sama.

Model kekuatan tekan berbasis fraktal

Beberapa model kekuatan tekan busa aluminium untuk material Al₂O₃ dan ZrO₂ Ryshkewitch berbasis porositas dinyatakan dalam persamaan

$$\sigma_c = 503e^{-3.74p} \quad (7)$$

Dimana k adalah konstanta empiris

Balshin mengembangkan model kekuatan tekan berbasis porositas yang dinyatakan dengan persamaan [10]

$$\sigma_c = \sigma_{c,s}(1 - p)^k \quad (8)$$

Dimana σ_c , $\sigma_{c,s}$ dan k adalah kekuatan tekan material berpori, kekuatan tekan tanpa rongga pori atau padat dan konstanta empiris.

Baik persamaan (7) dan (8) kekuatan tekan sebagai fungsi dari porisitas, dimana akan dihitung porositas berbasis geometri fraktal yang memanfaatkan serupa diri.

Eksperimen

Sintesa material busa aluminium dengan bahan baku Al-7000 dengan menggunakan *foaming agent* CaCO₃ dan stabilizer SiO₂ bertujuan untuk mengkaji pengaruh parameter proses metalurgi terhadap karakteristik busa aluminium, kestabilan morfologi rongga pori terhadap kekuatan tekan, membandingkan karakteristik material busa aluminium dengan produk yang sudah ada di pasaran. Pada sintesa busa aluminium ini divariasikan temperatur 700-750 °C dan kadar SiO₂ bervariasi 0.3-2.8 %. Adapun karakterisasi busa aluminium mencakup densitas relatif, porositas, SEM/EDS dan kekuatan tekan. Disamping itu, dilakukan kajian kekuatan tekan berbasis porositas fraktal dengan memvariasikan generator pada karpet Sierpinski #4 dan iterasi dan memplot data kekuatan tekan terhadap porositas hasil eksperimen.

HASIL DAN DISKUSI

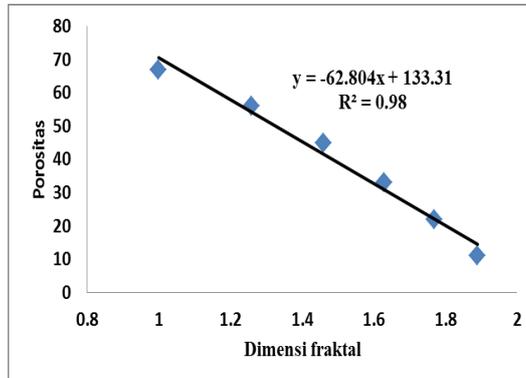
Karakterisasi busa

Seperti diketahui bahwa karakterisik kunci dari busa adalah densitas, diameter rongga pori, porositas dan dan kekuatan tekan. Berbasis kompilasi dan pengolahan data diperoleh densitas relatif minimum 0.381, diamter pori 0.91

mm, porositas maksimm 85.89 % dan kekuatan tekan maksimum 4 Mpa. Berbasis uji SEM/EDS diperoleh komposisi unsur pada busa yaitu AL, Ca dan Zn, sementara senyawa Al_2O_3 , SiO_2 , CaO, ZnO dan $CaO.Al_2O_3.SiO_3$.

Dimensi fraktal

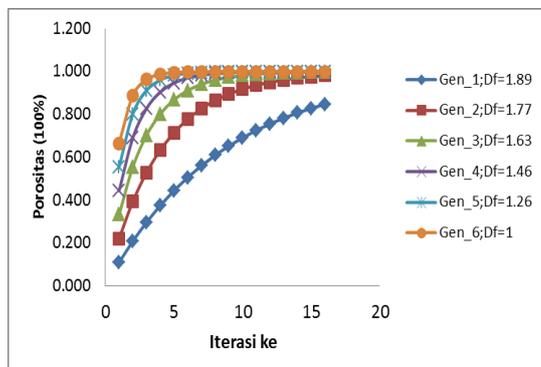
Dari Gambar 2 terlihat bahwa dimensi fraktal berbanding terbalik dengan porositas busa. Kenaikan porositas sebanding dengan kenaikan jumlah generator dan/atau iterasi.



Gambar 2. Kurva porositas vs dimensi fraktal

Dengan 1 generator, kenaikan jumlah iterasi akan meningkatkan porositas, sedangkan jumlah generator akan menurunkan dimensi fraktal. Dengan demikian kenaikan porositas akan menurunkan dimensi fraktal. Adapun jumlah iterasi tidak menyebabkan dimensi fraktal berubah.

Simulasi porositas

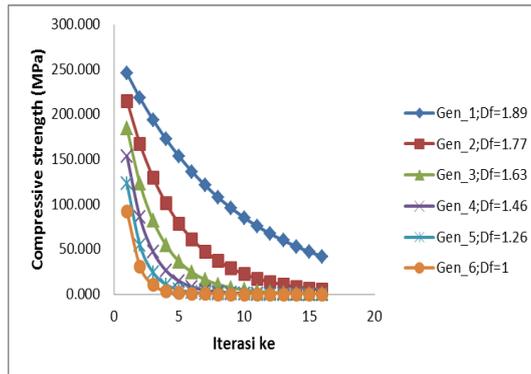


Gambar 3. Porositas vs interasi

Jumlah generator berbanding terbalik dengan dimensi fraktal dan berbanding lurus dengan porositas. Dengan demikian mudah dipahami bahwa generator merupakan representasi rongga pori yang ada dalam padatan. Melalui variasi generator dan kenaikan iterasi diperoleh kenaikan porositas yang mendekati 1 atau 100%.

Simulasi kekuatan tekan

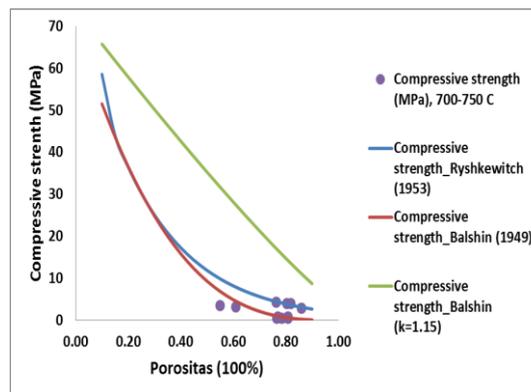
Kekuatan tekan berbanding terbalik dengan porositas. Dengan asumsi sederhana bila material dapat mempunyai kekuatan tekan 503 MPa untuk Al-7000, 350 MPa untuk Al-6000 dan 450 MPa untuk material Al-2000. Dengan kenaikan porositas, maka terjadi penurunan kekuatan tekan. Dengan kata lain, kekuatan tekan material busa sama dengan kekuatan tekan padat dikalikan (1-porositas). Pada kenyataan setiap busa terkandung senyawa oksida dan senyawa yang terbentuk dari rekasi produk samping yang mempunyai sifat mendegradasi kekuatan tekan. Karena kondisi demikian maka perlu adanya faktor koreksi sehingga memungkinkan model yang diperoleh menjadi valid. Adapun kurva kekautan tekan terhadap iterasi generator ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 4. Kekuatan tekan vs Iterasi

Validasi model

Kurva Kekuatan tekan terhadap porositas berbasis fraktal dari model Ryshkewitch seperti persamaan (7) dan model Balsin pada persamaan (8) serta model balsin dengan pangkat 1.15 seperti ditunjukkan oleh Gambar 5. Pada porositas dibawah 40% kurva Ryshkewitch dan Balshin berimpit, sedangkan lebih dari 40% menunjukkan adanya pemisahan. Demikian pula pada Balsin dengan nilai k =1.15 cenderung membentuk kurva linier dan akan semakin melengkung ke bawah seiring dengan peningkatan nilai k untuk model Blshin dan porositas untuk Ryshkewitch. Hasil simulasi persamaan (7) dan (8) serta Balshin dengan nilai k=1.15 ditunjukkan oleh Gambar 5.



Gambar 5. Kurva model kekuatan tekan vs porositas dan hasil percobaan

Berbasis kurva kekuatan tekan terhadap porositas berbasis fraktal seperti pada Gambar 5, diplot data kekuatan tekan dan porositas hasil percobaan terlihat bahwa terjadi distribusi data persamaan (7) dan persamaan (8) serta tidak berkorelasi dengan persamaan (8) dengan nilai k=1.15. Kajian pemodelan kekuatan tekan busa berbasis porositas fraktal ini sangat berguna untuk menentukan rentang nilai k pada persamaan (8) untuk busa aluminium. Dari plot data hasil percobaan diperoleh distribusi kekuatan tekan berbasis porositas fraktal adalah $Y = 14.80e^{-3.019X}$.

KESIMPULAN

Berbasis kompilasi dan pengolahan data diperoleh densitas relatif minimum 0.381, porositas maksimm 85.89 % dan kekuatan tekan 4 MPa serta komposisi unsur dalam busa yaitu AL, Ca dan Zn, sementara senyawa Al₂O₃, SiO₂, CaO, ZnO dan CaO.Al₂O₃.SiO₃. Adapun dari kajian dengan simulasi diperoleh porositas fraktal berbanding terbalik dengan iterasi generator fraktal. Dari plot data hasil percobaan, diperoleh distribusi kekuatan tekan berbasis porositas fraktal adalah $Y = 14.80e^{-3.019X}$.

UCAPAN TERIMA KASIH

Kami mengucapkan terima kasih kepada Dr. Sayu Putu Yuni Paryati, drh, M.Si, selaku Ketua LPPM Unjani, Susanto Sambasri, ST., MT selaku Dekan Fakultas Teknik Unjani, Pawawoi, ST., MT selaku ketua Jurusan Teknik

Metalurgi Unjani terkait dengan dukungan finansial untuk penelitian ini yang tercantum pada SKEP dengan Nomor:225/UNJANI/XI/2015 tertanggal 5 November 2015.

REFERENSI

1. Micheael F Ashby, A Evan, L J Gibson, J W Hultchinson, 2000, *Metal Foams A design Guide*, Butterworth, 2000, Elsevier
2. Mandelbrot, B.B., (1982): *The Fractal Geometry of Nature*, New York.
3. Mandelbrot, B.B. (1989): *Fractals Geometry: What is it, and What Does it do?*, *Proc. R. Soc. London.* A 423, 3-16.
4. Perrier, E., Bird, N., Rieu, M., (2000): *Generalizing the Fraktal Model of Soil Structure, the Pore-solid Fraktal Approach, Fraktals in Soil Science*, Elsevier Science B.V.
5. V. Kevorkijan, *Association of Metallurgical Engineers of Serbia*, Maribor, Slovenia, UDC: 549.74:621.762, AMES (2010)
6. S. Akiyama, H. Ueno, K. Imagawa, A. Kitahara, K. Morimoto, T. Nishikawa and M. Itoh, US Patent 4713277 (1987).
7. John Banhart, *Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams*, *Progress in Materials Science* 46 (2001) pp.559–632, 12, 28359 Bremen, Germany
8. Perrier, E., Bird, N., Rieu, M., (2000): *Generalizing the Fraktal Model of Soil Structure, the Pore-solid Fraktal Approach, Fraktals in Soil Science*, Elsevier Science B.V.
9. Jia, G.H., (2011): *Numerical Investigation of Aluminum Foam Shield Based on Fraktal Theory and Node-separation FEM*, School of Astronautics, Beihang University, China
10. Balshin, M. Y., *Dokl. Akad. Nauk SSSR*, 1949 (in Russian).