

KAJIAN SIFAT FISIKA DAN MORFOLOGI KARET ALAM SELULAR PADA VARIASI TIPE BAHAN PENGEMBANG DAN BOBOT KOMPON

Study of Physical and Morphological Properties of Cellular Natural Rubber in Variations of Blowing Agent and Compound Weights

Sherly HANIFARIANTY^{1*} dan Mohamad Irfan FATHURROHMAN¹

¹Unit Riset Bogor Getas, Pusat Penelitian Karet. Jalan Salak No. 1 Bogor 16128

*Email: sherlyhanifarianty@yahoo.co.id

Diterima: 17 April 2023 / Disetujui: 31 Mei 2023

Abstract

Natural rubber foam which has a micro-cellular structure (cellular rubber) is an interesting biopolymer-based material to be developed. Some of advantages of cellular rubber include light weight, ergonomics because it is porous and economical so that it is suitable for use as rubber product for various purposes ranging from engineering to household. In this study, cellular rubber was prepared using Azodicarbonamide (ADC) as a blowing agent. ADC used was varied into types A and C. Furthermore, weight of the rubber compound to be moulded into cellular rubber was varied by 8; 12; 13.5; 15; and 17 grams. Cellular rubber manufacture refers to general method of making rubber compound followed by moulding. Evaluation of quality of cellular rubber is carried out by visualizing structure of morphology, density, and expansion ratio. In accordance to the test result, it was known that the optimum compound weight was 13.5 g due to more uniform cellular rubber morphological structure. Meanwhile, the blowing agent type A was preferred since it created cellular rubber with low density and higher expansion ratio.

Keywords: Azodicarbonamide; density; expansion ratio; organic foaming additive

Abstrak

Busa karet alam yang memiliki struktur mikro-seluler (karet selular) merupakan bahan berbasis biopolimer yang menarik untuk dikembangkan. Beberapa

keunggulan karet selular diantaranya ringan, ergonomis karena bersifat berpori, dan ekonomis sehingga cocok digunakan sebagai produk barang jadi karet untuk berbagai keperluan mulai dari teknik hingga rumah tangga. Pada penelitian ini dibuat karet selular dengan menggunakan Azodicarbonamida (ADC) sebagai bahan pengembang (*blowing agent*). ADC yang digunakan divariasikan menjadi tipe A dan C. Lebih lanjut, bobot kompon karet yang akan dicetak menjadi karet selular divariasikan sebesar 8; 12; 13,5; 15; dan 17 gram. Pembuatan karet selular mengacu pada metode umum pembuatan kompon karet dilanjutkan dengan pencetakan. Evaluasi mutu karet selular dilakukan melalui pengujian visualisasi struktur morfologi, densitas, dan rasio ekspansi. Berdasarkan hasil pengujian diperoleh bahwa bobot kompon terbaik adalah sebesar 13,5 gram karena menghasilkan karet seluler dengan struktur morfologi seragam. Sementara tipe bahan pengembang dipilih tipe A karena menghasilkan karet seluler dengan densitas rendah namun rasio ekspansi tinggi.

Kata kunci: aditif pengembang organik; *Azodicarbonamide*; kepadatan; rasio ekspansi

PENDAHULUAN

Karet mikro selular merupakan salah satu barang jadi karet yang menarik untuk dikembangkan dari segi komersial karena penggunaannya cukup luas mulai untuk keperluan teknis hingga rumah tangga. Karet mikro selular memiliki karakteristik

unik karena tersusun atas struktur sel halus yang terbentuk setelah karet mengalami reaksi vulkanisasi. Adanya struktur sel halus tersebut menjadikan karet mikro selular memiliki beberapa keunggulan diantaranya ringan, berpori, ergonomis, dan ekonomis (Bozhou et al., 2018). Beberapa produk karet berbasis karet mikro selular meliputi ban padat dan mainan (*toy tyres*) (Phromjan dan Suvanjumrat, 2018), sepatu dan pelindung untuk menyerap guncangan di lapangan olahraga (Nomoto et al., 2016).

Pembuatan karet mikro selular dari karet alam padat mengacu pada prosedur umum produksi kompon karet dilanjutkan dengan pencetakan. Namun dalam formulasi kompon karet mikro selular ditambahkan dengan bahan pengembang (*blowing agent*). Hasil penelitian terdahulu mengenai pembuatan karet mikro selular mengungkapkan bahwa kondisi pemrosesan atau vulkanisasi (suhu, waktu, dan tekanan) dan formulasi kompon (karet, pengisi, *blowing agent*, dan sistem vulkanisasi) dapat memengaruhi morfologi dan kualitas karet mikro selular yang dihasilkan (Tangboriboon et al., 2015; Vahidifar et al., 2016). Beberapa peneliti melaporkan bahwa peningkatan suhu vulkanisasi karet dapat mempercepat respon vulkanisasi dengan mengurangi waktu vulkanisasi dan torsi maksimum (Kim et al., 2006; Zakaria et al., 2007).

Khususnya pada pembuatan karet mikro selular, suhu vulkanisasi yang tinggi dapat meningkatkan volume dan tekanan gas di dalam karet mikro selular. Sehingga dapat menghasilkan banyak sel dengan berbagai ukuran, penurunan ketebalan sel dan densitas karet mikro selular (Kim et al., 2006; Sombatsompop dan Lertkamolsin, 2000; Zakaria et al., 2007). Selanjutnya, peningkatan suhu vulkanisasi juga dapat menurunkan sifat mekanik karet mikro selular meliputi modulus, perpanjangan putus, kekuatan tarik, dan kekerasan (Ariff et al., 2007). Selanjutnya dari aspek tekanan, peningkatan tekanan dapat menaikkan kepadatan sel dan sifat mekanik seperti kuat sobek, kekerasan, modulus,

dan kekakuannya (Kim et al., 2007). Oleh karena itu, penetapan kondisi vulkanisasi pada pembuatan karet selular menjadi faktor penting.

Faktor lain yang turut berpengaruh besar terhadap mutu karet selular adalah susunan formulasi kompon karet yang terdiri atas campuran karet dengan aditif bahan kimia karet. Tiga tingkatan mutu karet alam yaitu ENR-25, SMR 10, dan SMR-L dapat memengaruhi mutu karet selular (Ariff et al., 2007). Dari penelitian tersebut diketahui bahwa morfologi, sifat fisika, dan mekanik karet selular dapat ditetapkan dengan mengatur suhu dan tingkatan mutu karet alam. ENR-25 menghasilkan *compression stress* terbaik dibandingkan SMR 10 dan SMR L. Densitas dan ikatan silang karet selular merupakan fungsi dari bahan pengembang. Bahan pengembang tipe *Oxybisenzenesulphonylhydrazide* (OBSh) dapat menghasilkan lebih banyak pori dibandingkan tipe *Azodicarbonamide* (ADC) sehingga meningkatkan *swelling* karet selularnya (Sombatsompop dan Lertkamolsin, 2000).

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari tipe ADC sebagai bahan pengembang dalam formulasi karet selular berbasis karet alam dan bobot kompon karet yang akan diproses vulkanisasi melalui teknik pencetakan menjadi karet selular. Selain suhu, waktu dan tekanan, jumlah kompon karet yang akan dicetak diperkirakan turut berpengaruh terhadap performa pengembangan atau pembentukan sel.

BAHAN DAN METODE

Bahan utama yang digunakan dalam pembuatan karet selular dalam penelitian ini adalah karet alam tipe karet krep (*crepe*) yang diperoleh dari Pusat Penelitian Karet Sembawa. Selain itu juga digunakan bahan kimia karet yang terdiri atas bahan pengaktif (ZnO, asam stearat), antioksidan (*ionol*, atau *2,6-bis(1,1-dimethylethyl)-4-methylphenol*), bahan antiozon (*paraffin wax*), bahan

pencepat *N-Cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide* (CBS), bahan pencepat *Tetramethyl thiuram disulfide* (TMTD), bahan pemvulkanisasi (sulfur), bahan pengisi (*Carbon Black N330*), dan *blowing agent* (*azodicarbonamide*, ADC). Seluruh bahan kimia karet diperoleh dari distributor lokal, kecuali *blowing agent* yang disediakan oleh PT Lautan Otsuka Chemical. Penelitian dilakukan di Pabrik Percobaan Unit Riset Bogor Getas, Pusat Penelitian Karet, Bogor, Jawa Barat pada bulan Agustus 2021.

Rancangan percobaan menggunakan dua tipe ADC yaitu tipe A dan C, serta memvariasikan bobot kompon yang akan dicetak menjadi karet selular (Tabel 1). Tipe A adalah molekul organik ADC dengan suhu dekomposisi 195°C-202°C. Sementara Tipe C adalah molekul anorganik ADC dengan suhu dekomposisi 160°C. Oleh karena itu pada suhu rendah, tipe C dapat

menghasilkan gas lebih banyak daripada tipe A. Susunan bahan kompon karet sesuai dengan formulasi yang disajikan pada Tabel 2. Tahapan proses pembuatan karet mikro selular diawali dengan pembuatan kompon karet menggunakan mesin giling terbuka. Pada proses pembuatan kompon karet, karet alam dimastikasi terlebih dahulu selama 1 menit, kemudian diikuti dengan penambahan bahan kimia karet dilakukan secara perlahan, selama sekitar 3 menit antara lain bahan pengaktif (ZnO, asam stearat), bahan antioksidan (*ionol*), bahan antiozon (*paraffin wax*), bahan pencepat *N-Cyclohexyl-2-benzothiazole sulfonamide* (CBS), bahan pencepat *Tetramethyl thiuram disulfide* (TMTD), bahan pemvulkanisasi (sulfur), bahan pengisi (*Carbon Black N330*), dan *blowing agent* (*azodicarbonamide*, ADC). Kompon yang diperoleh kemudian dicetak menjadi karet mikro selular pada suhu 160°C selama 10 menit.

Tabel 1. Kode sampel penelitian
Table 1. Research sample code

Kode Sample Sample Code	Keterangan Description
A8	Bahan pengembang A dengan berat kompon karet 8 gram
A12	Bahan pengembang A dengan berat kompon karet 12 gram
A13,5	Bahan pengembang A dengan berat kompon karet 13,5 gram
A15	Bahan pengembang A dengan berat kompon karet 15 gram
A17	Bahan pengembang A dengan berat kompon karet 17 gram
C8	Bahan pengembang C dengan berat kompon karet 8 gram
C12	Bahan pengembang C dengan berat kompon karet 12 gram
C13,5	Bahan pengembang C dengan berat kompon karet 13,5 gram
C15	Bahan pengembang C dengan berat kompon karet 15 gram
C17	Bahan pengembang C dengan berat kompon karet 17 gram

Tabel 2. Formulasi karet alam mikro selular
Table 2. Micro cellular natural rubber formulation

Komponen Component	Dosis (bagian seratus karet, bsk) Dosage (per hundred rubber, phr)	
	Tipe A Type A	Tipe C Type C
Karet alam, <i>pale crepe</i>	100	100
Seng oksida, ZnO	5	5
Asam stearat	2	2
Ionol	2	2
<i>Paraffin wax</i>	3,5	3,5
Sulfeamida (CBS)	2	2
Thiuram (TMTD)	0,2	0,2
Sulfur	0,5	0,5
<i>Carbon black N330</i>	30	30
Azodicarbonamide Tipe A	5	-
Azodicarbonamide Tipe C	-	5

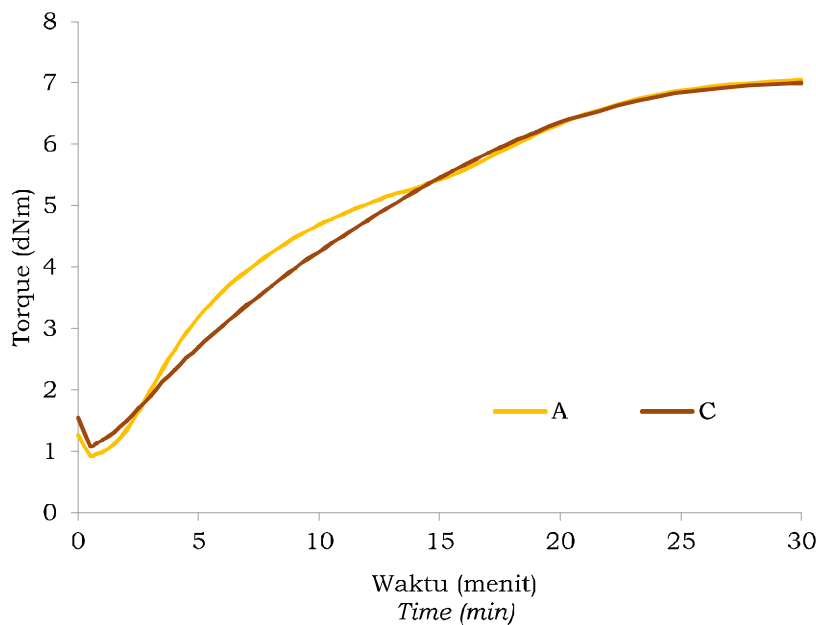
Evaluasi mutu kompon karet seluler meliputi parameter karakteristik vulkanisasi menggunakan *Moving Die Rheometer Alpha Technologies 2000* pada suhu 160°C dengan metode uji mengacu pada metode yang dikembangkan oleh Pusat Penelitian Karet. Selanjutnya karakterisasi mutu vulkanisasi karet seluler meliputi kepadatan (densitas) sesuai ASTM D297-2015 dan rasio ekspansi yang merupakan hasil dari densitas vulkanisat dibagi dengan densitas kompon (Rostami-Tapeh-Esmaeil et al., 2021) dan citra struktur ukuran pori/sel tertutup yang terbentuk menggunakan Mikroskop Digital dan diolah dengan menggunakan ImageJ yang di analisa secara kualitatif (tidak dilakukan pengukuran ukuran pori secara kuantitatif).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik Pematangan

Hasil uji karakteristik vulkanisasi disajikan pada Gambar 1. Berdasarkan Gambar 1 dapat terlihat bahwa kurva karakteristik vulkanisasi atau rheograf kompon karet seluler tipe A cenderung memiliki nilai torsi yang lebih tinggi dibandingkan dengan kompon karet seluler tipe C. Dengan demikian dapat diketahui

bahwa pada kompon karet seluler tipe A memiliki nilai derajat ikatan silang yang lebih besar daripada kompon karet seluler tipe C. Bertambahnya waktu hingga waktu optimum pemasakan tercapai akan meningkatkan ikatan silang (Mayasari dan Wirapraja, 2019). Kecenderungan nilai torsi yang ditunjukkan oleh kurva rheograf tersebut terkonfirmasi oleh besarnya nilai MH-ML kompon karet seluler tipe A dan tipe C yang dirangkum pada Tabel 3. Selisih torsi (MH-ML) dalam pengujian karakteristik vulkanisasi mengindikasikan besarnya nilai derajat ikatan silang. Kerapatan ikatan silang total dari sebuah kompon terkait juga dengan delta torsi (Nabil dan Ismail, 2013). Kompon karet seluler tipe A menghasilkan MH-ML sebesar 6,12 dNm, sementara nilai MH-ML pada kompon karet seluler tipe C hanya sebesar 5,91 dNm. Dari Tabel 3 juga dapat terlihat bahwa kompon karet seluler tipe A memiliki nilai ML yang lebih rendah daripada kompon karet seluler tipe C. Dengan demikian kompon karet seluler tipe A lebih mudah diproses dibanding kompon karet seluler tipe C. Parameter ML pada karakteristik vulkanisasi berkaitan dengan kemampuan proses atau pengolahan kompon karet. Secara keseluruhan, produk karet yang memiliki sifat yang lebih baik yaitu yang memiliki ikatan silang yang tinggi (Nabil dan Ismail, 2013).



Gambar 1. Hasil uji karakteristik pematangan karet seluler tipe A dan C
 Figure 1. Test results of types A and C cellular rubber vulcanization characteristics

Tabel 3. Karakteristik pematangan karet selular tipe A dan C
 Table 3. Cellular rubber vulcanization characteristics of types A and C

Karakteristik pematangan <i>Ripening characteristics</i>	Tipe A <i>Type A</i>	Tipe C <i>Type C</i>
MH, dNm	7,05	7,00
ML, dNm	0,93	1,09
MH – ML, dNm	6,12	5,91
t _{C90} , menit	20,37	20,29
t _{S2} , menit	3,12	7,00

Waktu *scorch* adalah waktu yang diperlukan kompon untuk dapat dibentuk sebelum mulai matang (*ts*). Pada Tabel 3 menunjukkan bahwa waktu *scorch* yang paling cepat adalah kompon tipe A selama 3 menit 12 detik. Dengan demikian berarti waktu yang diperlukan kompon untuk dapat dibentuk sebelum mulai matang tipe A lebih cepat dibandingkan kompon tipe C yang memerlukan waktu sekitar 7 menit. Secara keseluruhan, produk karet yang memiliki sifat yang lebih baik yaitu yang memiliki ikatan silang yang tinggi (Mayasari dan Wirapraja, 2019). Waktu pemasakan optimum merupakan yang diperlukan untuk membuat kompon karet selular menjadi matang atau tervulkanisasi (*t_{C90}*). Pada Tabel 3 dapat diketahui bahwa kompon karet selular tipe C memiliki waktu vulkanisasi optimum yang lebih singkat (20 menit 29 detik) daripada kompon karet selular tipe A (20 menit 37 detik), meskipun waktu *scorch* kompon karet selular tipe C cenderung lebih lambat.

Pada penelitian ini, desain kompon menggunakan jenis dan dosis bahan pencepat dan bahan pemvulkanisasi yang sama untuk kompon karet selular tipe A dan C, sehingga waktu vulkanisasi dipengaruhi oleh pemilihan jenis bahan pengembang yaitu ADC tipe A dan tipe C. Pada pengembangan atau pembusaan karet alam, proses vulkanisasi dan pembusaan terjadi secara simultan sehingga jenis bahan pengembang akan sangat berpengaruh terhadap karakteristik vulkanisasi kompon karet. Waktu vulkanisasi yang lebih cepat sangat penting diperlukan untuk proses produksi yang banyak, terkait dengan penggunaan energi dan waktu produksi (Alam dan Honggokusumo, 1998;

Chandrasekara dan Mahanama, 2011). Kerapatan ikatan silang yang besar membutuhkan tenaga / energi yang besar jika dibandingkan dengan kerapatan ikatan silang yang lebih kecil (Chandrasekara dan Mahanama, 2011). Kompon dengan bahan pengembang tipe C mempunyai waktu vulkanisasi optimal yang cepat sehingga lebih efisien apabila akan diproduksi skala besar.

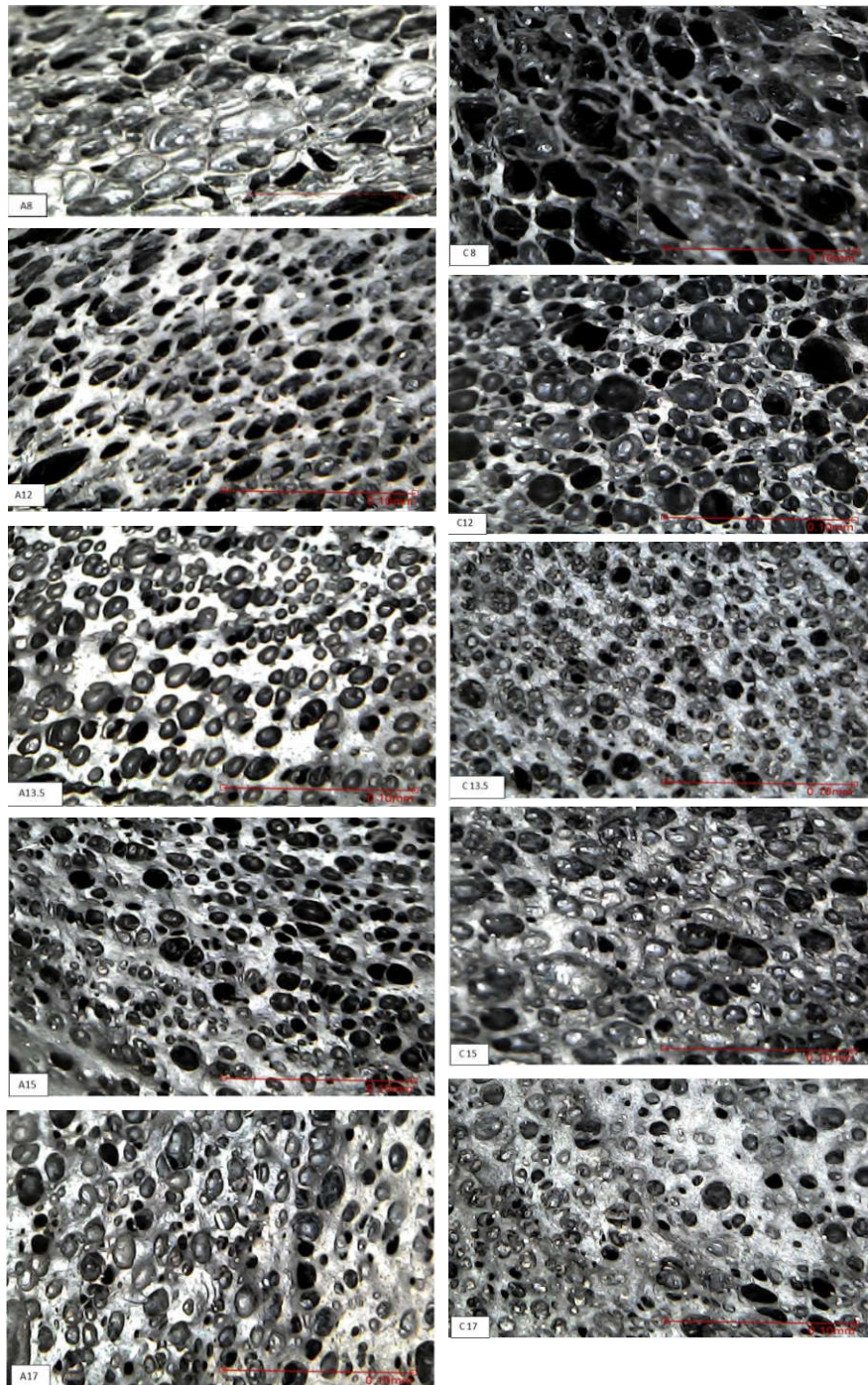
Morfologi Sel Tertutup

Citra hasil pengamatan morfologi karet mikro selular disajikan pada Gambar 2. Dari Gambar 2 tampak bahwa karet mikro selular yang dibuat pada bobot lebih besar saat pencetakan memiliki ukuran sel tertutup yang lebih kecil dibandingkan dengan karet mikro selular yang dibuat dengan bobot kompon lebih ringan. Sebagaimana terlihat pada karet mikro selular A17 dan C17 menunjukkan ukuran sel tertutup yang lebih kecil dibandingkan dengan sampel karet mikro selular A8 dan C8. Pada bobot kompon yang lebih besar mengakibatkan ruang yang diperlukan untuk pembentukan busa atau sel tertutup tersebut menjadi terbatas, sehingga menghambat pertumbuhan busa sebagai akibatnya menghasilkan ukuran sel tertutup yang berukuran kecil.

Temuan ini turut dikonfirmasi oleh hasil penelitian Vahidifar et al. (2016) yang menyatakan bahwa bobot kompon yang tinggi dapat mencegah pertumbuhan sel, menghasilkan busa dengan kepadatan sel yang lebih tinggi, dan ukuran sel yang lebih kecil. Selama proses pembentukan sel, tekanan dari gas (aditif pengembangan) mendorong pertumbuhan sel. Lebih lanjut,

untuk menghasilkan karet mikro selular dengan bentuk dan sifat tertentu maka harus menetapkan beberapa faktor. Faktor pertama mencakup parameter yang berkaitan dengan formulasi (jenis dan dosis)

termasuk karet, akselerator, pengisi, dan aditif pengembang. Faktor kedua terkait dengan kondisi pemrosesan seperti suhu, tekanan, waktu, jumlah proses, dan urutannya.



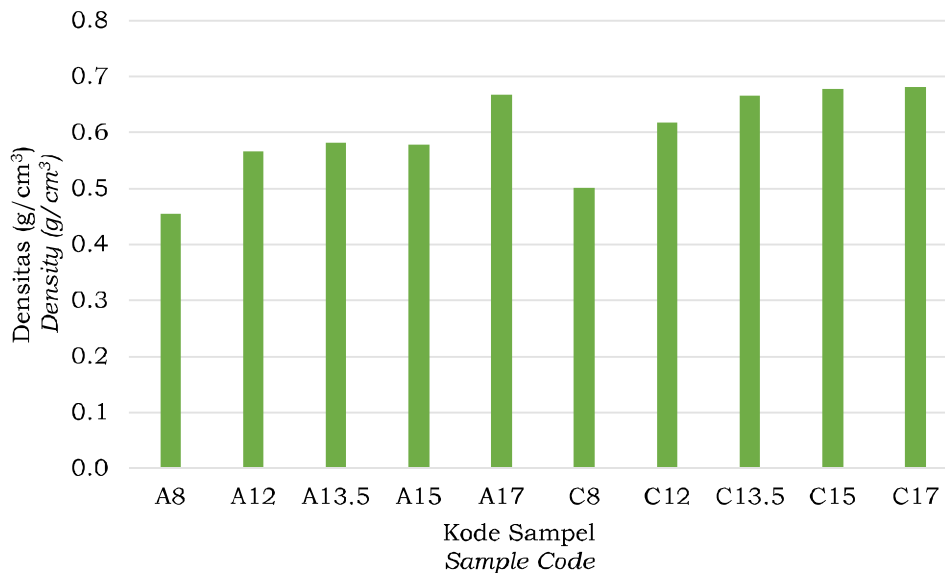
Gambar 2. Citra morfologi karet mikro selular. Dengan penambahan ADC tipe A (kiri) dan tipe C (kanan)

Figure 2. Morphological image of micro cellular rubber. With addition of ADC type A (left) and type C (right)

Densitas

Gambar 3 menyajikan data hasil pengujian densitas karet seluler yang diperoleh dari hasil percobaan. Mengacu pada Gambar 3 dapat diketahui bahwa pada tipe bahan pengembang yang sama namun bobot kompon yang lebih berat maka menghasilkan densitas yang lebih tinggi. Sementara jika dibandingkan antar tipe bahan pengembang, maka pada bobot kompon yang sama bahan pengembang tipe C cenderung menghasilkan karet mikro seluler yang lebih padat atau densitas lebih tinggi daripada bahan pengembang tipe A. Seperti yang telah disampaikan pada pembahasan morfologi sel tertutup, bahwa pada kompon karet yang lebih berat maka

jumlah ruang untuk pertumbuhan busa menjadi sangat terbatas akibatnya menghasilkan densitas (kepadatan) yang lebih tinggi. Kepadatan tinggi yang diperoleh pada karet mikro seluler yang diolah dengan bahan pengembang tipe C diperkirakan karena pembentukan gas pada bahan pengembang tipe C lebih sedikit daripada yang mampu dihasilkan oleh bahan pengembang tipe A. Vahidifar et al. (2016) mengemukakan bahwa karet mikro seluler dengan densitas yang tinggi memiliki struktur yang homogen dengan ukuran sel yang kecil dan banyak. Tetapi untuk densitas yang rendah, perkembangan mikro seluler berukuran lebih besar serta struktur sel lebih beragam dan memiliki banyak cacat.

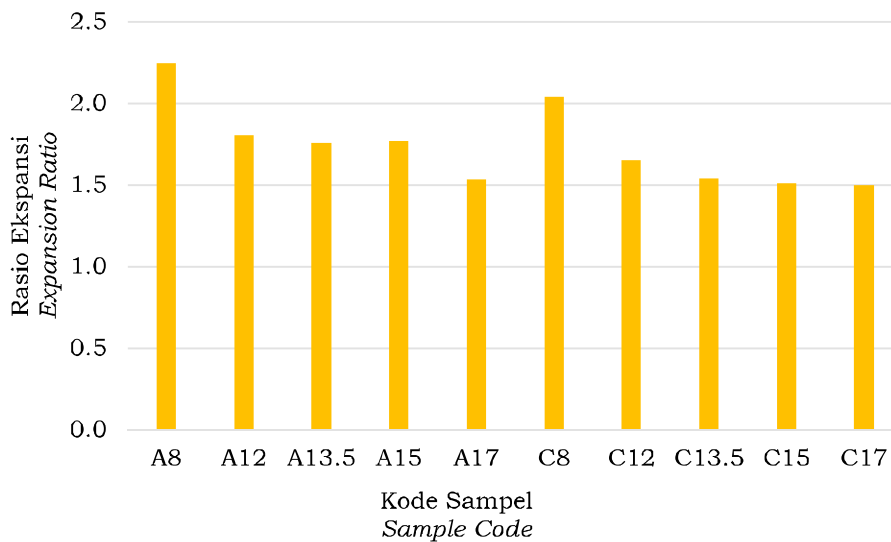


Gambar 3. Nilai densitas karet mikro seluler
Figure 3. Density of mikro seluler rubber

Rasio ekspansi

Rasio ekspansi merupakan perbandingan densitas kompon terhadap densitas mikroselular (Rostami-Tapeh-Esmaeil et al., 2021). Gambar 4 menunjukkan bahwa A17 dan C17 menunjukkan rasio ekspansi yang lebih rendah daripada yang lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa banyaknya jumlah kompon dapat menekan gas (seperti kompresi atau ketahanan) di dalam sel busa, sehingga menyebabkan pecahnya dinding sel. Akibatnya, terjadi deformasi permanen pada spesimen. Di sisi lain, energi yang terakumulasi dan dilepaskan selama siklus. Hal ini dapat mencegah kerusakan selanjutnya pada struktur sel dan penurunan tekanan gas dalam sel baru (Rostami-Tapeh-Esmaeil et al., 2021).

Perbedaan morfologi dapat dilihat dari metode pembentukan sel ekspansi terbatas dan ekspansi tidak terbatas. Untuk mikro selular konvensional metode yang digunakan yaitu metode ekspansi tidak terbatas, gas yang dilepaskan dapat memperluas volume sel tanpa batasan apapun dan mengakibatkan pengurangan kerapatan mikro selular. Sedangkan untuk metode ekspansi terbatas, dinding cetakan mencegah pertumbuhan gelembung dan pemuaiian sel dengan membatasi ruang yang dapat diakses untuk gelembung yang tumbuh (Rostami et al., 2021). Karena jumlah gas yang dihasilkan cukup banyak untuk mengisi rongga cetakan, sel yang terbentuk pada cetakan menyebabkan penumpukan tekanan. Oleh karena itu, diperkirakan bahwa tekanan sel internal akan meningkat dengan meningkatnya jumlah gas yang dilepaskan, sehingga menyebabkan pembentukan sel yang tinggi.



Gambar 4. Rasio ekspansi busa karet alam
 Figure 4. Expansion ratio of natural rubber foam

KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat ditarik kesimpulan bahwa properti karet seluler sangat dipengaruhi oleh kondisi saat pembuatan karet seluler tersebut, utamanya pemilihan bahan pengembang (*blowing agent*) dan penentuan bobot kompon yang akan diolah menjadi karet seluler. Bobot kompon sebesar 13,5 gram merupakan yang optimal karena mampu memberikan ukuran sel tertutup yang paling seragam. Sementara untuk tipe bahan pengembang dipilih tipe A karena cenderung menghasilkan karet seluler yang memiliki densitas rendah namun rasio ekspansi tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, L., & Honggokusumo, S. (1998). Pengerinan karet konvensional dengan bahan bakar briket batubara. *Jurnal Penelitian Karet*, 16(1-3): 1-21.
- Bozhou, Z., Liu, Y., & Yang, F. (2018). Experimental and numerical study on deformation performance of Rubber-Sleeved Stud connector under cyclic load. *Construction and Building Materials*, 192: 79-193.
- Chandrasekara, G., Mahanama, M. K., Edirisinghe, D. G., & Karunanayake, L. (2011). Epoxidized vegetable oils as processing aids and activators in carbon-black filled natural rubber compounds. *Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka*, 39(3), 243-250.
- Nabil, H., & Ismail, A. R. A. (2013). Compounding, mechanical and morphological properties of carbon-black-filled natural rubber/recycled ethylene-propylene-diene-monomer (NR/R-EPDM) blends. *Polymer Testing*, 32(2): 385-393.
- Kim, J. H., Koh, J. S., Choi, K. C., Yoon, J. M., & Kim, S.-Y. (2007). Effects of foaming temperature and carbon black content on the cure characteristics and mechanical properties of natural rubber foams. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 13(2): 198.
- Kim, J., Choi, K., & Yoon, J. (2006). The foaming characteristics and physical properties of natural rubber foams: effects of carbon black content and foaming pressure. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 12: 795.
- Mayasari, H. E., & Wirapraja, A. Y. (2019). Pengaruh jenis bahan pengisi terhadap karakteristik pematangan kompon kloroprena/karet alam. *Jurnal Teknologi Proses dan Inovasi Industri*, 4(1).
- Nomoto, A., Yasutaka, H., Oketani, S., & Matsuda, A. (2016). 2-Dimensional homogenization FEM analysis of hyperelastic foamed rubber. *Procedia Engineering*, 147: 431-436. doi: 10.1016/j.proeng.2016.06.335
- Phromjan, J., & Suvanjumrat, C. (2018). A suitable constitutive model for solid tire analysis under quasi-static loads using finite element method. *Engineering Journal*, 22(2): 141-155. doi: 10.4186/ej.2018.22.2.141
- Rostami-Tapeh-esmaeil, E., Vahidifar, A., Esmizadeh, E., & Rodrigue, D. (2021). Chemistry, processing, properties, and applications of rubber foams. *Polymers*, 13(10): 1-53. doi: 10.3390/polym13101565
- Sombatsompop, N., & Lertkamolsin, P. (2000). Effects of chemical blowing agents on swelling properties of expanded elastomers. *Journal of Elastomers and Plastics*, 32(4): 311-328.

- Tangboriboon, N., Pannangpetch, W., Aranyik, K., Petcharoen, K., & Sirivat, A. (2015). Embedded eggshells as a bio-filler in natural rubber for thermal insulation composite foams. *Progress in Rubber Plastics and Recycling Technology*, 31: 189–205.
- Vahidifar, A., Khorasani, S. N., Park, C. B., Khonakdar, H. A., Reuter, U., Naguib, H. E., & Esmizadeh, E. (2016). Towards the development of uniform closed cell nanocomposite foams using natural rubber containing pristine and organo-modified nanoclays. *RSC Advances*, 6(59): 53981–53990. doi: 10.1039/c6ra08168a
- Ariff, Z. M., Zakaria, Z., Tay, L. H., & Lee, S. Y. (2007). Effect of foaming temperature and rubber grades on properties of natural rubber foams. *Journal of Applied Polymer Science*, 107: 2531.
- Zakaria, Z., Ariff, Z. M., Lee Hwa, T., & Stephen Sipaut, C. (2007). Effect of foaming temperature on morphology and compressive properties of ethylene propylene diene monomer rubber (EPDM) foam. *Malaysian Polymer Journal (MPJ)*, 2(2): 22–30.