

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Bahan

Tahapan selanjutnya yang akan dilakukan yaitu pembahasan mengenai hasil pengujian secara mekanik maupun pengujian secara visual secara makro dan mikro. Sesuai dengan penjelasan pada bab 3, bahan utama yang digunakan pada penelitian kali ini yaitu Aluminium batang dengan seri 6061-T651 dengan penambahan NaCl kristal.

Proses awal yang dilakukan sebelum percobaan pembuatan *aluminium foam* yaitu dengan mengkarakterisasi aluminium dengan mengetahui bentuk dan berat dari aluminium tersebut sehingga dapat digunakan untuk memprediksi fraksi NaCl kristal yang akan digunakan, kemudian dilakukan karakterisasi dari *foaming agent*. Tujuannya adalah untuk mendapatkan ukuran dari *foaming agent* yang digunakan sehingga dapat mengetahui prediksi ukuran dari *foam* yang akan terbentuk. *Foaming agent* yang digunakan menggunakan NaCl kristal dengan ukuran *US mesh* 4-16 atau antara 4,760 mm - 1,190 mm.

4.2 Persiapan dan Penentuan Parameter yang Digunakan

Secara spesifik persiapan dilakukan penimbangan dari aluminium yang digunakan, aluminium yang digunakan tidak berupa serbuk melainkan berupa batang. Penentuan parameter menggunakan perbandingan massa dari Aluminium dan NaCl Kristal dengan perbandingan 100%:0%, 90%:10%, 85%:15%, 80%:20%.

Nilai densitas dari NaCl Kristal 2.16 g/cm^3 lebih kecil dari Aluminium yang memiliki nilai densitas 2.7 g/cm^3 sehingga ketika dilakukan proses mixing pada *melting route*, NaCl akan terapung keatas. Hal tersebut diatasi dengan melakukan pengadukan menggunakan batang pengaduk yang sudah di *couple* dengan *hand drill*, hal tersebut dapat diatasi sehingga NaCl kristal dapat larut masuk dan tercampur kedalam aluminium cair

Hasil penimbangan dan perhitungan didasarkan pada rasio fraksi massa NaCl kristal sebagai parameter penentuan massa yang akan digunakan, terdapat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1 Fraksi Massa Aluminium dan NaCl Kristal.

Spesimen	Total Massa (gram)	Al	NaCl	Massa Al	Massa NaCl
		wt%	wt%	(gram)	(gram)
A	250	100	0	250	0
B	250	90	10	225	25
C	250	85	15	212.5	37,5
D	250	80	20	200	50

Dari Tabel 4.1 dapat dilihat bahwa perbandingan semakin tinggi nilai persentase *foaming agent* yang digunakan maka jumlah massa aluminium semakin kecil. Hal tersebut dilakukan untuk mendapatkan perbandingan kekuatan tekan ketika dilakukan *compression testing* menggunakan Aluminium murni (spesimen A) dengan aluminium yang ditambahkan dengan *foaming agent* yaitu berupa spesimen B, C, dan D.

Proses peleburan aluminium terjadi ketika suhu mencapai 660°C , dengan bantuan *blower* bertekanan suhu akan ditingkatkan hingga mencapai 850°C , hal tersebut karena NaCl memiliki *melting point* sebesar 801°C . Pengontrolan suhu ini sangat penting dikarenakan jika suhu masih mendekati titik lebur aluminium kemungkinan besar akan sulit untuk dilakukan *mixing* karena aluminium masih berbentuk *slurry* (bubur) dan jika aluminium mencapai suhu lebih tinggi dari titik lebur NaCl diprediksi dapat menghilangkan senyawa NaCl itu sendiri karena mengalami perubahan fase.



(a)



(b)

Gambar 4.1 Pengecekan dan pengontrolan temperatur peleburan (a) Suhu mendekati titik lebur Aluminium (b) suhu penambahan NaCl dan pengadukan

4.3 Hasil Proses *Melting Route* Aluminium dengan NaCl kristal

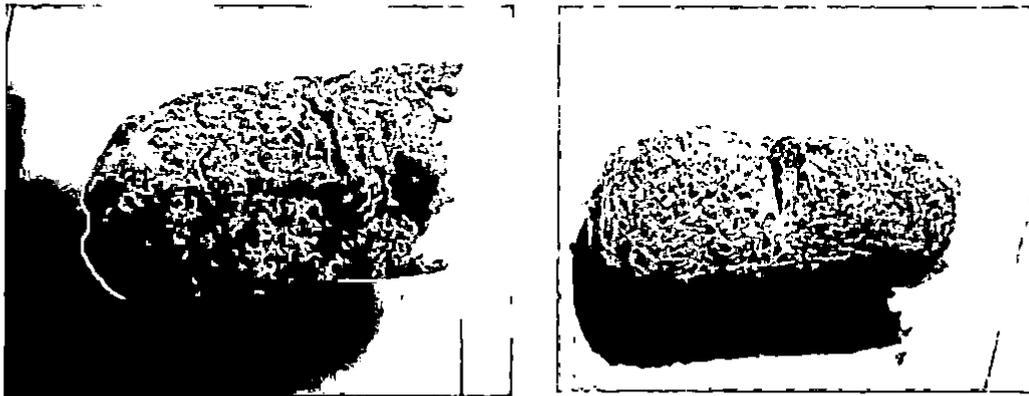
Mekanisme dari proses *melting route* ini yaitu aluminium seri 6061-T651 dilebur menggunakan kowi yang terbuat dari silinder besi dengan diameter 10 cm dengan tinggi 18 cm. Proses pemanasan yaitu menggunakan arang yang dibakar. Ketika proses pembakaran berlangsung diusahakan agar tidak ada material lain yang masuk kedalam kowi, karena hal tersebut akan mempengaruhi jumlah pori dan komposisi dari *aluminium foam* yang dihasilkan. Ketika proses berlangsung temperatur tersebut dijaga agar tidak mengalami penurunan ataupun kenaikan yang signifikan. Hal tersebut jika suhu tiba-tiba turun akan mengganggu proses selanjutnya yaitu proses pengadukan NaCl dan proses *foaming*.

Proses pengadukan menggunakan poros besi di-kopel dengan *hand drill*. Pengadukan dilakukan selama 10 detik dengan putaran sebesar 500 rpm. Kemudian dilakukan penuangan kedalam cetakan yang terbuat dari tanah liat kering dan *proses foaming* pun terjadi. Proses *foaming* dilakukan selama 1 menit. Kemudian cetakan dibuka, untuk mendapatkan *aluminium foam* seperti Gambar 4.2.



Gambar 4.2 Proses pembongkaran cetakan spesimen D (20%)

Hasil proses *melting route* pada *aluminium foam* didapatkan bahwasanya proses tersebut memiliki beberapa faktor yang perlu dipertimbangkan, pertama yaitu mengenai faktor suhu, waktu pengadukan dan rpm pengadukan. Dari proses *melting route* didapatkan hasil seperti pada Gambar 4.3.



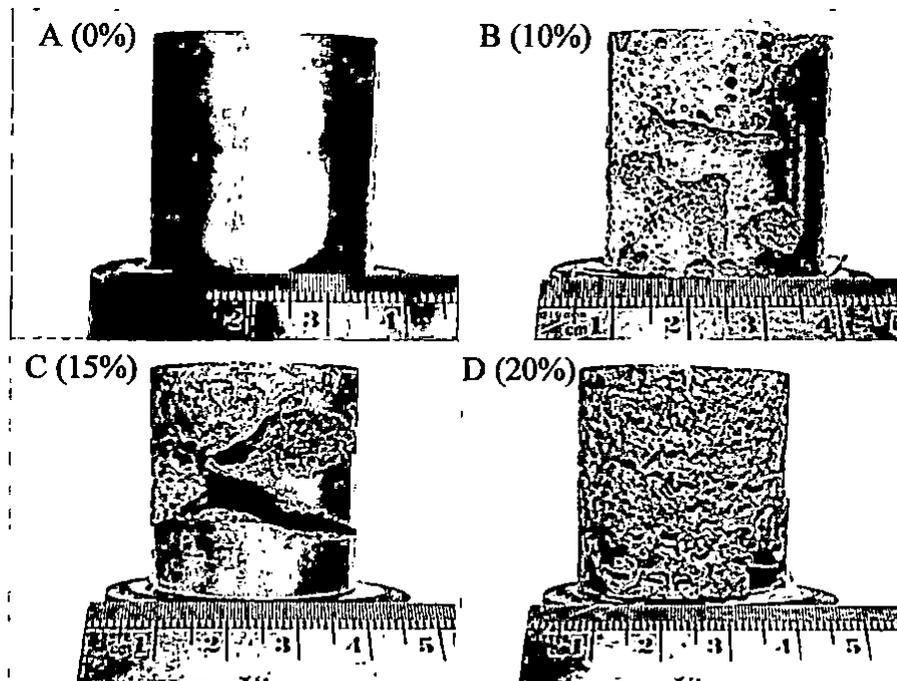
Gambar 4.3 *Bulk* hasil dari proses *melting route*

Pada Gambar 4.3 *aluminium foam* yang dihasilkan terdapat bekas dari cetakan berupa tanah liat yang masih menempel pada permukaan aluminium pada beberapa spesimen dikarenakan pada permukaan dalam cetakan terdapat perbedaan suhu yang cukup signifikan namun *foam* pada beberapa spesimen sudah sedikit terlihat namun tidak merata. Untuk proses selanjutnya yaitu dilakukan pembersihan dan proses *machining* menggunakan mesin bubut.

4.4 Hasil Proses *Machining* Spesimen *Aluminium Foam*

Setelah dilakukan pembersihan dari tanah yang menempel bekas cetakan, kemudian spesimen di-*machining* dengan bentuk silinder dengan ukuran diameter menyesuaikan dengan karakteristik bentuk porinya dengan selisih setiap spesimen tidak lebih dari 1,5 mm. Kemudian spesimen diampelas agar permukaan yang akan di-*compress testing* rata. Setelah itu dilakukan pembersihan menggunakan aquades selama 10 menit. Hal tersebut bertujuan untuk menghilangkan sisa NaCl dan kotoran lainnya yang masih menempel pada spesimen. Dari hasil *machining* tersebut terlihat pori-pori dengan berbagai macam bentuk dan ukuran. Hampir semua spesimen memiliki bentuk pori yang tidak konsisten. Hal tersebut dapat diketahui setelah dilakukan *machining*. Pada spesimen A (0%) terlihat hampir semuanya rata namun pada beberapa bagian terdapat pori dengan ukuran kurang dari 1mm. Spesimen B (10%) terlihat beberapa pori berbentuk bulat dan beberapa ada yang mengalami penyambungan dua buah sel sehingga tampak terlihat pori yang memanjang namun dangkal. Spesimen C (0%) beberapa bagian didominasi

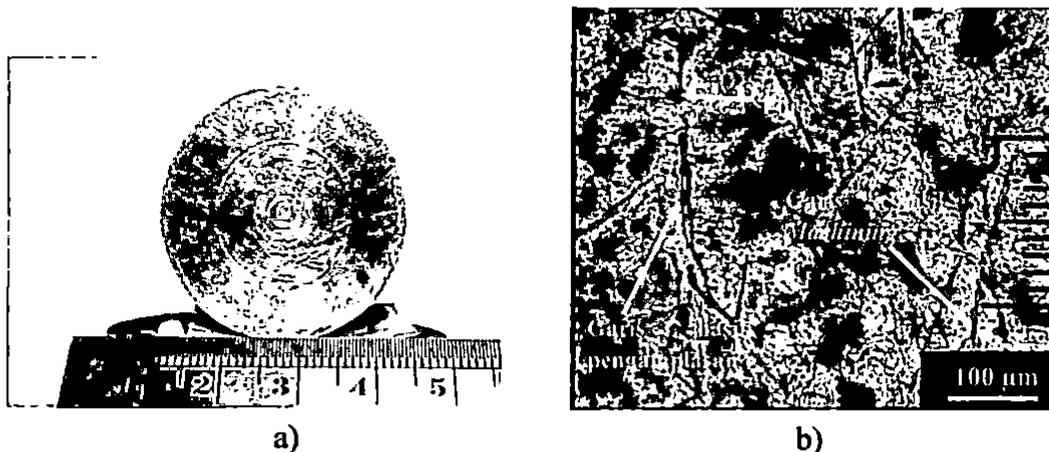
oleh pori-pori dengan ukuran yang lebih lebar dan berlapis. Dan pada spesimen D terlihat banyak pori dan cenderung relatif sama.



Gambar 4.4 Spesimen *Aluminium foam* setelah di-machining

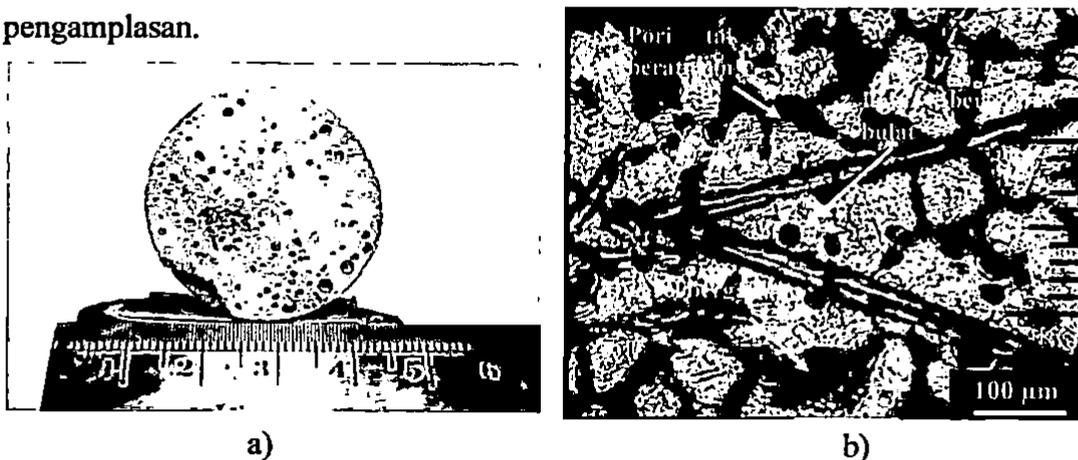
4.5 Hasil pengamatan struktur Makro dan Pembesaran Mikro 50x.

Pengamatan struktur makro dilakukan pada spesimen 0%, 10 %, 15% dan 20%. Foto makro diambil dengan pembesaran 50x sehingga terlihat bagian permukaan yang berpori yaitu pada spesimen A, B, C dan D. Hasil dari foto makro setiap spesimen dapat terlihat pada gambar dibawah ini.



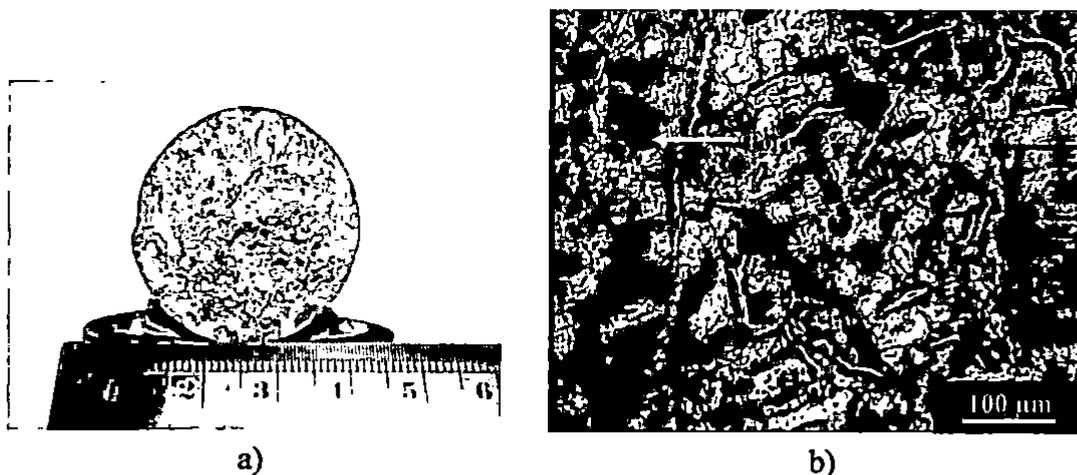
Gambar 4.5 a) Spesimen A (0% NaCl) tampak atas (makro), b) Struktur mikro.

Pada Gambar 4.5.b struktur makro pada spesimen A (0% NaCl) terlihat hampir sebagian besar rata, namun beberapa bagian terlihat adanya pori-pori yang sangat kecil dibawah 1mm akibat dari tercampurnya material dengan material pengotor lainnya. Namun jumlah pori tersebut masih sangat kecil $\leq 1\%$. Bentuk pori tersebut berbentuk *spheroidal* (bulat sempurna) dengan diameter $\pm 10\mu\text{m}$. Pada gambar 4.5.b tersebut juga terlihat garis melingkar, hasil dari proses *machining*. Dan pada beberapa bagian lainnya terdapat bekas alur dari pengamplasan.



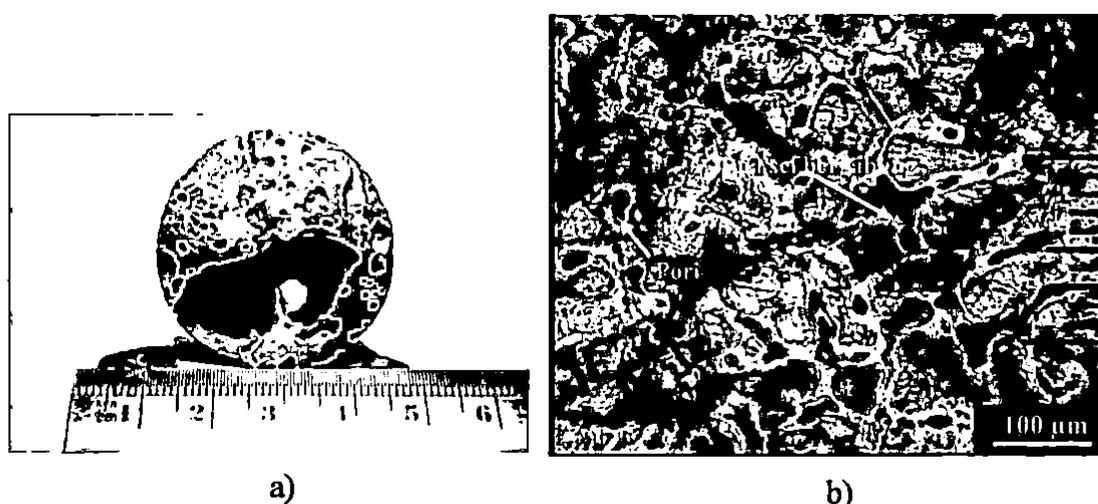
Gambar 4.6 a) Spesimen B (10% NaCl) tampak atas (makro), b) Struktur mikro

Pada Gambar 4.6.b struktur makro spesimen B (10% NaCl) terlihat pori berbentuk lingkaran dan beberapa ada yang granular. Terdapat juga dua sel *foam* yang bergabung menjadi satu, hal tersebut dipengaruhi oleh hasil dari proses pengadukan, yang menyebabkan *foam* pecah dan bergabung menjadi satu.



Gambar 4.7 a) Spesimen C (15% NaCl) tampak atas (makro), b) Struktur mikro.

Pada Gambar 4.7.b struktur makro spesimen C (15% NaCl) terlihat pori dengan ukuran sekitar 30 μm . Sebagian besar permukaan bagian atas pada *foam* ini didominasi oleh daerah *foam* yang pecah sebelum mencapai suhu pendinginan. Terlihat juga beberapa partikel NaCl yang tidak tercampur dan sudah berubah ukurannya menjadi partikel kecil dibawah 1mm akibat dari kenaikan suhu ketika dilakukan proses pengadukan antara aluminium dan NaCl. Namun kondisi berbeda terlihat pada sisi depan dari spesimen C (15% NaCl), terdapat pori-pori dengan ukuran yang cukup besar Gambar 4.4 c, hal tersebut dikarenakan terjadi lipatan aluminium saat pengadukan aluminium cair.



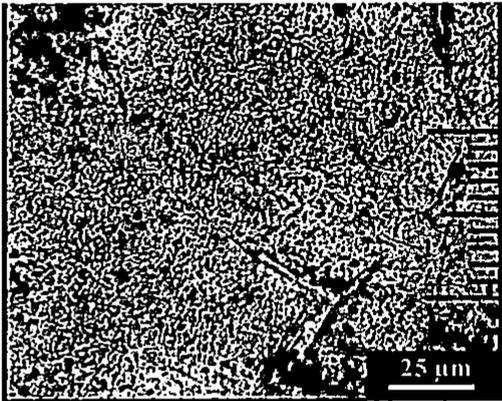
Gambar 4.8 a) Spesimen D (20% NaCl) tampak atas (makro), b) Struktur mikro.

Pada Gambar 4.8.b struktur makro spesimen D (20% NaCl) terlihat pori dengan ukuran yang berbeda-beda. Sebagian besar permukaan bagian atas pada *foam* ini didominasi oleh daerah cacat lubang dengan diameter $\pm 50\mu\text{m}$.

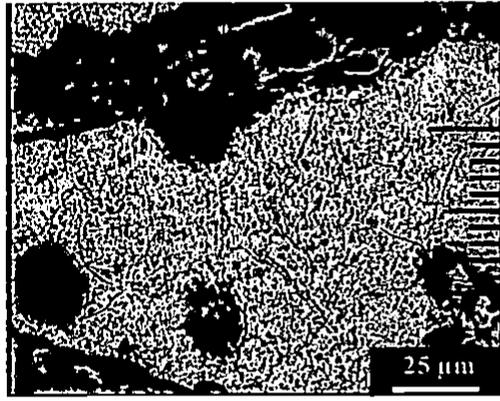
Kesimpulan dari Gambar 4.8 terlihat bahwa setiap spesimen memiliki bentuk morfologi pori yang berbeda-beda. Hal tersebut dipengaruhi oleh proses pengadukan dan proses dari homogenitas dari suatu pencampuran. Namun pada penelitian ini, campuran *aluminium foam* dianggap homogen. Spesimen A (0%) dan B (10%) relatif cenderung memiliki permukaan yang sedikit pori dengan jarak antar pori yang dekat. Berbeda dengan pori pada spesimen C (15%), dan D (20%) yang cenderung memiliki banyak pori dengan jarak antar pori yang dekat. Jarak antara pori ini akan mempengaruhi perilaku *aluminium foam* dan pengujian

mekanik yaitu *compress testing* sehingga sifat penyerapan energi pada spesimen A (0%) dan B (10%) akan lebih kecil jika dibandingkan dengan spesimen C (15%) dan D (20%).

4.6 Hasil Pengamatan Struktur Mikro Pembesaran 200x



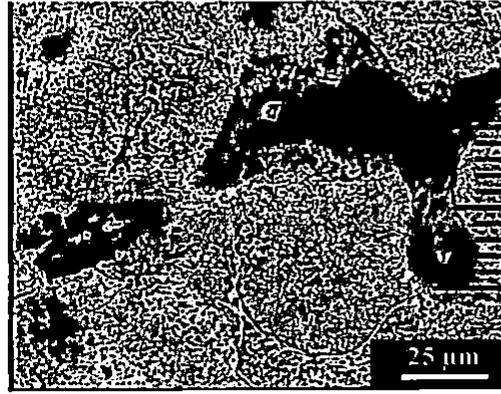
a. Spesimen A (0% NaCl)



b. Spesimen B (10% NaCl)



c. Spesimen C (15% NaCl)



d. Spesimen D (20% NaCl)

Gambar 4.9 Struktur Mikro *Aluminium Foam* Pembesaran 200x spesimen

Pengambilan foto dilakukan dengan menggunakan pembesaran 200x. Dari hasil pengambilan foto mikro struktur spesimen didapatkan hasil seperti Gambar 4.9.a pada spesimen A permukaannya cenderung rata namun ada beberapa bagian terdapat pori walaupun ukuran sangat kecil serta terdapat jalur bekas *machining*. Sedangkan untuk spesimen B pada Gambar 4.9.b terdapat pori dengan ukuran 20µm dan cenderung berbentuk lingkaran. Pada Gambar 4.9.c spesimen C terlihat cenderung berpori namun berbentuk tidak beraturan dan didominasi oleh pori-pori yang bergabung menjadi satu. Pada Gambar 4.9.d spesimen D terdapat pori yang

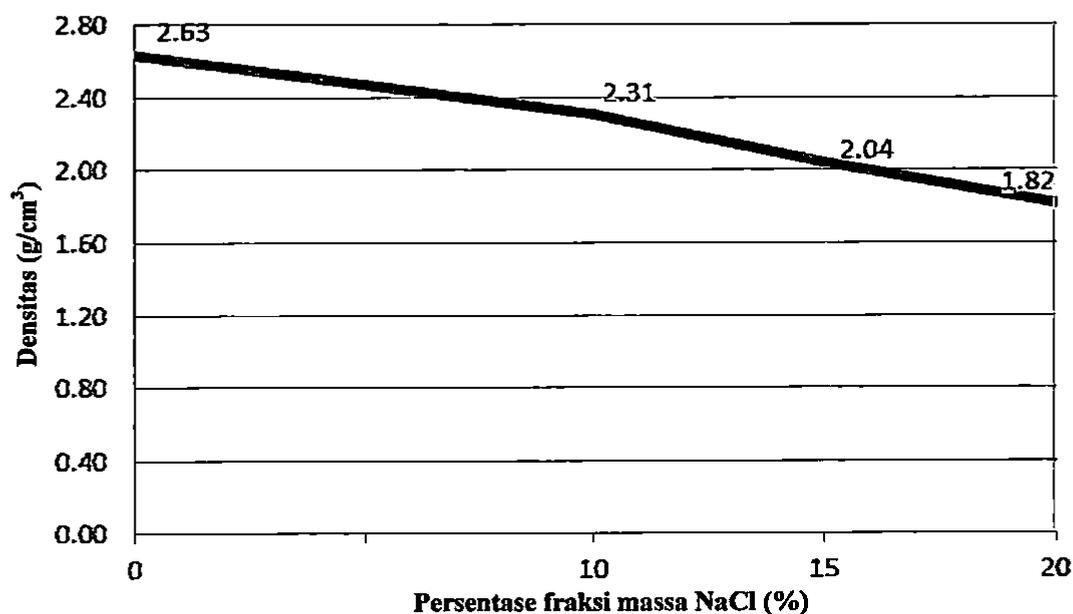
tidak beraturan dengan ukuran lebih dari $25\mu\text{m}$. dari hasil foto mikro menunjukkan adanya pori pada setiap spesimen, namun yang membedakannya adalah sebaran pori, ukuran pori serta bentuk pori.

4.7 Densitas dan porositas *Aluminium foam*

Pengujian densitas dan porositas menggunakan data massa, volume pada masing-masing spesimen dengan persentase spesimen A(0%), B(10%), C(15%) dan D (20%). Dari perhitungan menggunakan teori densitas pada bab 3 , didapatkan nilai densitas setiap spesimen masing-masing seperti pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Perbandingan nilai fraksi NaCl terhadap nilai densitas dan porositas

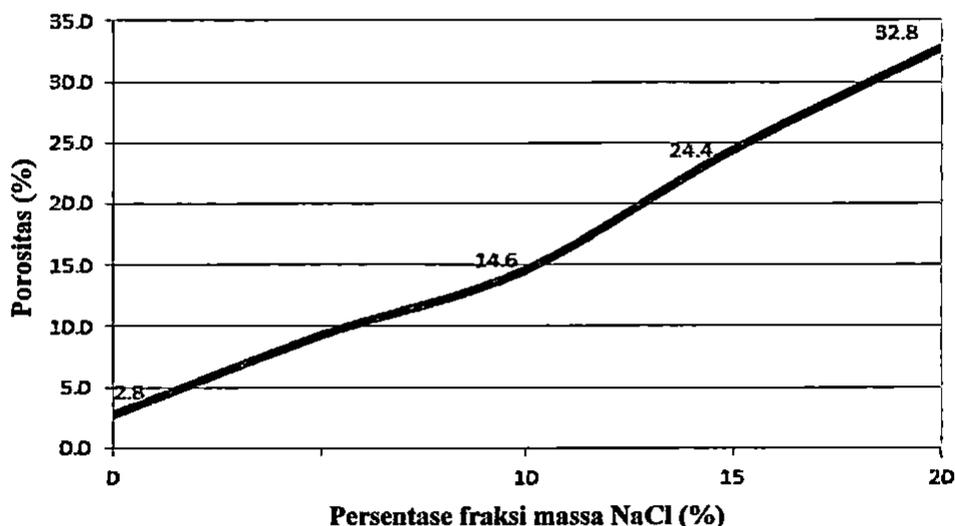
Spesimen	Fraksi Massa NaCl (%)	Total Massa (gram)	Massa Al (gram)	Massa NaCl (gram)	Densitas (g/cm^3)	Porositas (%)
A	0	250	250	0	2,63	2,8
B	10	250	225	25	2,31	14,6
C	15	250	212,5	37,5	2,04	24,4
D	20	250	200	50	1,82	32,8



Gambar 4.10 Grafik hubungan nilai densitas terhadap fraksi massa.

Pada Gambar 4.10 memperlihatkan hubungan antara fraksi massa NaCl dengan densitas *aluminium foam* yang dihasilkan. Pada grafik menunjukkan pertambahan fraksi massa NaCl mempengaruhi nilai densitas yang mana nilai

densitas tersebut semakin menurun. Nilai densitas tertinggi adalah pada spesimen A (0%) sebesar $2,63 \text{ g/cm}^3$ pada spesimen A, hal tersebut dikarenakan *aluminium foam* pada spesimen A (0% NaCl) sangat sedikit terdapat campuran NaCl maupun zat pengotor. Densitas terbesar kedua yaitu pada spesimen B (10% NaCl) sebesar $2,31 \text{ g/cm}^3$ dan densitas terendah adalah sebesar $1,82 \text{ g/cm}^3$ pada spesimen D (20% NaCl) dengan kandungan 50 gram NaCl dan 200 gram aluminium.

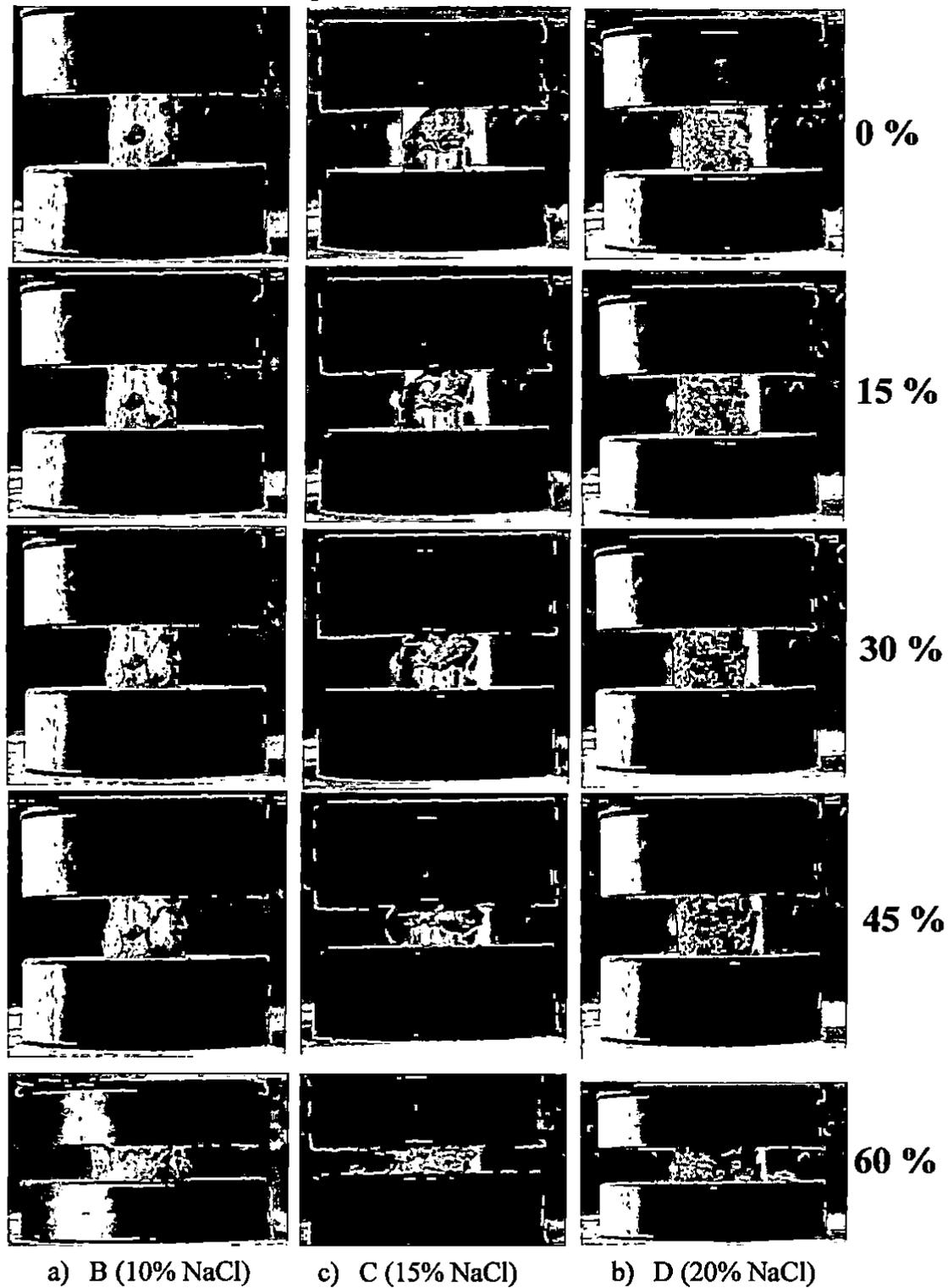


Gambar 4.11 Grafik hubungan nilai porositas terhadap fraksi massa.

Pengujian porositas dilakukan dengan menggunakan perhitungan sesuai dengan rumus yang terdapat pada bab 3 rumus no 1 dan 2. Hal tersebut bertujuan untuk mengetahui pengaruh rasio persentase aluminium dan NaCl Kristal terhadap porositas yang dihasilkan pada masing-masing spesimen *aluminium foam*. Pada Gambar 4.11 terlihat hubungan persentase massa NaCl terhadap massa aluminium yaitu semakin tinggi fraksi massa NaCl terhadap massa aluminium maka nilai porositas akan semakin besar. Nilai porositas tertinggi adalah spesimen D (20%NaCl) dengan persentase 32,8%. Dan porositas terendah pada spesimen A (0% NaCl) yaitu sebesar 2,8%. Pada spesimen A (0% NaCl) masih terdapat porositas hal tersebut diakibatkan dari proses tercampurnya material pengotor ketika proses penuangan dalam cetakan, hal tersebut memang sulit untuk dilakukan pengontrolan. Dari grafik tersebut secara keseluruhan menunjukkan penggunaan banyaknya jumlah massa NaCl sebagai *foaming agent* akan mempengaruhi nilai porositas pada *aluminium foam* yang dihasilkan.

4.8 Hasil Pengujian Tekan

4.8.1 Analisa Kelakuan Spesimen *Aluminium Foam* saat Penekanan



Gambar 4.12 Penekanan spesimen dengan % reduksi yang bertahap

Proses pengujian tekan (compress testing) menggunakan alat UTM ditunjukkan pada Gambar 4.12. Selama pengujian tekan, spesimen dipotret pada tahapan reduksi 0% 15%, 30%, 45%,60%. Analisa mengenai penekanan ini, pada spesimen B , C dan D. pada tahap awal proses penekanan menggunakan parameter yaitu $5^{mm}/detik$. Pada tahap ini proses terbagi menjadi 4 tahap yaitu tahapan deformasi elastis, tahapan perambatan, tahapan pemampatan pita deformasi, dan yang terakhir tahap densifikasi.

Pada tahap deformasi elastis, reduksi 0%-15%, terlihat deformasi pita pada Gambar 4.12.a spesimen B dan retak yang merambat kearah sisi bawah. Pada Gambar 4.12.b spesimen C terlihat deformasi plastis yang tidak rata akibat adanya permukaan yang tidak sejajar pada sisi tekan. Pada Gambar 4.12.c spesimen D terlihat perubahan bentuk pada sisi bagian bawah akibat dari deformasi elastis, namun pada reduksi 0-15% masih terlihat sedikit perubahan kecuali pada bagian bawah pada spesimen D.

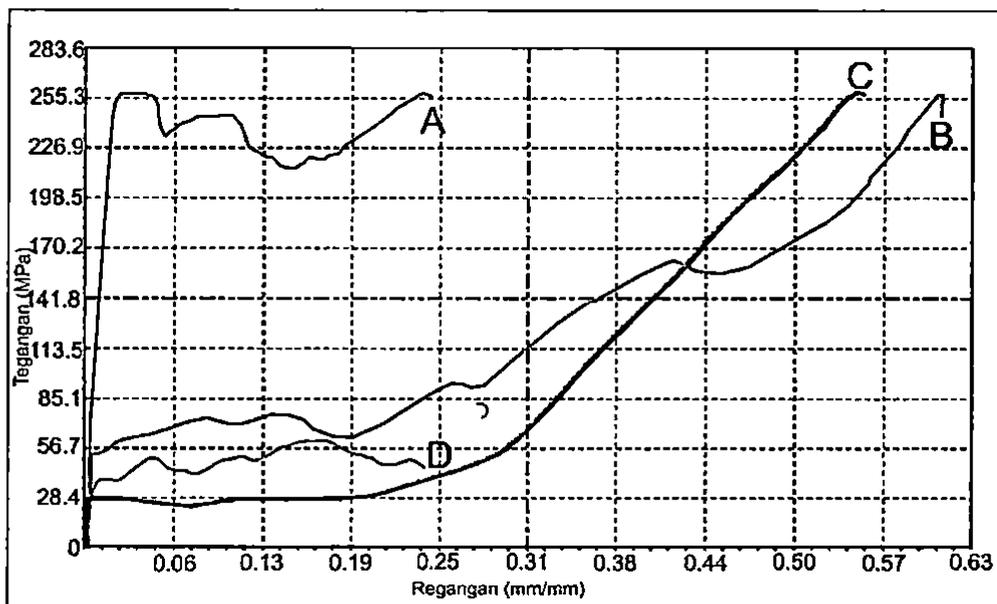
Pada tahap 15%-30 % terjadi tahap perambatan dan pemampatan pita deformasi, hal tersebut terlihat pada setiap spesimen walau pita deformasi ini sangat kecil. Perubahan bentuk pada tahap ini terjadi pada bagian yang menyangga spesimen bagian bawah. Deformasi akibat pemampatan ini terjadi pada semua bagian spesimen. Pada spesimen B, terlihat pita retakan yang semakin banyak akibat penekanan secara kontinyu. Pada spesimen C terlihat bagian yang mengalami daerah penekanan terjadi penurunan yang cukup besar dikarenakan pada bagian spesimen C terdapat bagian berpori yang cukup besar sebagai penyangga permukaan pada sisi tekan. Pada spesimen D pada reduksi 15-30 % terlihat perubahan bentuk pada sisi atas dan bawah. Pada semua spesimen pori terlihat lebih memampat. Pada tahap ini terlihat garis yang cenderung datar namun mengalami kenaikan tegangan pada kurva uji.

Tahapan reduksi 30%-45% terlihat semakin banyak retakan yang mengakibatkan deformasi plastis pada hampir semua bagian spesimen. Pada tahapan reduksi ini, terlihat spesimen B mengalami pembesaran diameter lingkaran pada sisi bawah dan retakan semakin bertambah. Pada spesimen C mengalami deformasi pada bagian tengah dari tinggi spesimen tersebut.

Sedangkan spesimen D mengalami pembesaran diameter pada sisi sebelah kanan. Pada tahap deformasi ini merupakan tahapan pori mengalami pemampatan .

Tahapan reduksi 60% terlihat spesimen B, C dan D mengalami densifikasi Yaitu, ketika semua bagian dari pori telah rusak dan mengalami pemampatan. Pada spesimen B terlihat perubahan tinggi dari spesimen dan bentuk penyebarannya cenderung terpusat, tidak mengalami pergeseran tekan ke samping. Artinya sisi atas spesimen mengalami penekanan dan masuk kedalam searah dengan arah penekanan. Pada spesimen C terlihat pelebaran diameter akibat tekan, dan menekan hingga ke bawah. Terlihat pada bagian yang mengalami pelebaran diameter turun ke bagian sisi paling bawah spesimen. Pada spesimen D terlihat beberapa bagian partikel terpisah dengan bagian utama. Hal tersebut dapat mengidentifikasi bahwa spesimen D sangat rapuh dari pada spesimen B, dan C.

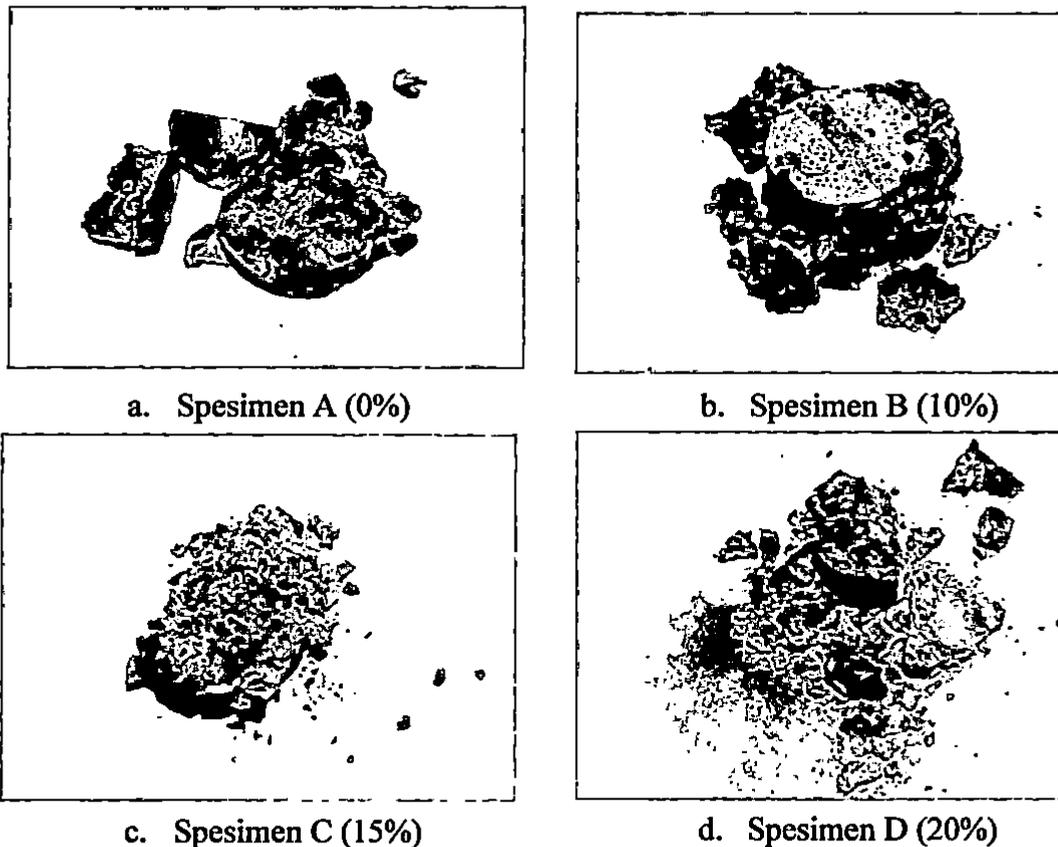
4.8.2 Kurva Pengujian Tekan



Gambar 4.13 Hubungan antara tegangan dan regangan pada tiap variabel

Pengujian kuat tekan dilakukan pada masing-masing spesimen dengan kecepatan penekanan yang sama yaitu 5mm/detik. Pada Gambar 4.13 menunjukkan grafik hubungan dari tegangan dan regangan. Tidak dihasilkan kurva yang konsisten yang menunjukkan peningkatan maupun penurunan pada

setiap variasinya. Pada spesimen A (0%) terlihat peningkatan grafik pada nilai tegangannya dengan nilai regangan yang lebih kecil. Pada spesimen C (15%) NaCl memiliki tegangan yang paling besar. Hal tersebut terjadi karena spesimen C mampu memiliki porositas yang terpusat pada satu area, sehingga beban penekanan lebih stabil. Spesimen hasil deformasi kuat tekan dapat dilihat pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Spesimen setelah dilakukan pengujian tekan

Terlihat bahwa spesimen mengalami kerusakan yang berbeda-beda. Pada spesimen A pada Gambar 4.14.a terlihat lebih cenderung mengalami kerusakan dengan bentuk yang solid artinya tidak terdapat serpihan aluminium dengan ukuran partikel yang kecil cenderung lebih ulet dan homogen. Pada gambar 4.14.b spesimen B kerusakan spesimen terlihat heterogen, artinya terdapat partikel bagian aluminium besar dan kecil dan sedikit dari NaCl yang terlihat. Pada Gambar 4.14.c spesimen C terlihat kerusakan yang cenderung lebih heterogen dibandingkan spesimen B partikel NaCl terlihat mengalami deformasi

namun terlihat kerusakan cenderung terpusat pada arah penekanan. Dan yang terakhir pada Gambar 4.14.d spesimen D terlihat kerusakan yang didominasi oleh terpisahnya *foaming agent* NaCl dari aluminium, yang terlihat seperti butiran pasir dan menjauhi arah penekanan. Didalam spesimen D terdapat banyak butiran NaCl yang terjebak dan diketahui setelah dilakukan uji penekanan. Kemungkinan besar, porositas bisa semakin besar jika massa pada spesimen 20% dikurangi dengan massa NaCl yang terjebak didalamnya. Hal tersebut sangat wajar dikarenakan NaCl tidak tercampur merata pada bagian tersebut dan akhirnya terakumulasi pada suatu area.

4.8.3 Perhitungan Modulus Elastisitas dan Tegangan Luluh

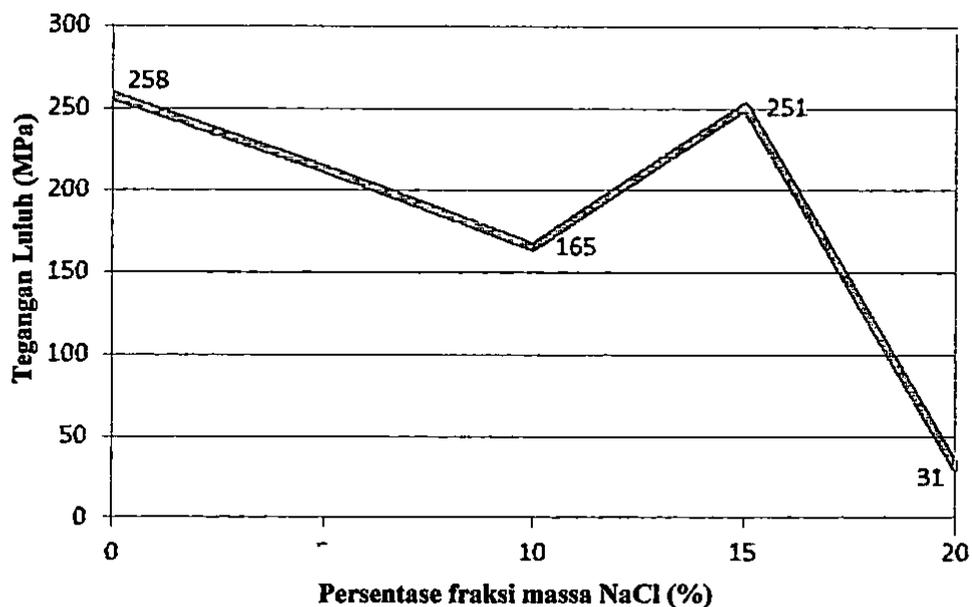
Tabel 4.3 Nilai tegangan luluh, modulus elastisitas dan porositas pada masing-masing spesimen.

Spesimen	Tegangan Luluh (MPa)	E (MPa)	Porositas (%)
A (0%)	257,7	239,4	2,8
B (10%)	165,3	84,4	14,6
C (15%)	251,4	127,0	24,4
D (20%)	31,4	29,4	32,8

Pada Tabel 4.3 keempat spesimen didapat perbandingan nilai tegangan luluh yang berbeda-beda. Nilai cenderung berubah secara fluktuatif seiring dengan penambahan nilai porositas. Nilai tegangan luluh pada spesimen A ke B cenderung mengalami penurunan, sedangkan C mengalami kenaikan nilai tegangan luluh, hal itu diakibatkan dari nilai *yield point* pada spesimen C lebih besar. Hal tersebut memang diluar prediksi dikarenakan pori pada spesimen C cenderung memusat pada satu titik sehingga menyebabkan titik luluh pada spesimen tersebut cenderung lebih besar dibandingkan dengan spesimen lain. Sedangkan tegangan luluh pada spesimen D mengalami penurunan yang cukup signifikan dikarenakan pori pada spesimen D didominasi dengan pori dengan ukuran yang besar dan nilai porositas yang besar sehingga cenderung rapuh dan tidak mampu menahan beban di atas 100 MPa. Penyebaran pori menentukan nilai tegangan luluh dikarenakan ketika diberi tekanan pada spesimen pori yang cenderung terpusat pada satu titik menyebabkan kekuatan yang lebih besar

dibandingkan dengan pori yang menyebar secara merata. Selain itu, busa aluminium memperlihatkan perilaku rapuh, sebagaimana dibuktikan oleh nilai kecilnya kuat tekan. Tren ini diyakini karena adanya sisa partikel NaCl larut dalam busa aluminium selama proses pencucian. NaCl dalam busa aluminium mempengaruhi sifat-sifat busa karena merupakan senyawa ionik. Selain itu, jarak pori yang terlalu rapat menyebabkan dinding sel busa menjadi terlalu tipis dan dengan demikian lemah (Husain dan Suffin, 2010, Zhao dkk 2006).

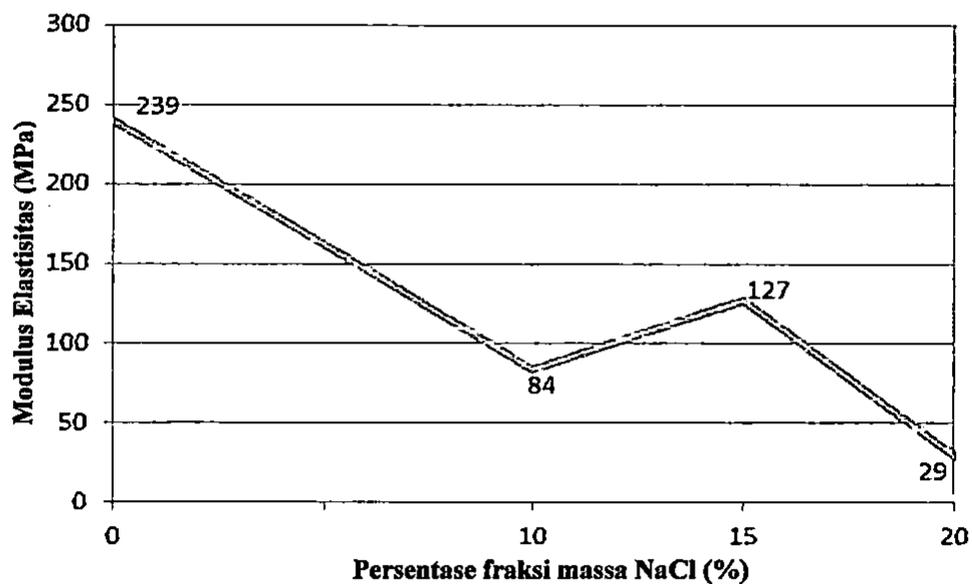
Pada spesimen D memiliki dinding sel terlemah dan penekanan lebih lanjut selama uji kompresi mengakibatkan spesimen gagal atau mengalami kolaps sebelum mengalami kenaikan tegangan. Grafik hubungan perhitungan tegangan luluh terhadap porositas ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 Hubungan antara tegangan luluh terhadap fraksi massa

Sama hal dengan nilai modulus elastisitas pada Gambar 4.16 setiap spesimen cenderung mengalami penurunan berbanding lurus dengan penambahan nilai porositas. Spesimen A memiliki nilai modulus elastisitas sebesar 239,4 MPa lebih besar jika dibandingkan dengan nilai modulus elastisitas pada spesimen D sebesar 29,4 MPa. Namun pada spesimen C mengalami kenaikan modulus elastisitas kembali kemungkinan besar penyebabnya sama seperti yang sudah dijelaskan pada paragraf diatas. Modulus elastisitas yaitu angka yang digunakan untuk

mengukur obyek atau ketahanan bahan untuk mengalami deformasi elastis ketika gaya diterapkan pada benda itu. Jika melihat hasilnya menunjukkan bahwa nilai tegangan luluh dan modulus elastisitas semakin kecil seiring dengan penambahan nilai porositas. Walaupun terlihat pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16 spesimen C mengalami kenaikan nilai tegangan luluh dan nilai modulus elastisitas dari spesimen B.



Gambar 4.16 Hubungan antara Modulus elastisitas terhadap fraksi Massa