



## Uji Material Insulasi Termal LNG ISO Tank Pada Temperature Ruang.

Arnetta Mega Sundari<sup>1)</sup>, Hartono Yudo<sup>2)</sup>, Tuswan Tuswan<sup>3)</sup>  
Laboratorium Teknologi Material Kapal, Las, dan Produksi Kapal  
Departemen Teknik Perkapalan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro  
Jl. Prof. Soedarto, SH, Kampus Undip Tembalang, Semarang, Indonesia 50275  
<sup>3)</sup>E-mail : [Arnetamegas1@students.undip.ac.id](mailto:Arnetamegas1@students.undip.ac.id)

### Abstrak

Liquefied Natural Gas (LNG) memerlukan material insulasi termal yang mampu meminimalkan perpindahan panas selama proses penyimpanan dan transportasi. Polyurethane foam memiliki konduktivitas termal rendah, namun sifat mekaniknya masih perlu ditingkatkan. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh penambahan serat fiberglass terhadap densitas, konduktivitas termal, dan kekerasan Shore D polyurethane foam serta menentukan komposisi optimum untuk aplikasi insulasi LNG ISO Tank pada suhu ruang. Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan variasi fraksi massa fiberglass sebesar 0%, 5%, 10%, dan 15%. Pengujian densitas mengacu pada ASTM C134-95, konduktivitas termal ASTM E1225, dan kekerasan Shore D ASTM D2240. Hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan fraksi massa fiberglass menyebabkan densitas meningkat dari 0,034 g/cm<sup>3</sup> menjadi 0,072 g/cm<sup>3</sup>, konduktivitas termal meningkat dari 0,0316 menjadi 0,0359 kcal/m-jam.°C, dan kekerasan meningkat dari 78,50 menjadi 81,50 Shore D. Peningkatan densitas memberikan pengaruh positif terhadap sifat mekanik, namun sedikit menurunkan kemampuan insulasi termal. Dibandingkan polyurethane foam berpenguat fiberglass, polystyrene foam memiliki konduktivitas termal lebih rendah, tetapi sifat mekaniknya lebih rendah. Komposisi optimum diperoleh pada penambahan fiberglass 10% dengan densitas 0,059 g/cm<sup>3</sup>, konduktivitas termal 0,0332 kcal/m-jam.°C, dan kekerasan 80,75 Shore D.

Kata Kunci : Insulasi termal, Polyurethane foam, Serat fiberglass, Polystyrene foam, LNG ISO Tank, Konduktivitas termal, Kekerasan Shore D.

### 1. PENDAHULUAN

Indonesia sebagai negara kepulauan dengan sumber daya alam yang melimpah, memiliki potensi besar dalam pengembangan dan pemanfaatan Liquefied Natural Gas (LNG). Liquefied Natural Gas (LNG) semakin berperan penting dalam transisi energi global karena memiliki intensitas emisi karbon yang lebih rendah dibandingkan minyak maupun Batubara [1]. LNG didefinisikan sebagai “a commercially attractive phase of the commodity that facilitates the efficient handling, storage, and transportation of natural gas around the world.” Dengan bentuk cair ini, gas alam dapat diangkut dalam jumlah besar secara ekonomis melalui kapal pengangkut LNG berinsulasi tinggi [1].

Proses rantai pasok LNG meliputi beberapa tahapan utama, yaitu eksplorasi dan produksi gas

alam, likuifikasi (proses pencairan gas), penyimpanan (*storage*), pengangkutan (*shipping*), dan regasifikasi (*regasification*) sebelum disalurkan ke konsumen akhir. Setiap tahap rantai pasok LNG melibatkan pengendalian suhu ekstrem dan sistem keamanan yang ketat untuk mencegah kebocoran serta memastikan efisiensi termal selama proses distribusi global. Tahapan-tahapan tersebut menuntut material dan sistem insulasi termal yang sangat andal, terutama untuk mencegah perpindahan panas yang dapat menyebabkan *boil-off gas* (BOG) [1].

Selain sebagai isu teknis, LNG juga memiliki dimensi ekonomi dan strategis yang luas. Dalam buku *LNG: A Nontechnical Guide*, perkembangan LNG secara global tidak hanya dipicu oleh kemajuan teknologi likuifikasi, tetapi juga oleh meningkatnya permintaan energi bersih, kebijakan dekarbonisasi, serta fleksibilitas perdagangan LNG

di pasar internasional [2]. Buku tersebut menjelaskan bahwa rantai suplai LNG kini menjadi elemen penting dalam sistem energi dunia karena kemampuannya menjembatani kesenjangan antara wilayah penghasil gas dan wilayah konsumen utama. Oleh karena itu, negara seperti Indonesia perlu memiliki infrastruktur LNG yang efisien dan aman untuk mendukung ketahanan energi nasional.

Sifat bahan insulasi pada kapal LNG *ISO Tank* penting karena pengaruhnya terhadap efisiensi pengangkutan LNG dan keselamatan kapal. Kualitas insulasi yang buruk dapat menyebabkan kebocoran atau penguapan LNG yang berbahaya, serta mengurangi efisiensi transportasi LNG karena lebih banyak energi yang dibutuhkan untuk mempertahankan suhu LNG cair. Kinerja termal dan teknik pemasangan bahan insulasi yang berbeda adalah faktor yang menjadi fokus sebagian besar pemilik kapal saat memilih insulasi. Bahan yang baik yang dapat digunakan sebagai insulasi harus memiliki berat jenis bahan  $p > 30 \text{ kg/m}^3$  [3]. Salah satu material yang banyak digunakan sebagai insulasi *cryogenic* adalah *polyurethane foam*. Material ini memiliki densitas rendah, struktur sel tertutup dan konduktivitas termal rendah sehingga efektif digunakan sebagai material insulasi. Dalam buku *Handbook of plastics, Elastomers, and Composites*, polyurethane merupakan material polimer yang memiliki fleksibilitas tinggi karena sifat mekanik dan termalnya dapat dimodifikasi melalui variasi komposisi *polyol* dan *isocyanate* [4].

Penelitian terdahulu, menjelaskan sistem insulasi Mark-III untuk CCS yang terdiri dari panel busa poliuretan (PUF) yang diperkuat fiberglass untuk memperlambat perambatan retak pada suhu *cryogenic*. Panel insulasi memiliki dua penghalang untuk mencegah kebocoran LNG. Batang utama terbuat dari pelat baja tahan karat bergelombang (304L) yang dilas setebal 1,2 mm. Lipatan kira-kira 25 mm pada membran baja tahan karat mengurangi tekanan termal pada suhu *cryogenic*. Namun, bagian bergelombang sering rusak selama operasi karena tekanan dampak kavitasi dari aliran LNG [5]. Dalam penelitian lain metode pengujian baru dikembangkan untuk mengevaluasi regangan penghalang sekunder aluminium pada panel insulasi busa. Dari percobaan, tegangan akhir aluminium dengan busa poliuretan meningkat menjadi 14,3% ketika fraksi volume kain kaca lebih besar dari 15,4% dan kain yang diresapi dengan perekat yang disembuhkan di bawah tekanan dari 0,001 hingga 0,1 MPa, yaitu 4,3 kali lebih tinggi daripada kegagalan deformasi aluminium pada suhu *cryogenic* [6].

Karakteristik struktur sel pada *polyurethane foam* juga mempengaruhi kemampuan

perpindahan panas material. Pada penelitian terdahulu menunjukkan bahwa *polyurethane foam* memiliki nilai konduktivitas termal sebesar 33,3-34,5 mW/m·K pada tekanan atmosfer normal dan dapat menurun hingga 6,82-9,15 mW/m·K pada tekanan rendah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa ukuran sel dan tekanan lingkungan berpengaruh terhadap performa insulasi termal *polyurethane foam* [7].

Dalam penelitian terdahulu *polyurethane foam* yang di variasikan dengan serat kaca dengan fraksi berat 2%, 4%, 6%, 8%, 10% untuk pengujian densitas, konduktivitas termal, penyerapan air dan sifat mekanik (kekerasan, kekuatan kompresi, kekuatan lentur. Dari hasil yang didapat ditemukan bahwa peningkatan serat kaca dalam matriks polyurethane menghasilkan peningkatan konduktivitas termal yang signifikan, dan menghasilkan peningkatan yang signifikan pada sifat mekanik seperti kekerasan, kekuatan lentur, kekuatan tekan. Dan nilai puncak sifat mekanik seperti kekerasan, kekuatan lentur ditemukan pada 8% fraksi berat serat kaca dan kekuatan tekan, kekuatan impak ditemukan pada 10% fraksi berat serat kaca [8]. Dalam penelitian lain, menjelaskan tentang studi perbandingan tiga bahan isolasi yang dipasang pada tanki independent C untuk transportasi LNG lepas pantai. Kinerja bahan insulasi di uji dengan melakukan eksperimen dengan LN2 dan membandingkan data eksperimen yang diperoleh dengan hasil numerik yang dihitung menggunakan konduktif setara. Perbedaan relatif antara ketahanan termal numerik dan ketahanan termal eksperimental adalah 6,2 % sedangkan ketidakpastian relatif maksimum ketahanan termal dihitung sebesar 8 % . Untuk PIRB dan SAB, hasil eksperimen ketahanan termal sedikit lebih rendah dibandingkan hasil numerik. Ketahanan termal yang lebih tinggi pada isolasi menyebabkan ketebalan yang lebih tipis dan ruang pengaturan tambahan di ruang kargo, dan lebih banyak biaya konstruksi kapal yang dapat dikurangi karena kemungkinan pengurangan dimensi kapal. Hasil ketahanan termal masing-masing adalah 0,62 K/W, 0,38 K/W dan 0,84 K/W untuk SPF, PIRB dan SAB. Ketahanan termal yang lebih tinggi pada isolasi menyebabkan ketebalan yang lebih tipis dan ruang pengaturan tambahan di ruang kargo, dan lebih banyak biaya konstruksi kapal yang dapat dikurangi karena kemungkinan pengurangan dimensi kapal [9].

Pada Penelitian sebelumnya *polyurethane foam* banyak digunakan pada sistem *cargo containment* LNG karena memiliki kemampuan insulasi termal dan kekuatan mekanik yang baik pada temperatur *cryogenic*. Penelitian menunjukkan

bahan penambahan *silica aerogel* sebesar 1wt.% mampu meningkatkan kekuatan mekanik dan mempertahankan struktur sel tertutup *polyurethane foam* pada temperature -163 %C [10].

Selain itu, densitas material juga menjadi parameter penting pada material insulasi. Penelitian Lee et al, menunjukkan bahwa peningkatan densitas *polyurethane foam* mempengaruhi nilai konduktivitas termal dan kapasitas panas material selama proses pemanasan. Semakin tinggi densitas material, maka struktur foam menjadi lebih padat sehingga mempengaruhi karakteristik perpindahan panas pada material. [11].

Penelitian ini difokuskan pada analisis pengaruh variasi fraksi massa serat *fiberglass* terhadap karakteristik termal dan mekanik dari komposit *polyurethane foam*, serta perbandingannya dengan *polystyrene foam*. Pengujian meliputi uji densitas, konduktivitas termal, dan kekerasan *Shore D*. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen melalui uji densitas berdasarkan ASTM C 134-95 dan uji konduktivitas termal dengan standar ASTM E1225 pada spesimen berukuran 4 mm dan 2 mm dan uji kekerasan shore D menggunakan standar sesuai ASTM D2240-15 dengan ukuran panjang 80 mm, lebar 70 mm dan tebal 6 mm. Dengan mengetahui kombinasi terbaik, maka dapat ditentukan material insulasi yang layak diaplikasikan pada *LNG ISO Tank* dalam kondisi suhu ruang.

## 2. METODE

### 2.1. Karakteristik Material Insulasi

#### 2.1.1 *Polyurethane Foam*

*Polyurethane* adalah salah satu bahan paling serbaguna di dunia saat ini. Banyak kegunaannya berkisar dari busa fleksibel pada *furniture* berlapis kain, hingga busa kaku sebagai isolasi di dinding, atap dan peralatan hingga poliuretan termoplastik yang digunakan pada perangkat medis dan alas kaki, hingga pelapis, perekat, sealant, dan elastomer yang digunakan pada lantai dan interior otomotif. *Polyurethane* semakin banyak digunakan tiga puluh tahun terakhir dalam berbagai aplikasi karena kenyamanan, manfaat biaya, penghemat energi dan potensi Kesehatan lingkungan. *Polyurethane* mewakili kelas penting dari polimer termoplastik dan thermoset karena sifat mekanik, termal, dan kimiannya dapat disesuaikan dengan reaksi berbagai *polyol* dan *isocyanate* sehingga jika dicampur dengan variasi komposisi tertentu memungkinkan didapatkan sifat-sifat baru. *Polyurethane* adalah bahan polimer yang mengandung gugus fungsi uretan (NHCOO-) dalam rantai utamanya. Gugus uretan tersebut

terbentuk dari adanya reaksi antara gugus *isocyanate* dengan gugus hidroksil [12]. (polimer vinil, ko-polimer, poliurea, dan poliuretan) dalam polister cair.

Saat ini, polimer *polyol* adalah salah satu kelompok perantara *polyol* terpenting untuk poliuretan elastis. *Polyol* merupakan senyawa yang memiliki setidaknya dua gugus *hydroxyl*. *Polyol* meliputi beberapa jenis diantaranya *pogether polyol*, *polyester polyol*. *Polyolefin* dan minyak *vegetable* yang mengandung hidroksil. *Polyol* terbentuk dari reaksi hidrosilasi. Reaksi hidrosilasi meliputi dua tahap reaksi, yaitu reaksi epoksidasi pembentukan cincin epoksida (oksidan) dan reaksi pembukaan cincin oksiran [13].

Sedangkan *polyurethane B* atau *isocyanate* merupakan gugus fungsi yang memiliki rumus kimia R-N-C-O. Gugus fungsi ini diproduksi bersama *polyol* untuk memproduksi *Polyurethane*. *Isocyanate* juga merupakan elektrofil yang mana reaktif terhadap berbagai macam nukleofil seperti alkohol, amina, ataupun air. Oleh karena itu, jika *isocyanate* ini bereaksi dengan alkohol nantinya dapat menghasilkan ikatan uretan [14]

#### 2.1.2 Serat *Fiberglass*

Serat *Fiberglass* memiliki banyak kegunaan, seperti dalam pembuatan kapal, mobil, tangki cairan, atap, pipa, pelapis dan lain-lain. Serat ini diproduksi dengan cara dipintal menjadi benang atau ditenun menjadi kain, dan kemudian diresapi dengan resin untuk menjadikannya bahan yang kuat dan tahan korosi. Serat *Fiberglass* tidak terlalu sulit untuk diproduksi. Bahan utamanya terdiri dari tiga bagian, yaitu serat, resin dan katalis. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kekuatan, ketangguhan dan kekerasan material serat gelas berdasarkan variasi pola serat, dengan tetap mempertahankan komposisi resin dan katalis. Selain itu, sifat-sifat material tersebut dibandingkan dengan sifat-sifat material plastik yang digunakan sebagai bahan pembuatan suku cadang kendaraan bermotor [15].

#### 2.1.3 *Polystyrene Foam*

*Polystyrene Foam* adalah polimer sintesis yang dibentuk melalui polimerisasi adisi dari monomer stirena (C<sub>8</sub>H<sub>8</sub>). Monomer stirena sendiri merupakan senyawa aromatik dengan gugus vinil, yang memungkinkan terjadinya reaksi polimerisasi menjadi rantai panjang dengan unit berulang. Struktur dasar PS terdiri dari tulang punggung karbon yang panjang dengan gugus fenil (C<sub>6</sub>H<sub>5</sub>) yang terikat pada setiap atom karbon kedua, yang menjadikan PS bersifat kaku dan transparan.

*Polystyrene* diproduksi melalui proses polimerisasi adisi, khususnya menggunakan

mekanisme radikal bebas. Proses manufakturnya terbagi menjadi beberapa metode:

- a. **Polimerisasi Massal (*Bulk Polymerization*):** Dilakukan tanpa pelarut, proses ini menghasilkan PS dengan kemurnian tinggi. Namun, pengendalian suhu menjadi tantangan karena reaksi eksotermik yang terjadi.
- b. **Polimerisasi Suspensi (*Suspension Polymerization*):** Monomer stirena didispersikan dalam air dengan bantuan surfaktan dan pengadukan. Inisiator larut dalam fase organik, membentuk partikel kecil yang mudah dikeringkan dan diproses.
- c. **Polimerisasi Emulsi (*Emulsion Polymerization*):** Melibatkan pembentukan partikel polimer dalam emulsi air dan digunakan untuk aplikasi khusus seperti pelapis dan lateks.

Beberapa karakteristik busa polistiren telah dipelajari secara ekstensif di beberapa makalah penelitian melaporkan bahwa Busa polistiren (*EPS*) merupakan bahan industri yang banyak digunakan dalam konstruksi jalan, otomotif, arsitektur, dan lain sebagainya. Dibandingkan dengan plastik polistiren non-busa, *EPS* memiliki kepadatan lebih rendah, konduktivitas termal lebih rendah, dan kekuatan bantalan beban per satuan berat lebih tinggi. Lebih penting lagi, sifat busa polimer dapat dengan mudah diatur dengan mengontrol ukuran pori, kepadatan relatif, struktur sel, dan aditif. Busa polistiren banyak digunakan dalam industri karena ringan, mudah dibentuk, dan tahan terhadap kelembapan [16]

*Polystyrene* diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis berdasarkan sifat fisik dan aplikasinya:

- a. **General Purpose Polystyrene (*GPPS*):** *Polystyrene* jenis ini bersifat bening dan rapuh. Digunakan dalam aplikasi yang membutuhkan kejernihan seperti wadah makanan, peralatan laboratorium, dan komponen elektronik.
- b. **High Impact Polystyrene (*HIPS*):** Merupakan campuran antara *polystyrene* dan karet butadiena yang meningkatkan ketahanan terhadap benturan. Digunakan untuk casing alat elektronik, mainan, dan komponen otomotif.
- c. **Expanded Polystyrene (*EPS*):** Dibuat dengan menambahkan blowing agent selama proses polimerisasi, menghasilkan struktur busa ringan yang digunakan untuk isolasi termal, kemasan pelindung, dan bahan bangunan.
- d. **Extruded Polystyrene (*XPS*):** Bentuk busa padat dari *polystyrene* yang memiliki kerapatan dan daya tahan mekanik lebih tinggi dibandingkan *EPS*. Umumnya digunakan dalam konstruksi sebagai material insulasi.

## 2.2. Persiapan Pembuatan Material

### 2.2.1 Persiapan Pembuatan *Polyurethane foam* dengan fraksi massa *fiberglass*

Proses pembuatan komposit *polyurethane foam* diperkuat serat *fiberglass* diawali dengan tahap persiapan alat dan bahan. Alat yang digunakan meliputi timbangan digital untuk menakar massa bahan, gelas ukur atau gelas kimia untuk pencampuran, pengaduk, dan cetakan. Bahan-bahan utama yang digunakan dalam proses ini adalah komponen polioliol dan isosianat sebagai pembentuk *polyurethane*, serta serat *fiberglass* sebagai bahan penguat. Tahap awal dimulai dengan menimbang komponen polioliol dan isosianat sesuai dengan perbandingan stoikiometrik yang disarankan, biasanya dalam rasio 1:1 berdasarkan massa atau volume, tergantung karakteristik bahan. Serat *fiberglass* dengan bentuk potongan pendek (*chopped strand*) ditimbang sesuai dengan fraksi massa yang direncanakan yaitu 0%, 5%, 10% dan 15% dari total massa *polyurethane*.

Selanjutnya, polioliol dicampur dengan isosianat dan dilakukan pengadukan cepat selama kurang lebih 10–20 detik. Dalam kondisi reaksi yang cepat ini, serat *fiberglass* dapat dimasukkan dengan dua metode, yaitu: (1) dicampurkan langsung ke dalam adonan *polyurethane foam* sebelum dituangkan ke cetakan (*bulk mixing*), atau (2) diletakkan terlebih dahulu di dalam cetakan, lalu dituangi campuran *polyurethane* reaktif. Campuran yang telah homogen kemudian dituangkan ke dalam cetakan yang telah dilapisi release agent agar hasil tidak lengket. Untuk mengendalikan ekspansi busa, cetakan dapat ditutup rapat, terutama jika bentuk spesimen harus padat atau tidak mengembang berlebihan. Reaksi pembentukan busa berlangsung dalam beberapa menit, dan spesimen dibiarkan selama  $\pm 20$ –30 menit hingga proses pembentukan selesai dan busa mulai mengeras.

### 2.2.2 Persiapan Pembuatan *Polystyrene foam*

Pembuatan *polystyrene* dilakukan melalui proses polimerisasi adisi menggunakan monomer stirena sebagai bahan dasar. Proses ini termasuk dalam kategori polimerisasi radikal bebas, di mana inisiator berperan dalam memulai reaksi rantai polimerisasi. Salah satu inisiator yang umum digunakan dalam proses ini adalah *benzoyl peroxide (BPO)*, yang mampu menghasilkan radikal bebas saat terdekomposisi pada suhu tertentu.

Pertama-tama, bahan baku untuk produksi polistirena, yaitu monomer stirena, disiapkan. Monomer stirena kemudian dipolimerisasi menggunakan katalis seperti benzoil peroksida,

yang menghasilkan polistirena dalam bentuk cair. Polistirena cair kemudian dicetak menjadi bentuk yang diinginkan dan didinginkan hingga memadat. Polistirena yang dihasilkan memiliki kepadatan rendah dan ketahanan benturan yang baik.

### 2.3. Pengujian Material

#### 2.3.1 Uji Densitas

Pengujian densitas dilakukan untuk mengetahui massa jenis material berdasarkan ASTM C 134-95 dan untuk geometri material yang berbentuk silinder, kubus atau balok. Selain itu, sampel harus disimpan selama minimal 16 jam pada kondisi atmosfer standar atau dalam kondisi kering, dan massa atau volumenya harus dicatat.

Sampel yang telah dibuat harus menunggu setidaknya 72 jam setelah dibuat dan sebelum dipotong. Sampel harus disimpan setidaknya selama 16 jam pada kondisi atmosfer standar atau dalam kondisi kering. Pengukuran dimensi dilakukan dalam satuan (mm) dengan melakukan setidaknya tiga pengukuran terpisah untuk setiap dimensi. Pengujian densitas dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\rho = \frac{m_k}{v}$$

Dimana  $\rho$  adalah densitas dalam gram/cm<sup>3</sup>,  $M_k$  adalah massa sampel (gram),  $v$  adalah volume sampel (cm<sup>3</sup>).

#### 2.3.2 Uji Konduktivitas Termal

Konduktivitas termal dapat diartikan sebagai kemampuan suatu material untuk menghantar laju panas. Dalam bahan insulasi kapal LNG, diperlukan suatu material yang memiliki nilai konduktivitas termal yang rendah. Pengujian ini dilakukan di Laboratorium Perpindahan Panas dan Massa Fakultas Teknologi Mekanik Universitas Gadjah Mada. Alat Ukur Konduktivitas Termal yang digunakan untuk tujuan ini adalah tipe OSK 4565, diproduksi oleh Tokyo Meter Co., model HVS-4000SE yang menggunakan benda uji masing-masing berdiameter 40 mm, tinggi 4 mm dan 2 mm. Setiap jenis material (PU 0%, 5%, 10%, 15%, dan *polystyrene foam*) diuji sebanyak 2 kali ( $n = 2$ ) untuk memperoleh nilai rata-rata yang representatif. Pengukuran konduktivitas termal dilakukan dengan alat uji konduktivitas termal yang menggunakan termokopel dengan 12 posisi kawat penghantar panas, dengan bahan uji berukuran 4 mm terletak di antara termokopel 4 dan 5 serta bahan uji berukuran 2 mm di antara termokopel 6 dan 7, seperti yang diilustrasikan pada gambar (1).



Gambar 1. Peralatan uji coba termokopel

Penelitian mengenai konduktivitas termal telah dilakukan oleh para ahli geofisika sejak abad ke-19, seperti penelitian yang dilakukan oleh Ppilsen pada tahun 1981 dengan menggunakan probe Neddle. Temperatur adalah ukuran panas atau dinginnya suatu benda. Rumus untuk menghitung konduktivitas termal suatu bahan adalah sebagai berikut:

$$\lambda = \frac{L_b - L_a}{\left\{ \frac{L_b}{\lambda_{b'}} - \frac{L_a}{\lambda_{a'}} \right\}}$$

dengan nilai :

$$\lambda_{a'} = \frac{\Delta t_R L_a}{\Delta t_a L_R} \lambda_R \text{ dan } \lambda_{b'} = \frac{\Delta t_R L_a}{\Delta t_b L_R} \lambda_R$$

dimana  $L_a = 2$  mm dan  $L_b = 4$  mm,  $L_R = 30$  mm, dan  $\lambda_R = 320$  kcal/m<sup>o</sup>C

#### 2.3.3 Uji Kekerasan Shore D

Kekerasan adalah ketahanan material terhadap goresan atau penetrasi pada permukaan. Definisi lainnya adalah ukuran ketahanan material terhadap deformasi plastis. Dalam uji kekerasan ini, digunakan uji *shore D*. Dalam pengujian ini, digunakan jarum tajam, *Tenclock GS-720N* Tipe D. Untuk polimer, ada dua skala pengukuran, *Shore D* untuk plastik atau karet. Untuk polimer ada dua skala pengukuran, *Shore D* untuk plastik atau karet yang keras dan *Shore A* untuk karet yang lunak. *Shore D* menggunakan penekan berbentuk kerucut yang ditahan oleh pegas yang telah dikalibrasi. Nilai *Shore D* menunjukkan kedalaman penetrasi yang dilakukan oleh alat penekan pada permukaan bahan uji.

Alat uji durometer dengan metode *Shore D Hardness* sesuai ASTM D2240-15 dengan ukuran panjang 80 mm, lebar 70 mm dan tebal 6 mm. Pengujian kekerasan pada setiap sampel dilakukan sebanyak 4-5 kali kemudian dirata-ratakan. Hal ini dilakukan karena ada beberapa pengukuran yang mengenai gelembung sehingga menyebabkan kepala kerucut masuk ke dalam gelembung. Oleh karena itu, nilai yang diperoleh bukan merupakan nilai kekerasan dari sampel [17].

### 3 HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Hasil Uji Densitas

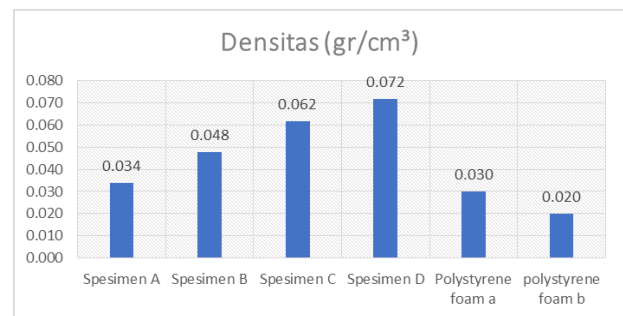
Pengukuran densitas dilakukan untuk mengetahui besaran massa suatu benda setiap satuan volume. Pengukuran diawali dengan mengukur dimensi spesimen untuk mendapatkan nilai volume dan menimbang massa spesimen lalu besarnya nilai densitas sesuai dengan standar ASTM C134-95. Spesimen yang digunakan berbentuk silinder dengan diameter 40 mm dan tinggi 4 mm. Didapatkan densitas dari masing-masing specimen dengan menggunakan persamaan (1) seperti pada tabel 4.1

Tabel 1. Hasil Uji Densitas Spesimen.

Kode Sampel	Massa (gram)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Densitas (gr/cm <sup>3</sup> )
Spesimen A	0.17	5.03	0.034
Spesimen B	0.24	5.03	0.048
Spesimen C	0.31	5.03	0.062
Spesimen D	0.36	5.03	0.072
<i>Polystyrene foam a</i>	0.15	5.03	0.030
<i>polystyrene foam b</i>	0.1	5.03	0.020

Tabel 1. berikut merupakan tabel hasil perhitungan densitas yang dilakukan pada spesimen *Polyurethane* murni dan komposit serat gelas. Hasil perhitungan densitas menunjukkan bahwa penambahan serat *fiberglass* dalam komposisi material meningkatkan nilai densitasnya. Pada hasil pengujian spesimen A yaitu *polyurethane* murni didapatkan densitas sebesar 0,034 g/cm<sup>3</sup>. Sementara pada komposisi *Polyurethane-Serat Fiberglass* diketahui bahwa pada fraksi massa 5% didapatkan densitas sebesar 0,048 g/cm<sup>3</sup>, kemudian pada fraksi massa 10% densitas meingkat 0,062 g/cm<sup>3</sup> dan pada fraksi massa 15% meningkat menjadi 0,072 g/cm<sup>3</sup>. *Polystyrene foam A* memiliki densitas 0,030 g/cm<sup>3</sup>, sedangkan *polystyrene foam B* mencapai 0,020 g/cm<sup>3</sup>. Hal ini menunjukkan bahwa struktur sel *polystyrene* lebih besar dan berpori, sehingga menghasilkan massa jenis yang rendah [18]. Secara keseluruhan, tren kenaikan densitas pada *polyurethane-serat fiberglass* menandakan peningkatan kerapatan internal material akibat fraksi serat yang mengisi ruang kosong antarsel. Densitas yang lebih tinggi berpotensi meningkatkan kekerasan dan kekuatan mekanik,

tetapi juga dapat memengaruhi konduktivitas termal.



Gambar 2. Hasil Pengujian Densitas

Gambar 2. juga menunjukkan bahwa penambahan serat *Fiberglass* berpengaruh terhadap nilai densitas dari *polyurethane* seperti grafik yang ada diatas. Perbedaan densitas tiap spesimen diakibatkan oleh varian fraksi massa serat *fiberglass* yang berbeda. Selain itu, proses pemadatan spesimen juga memiliki pengaruh dalam kerapatan material. Dan dari Gambar 2 dapat disimpulkan bahwa semakin banyak penambahan serat maka akan semakin meningkat massa jenis atau densitasnya

#### 3.2. Hasil Pengujian Konduktivitas Termal

Spesimen untuk pengujian konduktivitas termal memiliki diameter sebesar 40 mm dengan tinggi 4 mm dan 2 mm sesuai dengan standar alat uji konduktivitas termal dan mengikuti komposisi campuran yang sudah ditentukan. Hasil dari pembuatan spesimen untuk pengujian konduktivitas termal dengan perbedaan komposisi dapat terlihat berbeda tekstur permukaan dikarenakan memiliki komposisi yang berbeda.

Tabel 2. Hasil Pengujian Konduktivitas Termal

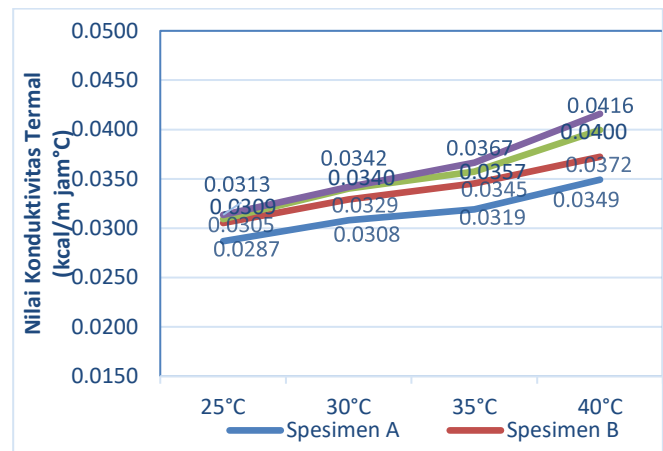
Jenis Material	Nilai Konduktivitas Termal (kcal/m jam°C)				Rata-rata
	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C	
<i>Polyurethane-Fiberglass 0%</i>	0.0287	0.0308	0.0319	0.0349	0.0316
<i>Polyurethane-Fiberglass 5%</i>	0.0305	0.0329	0.0345	0.0372	0.0338
<i>Polyurethane-Fiberglass 10%</i>	0.0309	0.0340	0.0357	0.0400	0.0352
<i>Polyurethane-Fiberglass 15%</i>	0.0313	0.0342	0.0367	0.0416	0.0359
<i>Polystyrene A</i>	0.0276	0.0284	0.0316	0.0344	0.0305
<i>Polystyrene B</i>	0.0264	0.0279	0.0309	0.0335	0.0297

Pada tabel 2. Hasil uji konduktivitas termal pada tiap sampel memiliki nilai yang berbeda antara satu dengan lainnya. Hal ini dikarenakan

suhu merupakan faktor utama yang mempengaruhi sifat *polyurethane* serta terdapat perbedaan sifat mekanik *polyurethane* dan serat *fiberglass* pada suhu yang berbeda [19]. Nilai konduktivitas termal seluruh spesimen menunjukkan kecenderungan meningkat seiring dengan kenaikan temperatur pengujian dari 25°C hingga 40°C. Pada spesimen *polyurethane foam* tanpa penambahan *fiberglass* (0%), nilai konduktivitas termal meningkat dari 0,0287 kcal/m·jam·°C pada suhu 25°C menjadi 0,0349 kcal/m·jam·°C pada suhu 40°C dengan nilai rata-rata sebesar 0,0316 kcal/m·jam·°C. Kenaikan ini menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur, semakin besar energi panas yang dapat ditransfer melalui material sehingga kemampuan material dalam menahan perpindahan panas sedikit menurun. Penambahan serat *fiberglass* menyebabkan peningkatan nilai konduktivitas termal pada seluruh variasi komposisi. Spesimen dengan fraksi massa *fiberglass* 5% memiliki nilai rata-rata konduktivitas termal sebesar 0,0338 kcal/m·jam·°C, meningkat sekitar 6,96% dibandingkan spesimen tanpa *fiberglass*. Pada fraksi massa 10%, nilai rata-rata konduktivitas termal meningkat menjadi 0,0352 kcal/m·jam·°C, sedangkan pada fraksi massa 15% mencapai 0,0359 kcal/m·jam·°C. Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar kandungan *fiberglass* dalam matriks *polyurethane foam*, semakin tinggi kemampuan material dalam menghantarkan panas.

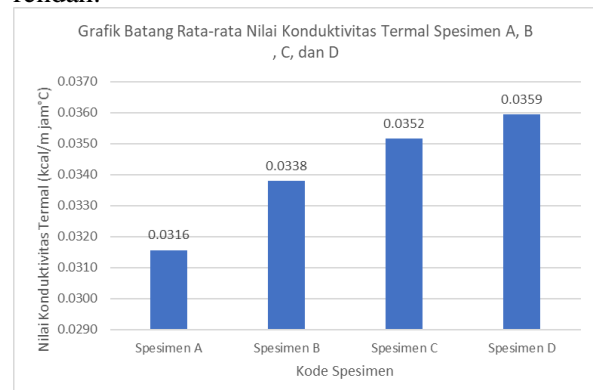
Peningkatan konduktivitas termal akibat penambahan *fiberglass* terjadi karena serat *fiberglass* memiliki kemampuan penghantaran panas yang lebih tinggi dibandingkan udara yang terperangkap di dalam struktur sel *polyurethane foam*. Penambahan *fiberglass* juga meningkatkan densitas material sehingga jumlah rongga udara yang berperan sebagai penghambat perpindahan panas menjadi berkurang. Akibatnya, jalur perpindahan panas melalui material menjadi lebih kontinu dan nilai konduktivitas termal meningkat. Hasil ini sejalan dengan penelitian Marhoon (2022) yang menyatakan bahwa peningkatan fraksi serat kaca pada matriks *polyurethane* menghasilkan kenaikan konduktivitas termal akibat meningkatnya kepadatan struktur komposit. Apabila dibandingkan dengan material pembanding, yaitu *polystyrene foam*, diperoleh nilai rata-rata konduktivitas termal sebesar 0,0305 kcal/m·jam·°C untuk *Polystyrene A* dan 0,0297 kcal/m·jam·°C untuk *Polystyrene B*. Nilai tersebut lebih rendah dibandingkan seluruh variasi *polyurethane foam-fiberglass*. Konduktivitas termal yang lebih rendah menunjukkan bahwa *polystyrene foam* memiliki kemampuan insulasi termal yang lebih baik karena mampu menghambat aliran panas secara lebih efektif. Hal ini disebabkan

oleh struktur sel tertutup (*closed-cell*) pada *polystyrene foam* yang mengandung lebih banyak udara terperangkap sehingga perpindahan panas melalui konduksi menjadi lebih kecil



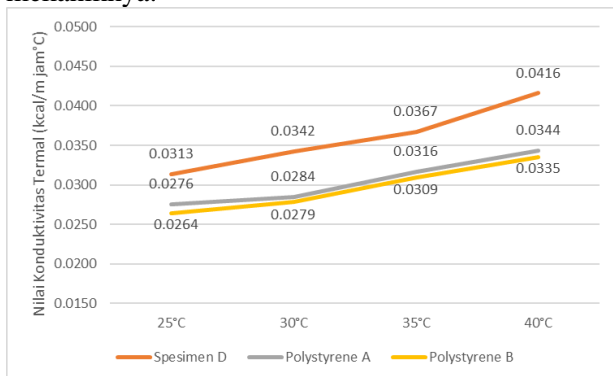
Gambar 3. Perbandingan Nilai Konduktivitas Termal *Polyurethane* dengan fraksi massa *fiberglass*

Gambar 3. menunjukkan hubungan antara temperatur dan nilai konduktivitas termal pada *polyurethane foam* dengan variasi fraksi massa *fiberglass*. Terlihat bahwa nilai konduktivitas termal seluruh spesimen meningkat seiring kenaikan temperatur dari 25°C hingga 40°C. Selain itu, peningkatan fraksi massa *fiberglass* juga menyebabkan nilai konduktivitas termal semakin tinggi. Spesimen A (0% *fiberglass*) memiliki nilai konduktivitas termal terendah, sedangkan Spesimen D (15% *fiberglass*) memiliki nilai tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan *fiberglass* meningkatkan kemampuan material dalam menghantarkan panas akibat bertambahnya densitas dan berkurangnya rongga udara pada struktur foam. Oleh karena itu, *polyurethane foam* tanpa *fiberglass* memiliki performa insulasi termal terbaik dibandingkan variasi lainnya karena menghasilkan nilai konduktivitas termal paling rendah.



Gambar 4. Perbandingan nilai konduktivitas termal Rata-Rata *polyurethane* dengan fraksi massa *fiberglass*

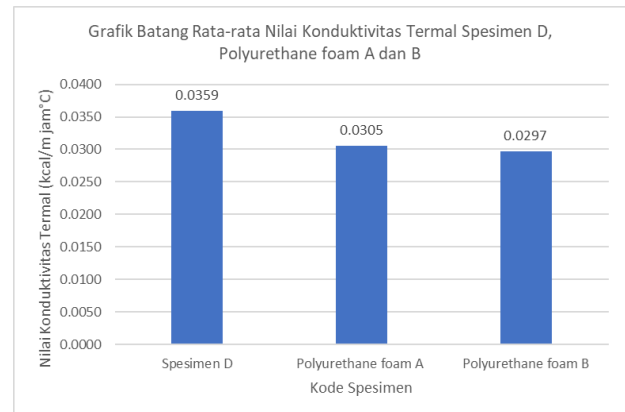
Berdasarkan Gambar 4, terlihat bahwa nilai rata-rata konduktivitas termal *polyurethane foam* meningkat seiring bertambahnya fraksi massa *fiberglass*. Spesimen A (tanpa *fiberglass*) memiliki nilai konduktivitas termal terendah sebesar 0,0316 kcal/m·jam·°C, sedangkan Spesimen B, C, dan D mengalami peningkatan berturut-turut menjadi 0,0338, 0,0352, dan 0,0359 kcal/m·jam·°C. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan *fiberglass* menyebabkan kemampuan material dalam menghambat perpindahan panas menurun. Peningkatan konduktivitas termal diduga terjadi karena serat *fiberglass* menambah densitas material dan membentuk jalur konduksi panas yang lebih mudah dibandingkan rongga udara pada struktur *polyurethane foam*. Meskipun demikian, nilai konduktivitas termal yang diperoleh masih berada dalam rentang material insulasi termal, sehingga komposit *polyurethane-fiberglass* tetap berpotensi digunakan sebagai material insulasi dengan keunggulan tambahan pada sifat mekaniknya.



Gambar 5. Perbandingan *Polyurethane foam* dengan fraksi massa *fiberglass* dengan *polystyrene foam*

Berdasarkan Gambar 5, terlihat bahwa nilai konduktivitas termal seluruh material mengalami peningkatan seiring meningkatnya suhu pengujian dari 25°C hingga 40°C. Pada setiap suhu, *polyurethane foam* yang diperkuat *fiberglass* 15% (Spesimen D) menunjukkan nilai konduktivitas termal tertinggi dibandingkan *polyurethane foam A* dan *polystyrene foam B*. Nilai konduktivitas termal Spesimen D menurun dari 0,0313 kcal/m·jam·°C pada 25°C menjadi 0,0416 kcal/m·jam·°C pada 40°C, sedangkan *polyurethane foam A* berada pada rentang 0,0276–0,0344 kcal/m·jam·°C dan *polystyrene foam B* pada rentang 0,0264–0,0335 kcal/m·jam·°C. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan *fiberglass* pada *polyurethane foam* cenderung meningkatkan nilai konduktivitas termal dibandingkan *polyurethane foam* tanpa penguat maupun *polystyrene foam*. Hal ini diduga disebabkan oleh peningkatan densitas material dan

terbentuknya jalur perpindahan panas melalui serat *fiberglass*. Meskipun demikian, ketiga material masih menunjukkan karakteristik sebagai material insulasi termal karena nilai konduktivitas termalnya relatif rendah. Dari hasil perbandingan tersebut, *polystyrene foam B* memiliki performa insulasi termal terbaik, ditunjukkan oleh nilai konduktivitas termal yang paling rendah pada seluruh rentang suhu pengujian, sedangkan *polyurethane foam* dengan *fiberglass* 15% memiliki performa insulasi termal terendah karena nilai konduktivitas termalnya paling tinggi.



Gambar 6. Perbandingan nilai rata-rata konduktivitas termal antara *Polyurethane foam* dan *polystyrene foam*

Berdasarkan Gambar 6, terlihat bahwa nilai rata-rata konduktivitas termal *polyurethane foam A* dan *polystyrene foam B* lebih rendah dibandingkan *polyurethane foam* yang diperkuat *fiberglass* 15% (Spesimen D). Nilai rata-rata konduktivitas termal Spesimen D sebesar 0,0359 kcal/m·jam·°C, sedangkan *polyurethane foam A* dan *polystyrene foam B* masing-masing sebesar 0,0305 kcal/m·jam·°C dan 0,0297 kcal/m·jam·°C. Nilai konduktivitas termal yang lebih rendah menunjukkan kemampuan insulasi termal yang lebih baik karena perpindahan panas yang terjadi melalui material lebih kecil. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan *fiberglass* 15% pada *polyurethane foam* meningkatkan nilai konduktivitas termal material. Peningkatan ini diduga disebabkan oleh bertambahnya densitas material dan keberadaan serat *fiberglass* yang membentuk jalur konduksi panas sehingga panas lebih mudah merambat dibandingkan pada struktur *foam* tanpa penguat. Sebaliknya, *polystyrene foam B* memiliki nilai konduktivitas termal paling rendah, yang menunjukkan kemampuan insulasi termal terbaik di antara ketiga material yang diuji.

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian yang melaporkan peningkatan konduktivitas termal dengan penambahan serat *glass wool*. melaporkan bahwa penambahan serat *glass wool* menyebabkan peningkatan nilai konduktivitas

termal *polyurethane foam* dari  $0,0290 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$  menjadi  $0,0391 \text{ W/m}\cdot\text{°C}$  pada komposisi 10 % wt. Peningkatan ini dikaitkan dengan bertambahnya kontak padatan serta menurunnya persentase sel tertutup di dalam struktur *foam*, sehingga jalur rambat panas melalui matriks menjadi lebih dominan [8]. Peningkatan kandungan serat menyebabkan struktur komposit menjadi lebih padat sehingga kontribusi fase padat terhadap perpindahan panas meningkat. Oleh karena itu, meskipun penambahan *fiberglass* memberikan keuntungan pada kekuatan dan kekerasan material, kemampuan insulasi termal cenderung menurun yang ditunjukkan oleh meningkatnya nilai konduktivitas termal.

Meskipun demikian, *polyurethane foam* yang diperkuat *fiberglass* tetap memiliki potensi sebagai material insulasi LNG karena selain memiliki nilai konduktivitas termal yang masih relatif rendah, material ini juga menawarkan peningkatan sifat mekanik seperti kekerasan dan kekuatan struktur. Dengan demikian, pemilihan material dapat disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi, apakah lebih mengutamakan performa insulasi termal atau kombinasi antara insulasi dan kekuatan mekanik.

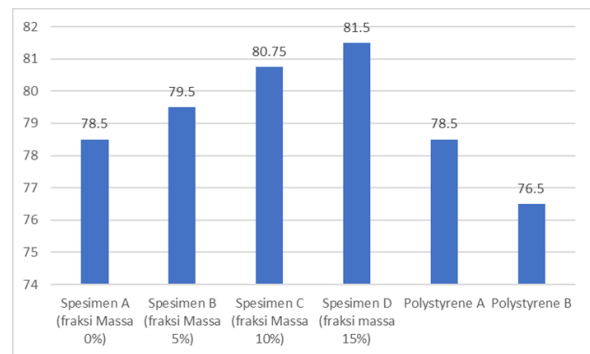
### 3.3 Hasil Pengujian Kekerasan Shore D

Kekerasan adalah kemampuan suatu bahan untuk menahan penetrasi atau deformasi permanen oleh gaya luar. Alat uji durometer dengan metode *Shore D Hardness* sesuai ASTM D2240-15 dengan ukuran panjang 80 mm, lebar 70 mm dan tebal 6 mm. Pengujian kekerasan pada setiap sampel dilakukan sebanyak 4-5 kali kemudian dirata-ratakan.

Dari pengambilan data, diperoleh nilai rata-rata nilai kekerasan dari *polyurethane* dengan fraksi massa 0%, 5%, 10%, 15% dan juga *polystyrene foam*. Maka dilakukan perhitungan rata-rata hasil uji kekerasan pada tiap variasi komposisi yang diberikan sesuai tabel.

Tabel 3. Hasil Pengujian Kekerasan Shore D

Kode Spesimen	Nilai Kekerasan Shore D				Rata-rata	Standar Deviasi	Rata-rata $\pm$ SD
	Titik 1	Titik 2	Titik 3	Titik 4			
Spesimen A (fraksi Massa 0%)	78	79	79	78	78.5	0.58	$78,5 \pm 0,58$
Spesimen B (fraksi Massa 5%)	79	80	80	79	79.5	0.58	$79,50 \pm 0,58$
Spesimen C (fraksi Massa 10%)	81	80	81	81	80.75	0.50	$80,75 \pm 0,50$
Spesimen D (fraksi massa 15%)	81	82	82	81	81.5	0.58	$81,50 \pm 0,58$
Polystyrene A	78	79	79	78	78.5	0.58	$78,50 \pm 0,58$
Polystyrene B	76	77	77	76	76.5	0.58	$76,50 \pm 0,58$



Gambar 7. Grafik Batang Rata-rata Nilai Pengujian Kekerasan Shore D

Berdasarkan Tabel 3 dan Gambar 7, penambahan serat *fiberglass* memberikan pengaruh positif terhadap nilai kekerasan Shore D *polyurethane foam*. Nilai kekerasan rata-rata meningkat dari  $78,50 \pm 0,58 \text{ Shore D}$  pada spesimen tanpa *fiberglass* menjadi  $79,50 \pm 0,58 \text{ Shore D}$  pada fraksi massa 5%,  $80,75 \pm 0,50 \text{ Shore D}$  pada fraksi massa 10%, dan mencapai  $81,50 \pm 0,58 \text{ Shore D}$  pada fraksi massa 15%. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi kandungan *fiberglass*, semakin besar kemampuan material dalam menahan penetrasi akibat pembebanan indenter.

Apabila dibandingkan dengan *polystyrene foam*, *polyurethane foam* berpenguat *fiberglass* menunjukkan nilai kekerasan yang lebih tinggi. *Polystyrene A* memiliki nilai kekerasan sebesar  $78,50 \pm 0,58 \text{ Shore D}$ , sedangkan *Polystyrene B* sebesar  $76,50 \pm 0,58 \text{ Shore D}$ . Nilai tersebut lebih rendah dibandingkan spesimen dengan penambahan *fiberglass* 10% dan 15%. Hal ini menunjukkan bahwa *fiberglass* efektif meningkatkan sifat mekanik *polyurethane foam* tanpa menghilangkan fungsinya sebagai material insulasi.

Nilai standar deviasi yang relatif kecil pada seluruh spesimen (0,50–0,58) menunjukkan bahwa hasil pengujian memiliki tingkat konsistensi yang baik dan penyebaran data yang rendah. Berdasarkan hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa penambahan *fiberglass* meningkatkan kekerasan *polyurethane foam* secara bertahap, dengan nilai tertinggi diperoleh pada spesimen D (15% *fiberglass*) sebesar  $81,50 \pm 0,58 \text{ Shore D}$ . Namun, untuk aplikasi *LNG ISO Tank*, pemilihan material optimum perlu mempertimbangkan tidak hanya sifat mekanik tetapi juga karakteristik termalnya.

### 3.4 Hubungan Nilai Konduktivitas Termal Terhadap Nilai Densitas Dan Hasil Uji Kekerasan (*Shore D Hardness*)

Tabel 4. Nilai Konduktivitas Termal, Densitas dan Kekerasan

Kode Spesimen	Konduktivitas		
	Termal (kcal/m·jam·°C)	Densitas (g/cm <sup>3</sup> )	Kekerasan (Shore D)
Spesimen A	0.0316	0.034	78,50 ± 0,58
Spesimen B	0.0338	0.048	79,50 ± 0,58
Spesimen C	0.0352	0.062	80,75 ± 0,50
Spesimen D	0.0359	0.072	81,50 ± 0,58
<i>Polystyrene</i> A	0.0305	0.03	78,50 ± 0,58
<i>Polystyrene</i> B	0.0297	0.02	76,50 ± 0,58

Berdasarkan tabel 4. peningkatan fraksi massa *fiberglass* pada *polyurethane foam* menyebabkan kenaikan nilai densitas, konduktivitas termal, dan kekerasan *Shore D*. Densitas meningkat dari 0,034 g/cm<sup>3</sup> pada spesimen tanpa *fiberglass* menjadi 0,072 g/cm<sup>3</sup> pada spesimen dengan *fiberglass* 15%. Peningkatan densitas terjadi karena *fiberglass* memiliki massa jenis yang lebih tinggi dibandingkan matriks *polyurethane foam* sehingga struktur material menjadi lebih padat.

Kenaikan densitas diikuti oleh peningkatan nilai konduktivitas termal dari 0,0316 kcal/m·jam·°C menjadi 0,0359 kcal/m·jam·°C. Hal ini menunjukkan bahwa semakin padat struktur material, semakin mudah panas merambat melalui material. Berkurangnya rongga udara akibat penambahan *fiberglass* menyebabkan jalur perpindahan panas menjadi lebih kontinu. Hasil ini sejalan dengan penelitian terdahulu yang menyatakan bahwa peningkatan densitas pada material *polyurethane* berpengaruh terhadap peningkatan konduktivitas termal dan penurunan kemampuan insulasi termal [20].

Di sisi lain, peningkatan densitas memberikan pengaruh positif terhadap sifat mekanik material. Nilai kekerasan *Shore D* meningkat dari 78,50 ± 0,58 menjadi 81,50 ± 0,58 seiring bertambahnya kandungan *fiberglass*. *Fiberglass* berfungsi sebagai penguat yang meningkatkan kekakuan dan ketahanan material terhadap penetrasi, sehingga nilai kekerasan menjadi lebih tinggi. Hasil ini menunjukkan adanya korelasi positif antara densitas dan kekerasan material.

Apabila dibandingkan dengan *polystyrene foam*, material ini memiliki densitas dan

konduktivitas termal yang lebih rendah sehingga menunjukkan kemampuan insulasi termal yang lebih baik. Namun, nilai kekerasannya juga lebih rendah dibandingkan *polyurethane foam* berpenguat *fiberglass*. Oleh karena itu, terdapat *trade-off* antara performa termal dan sifat mekanik material. Berdasarkan keseimbangan kedua parameter tersebut, spesimen dengan fraksi massa *fiberglass* 10% menunjukkan performa paling optimum dengan densitas 0,062 g/cm<sup>3</sup>, konduktivitas termal 0,0352 kcal/m·jam·°C, dan kekerasan 80,75 ± 0,50 Shore D. Komposisi ini memberikan kombinasi yang baik antara kemampuan insulasi termal dan ketahanan mekanik sehingga berpotensi diaplikasikan sebagai material insulasi *LNG ISO Tank* pada suhu ruang.

## 4 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian mengenai karakteristik material insulasi termal *polyurethane foam* berpenguat *fiberglass* untuk aplikasi *LNG ISO Tank* pada suhu ruang, dapat disimpulkan Penambahan serat *fiberglass* berpengaruh terhadap densitas *polyurethane foam*, dimana nilai densitas meningkat dari 0,034 g/cm<sup>3</sup> pada spesimen tanpa *fiberglass* menjadi 0,072 g/cm<sup>3</sup> pada spesimen dengan fraksi massa *fiberglass* 15%. Peningkatan densitas menunjukkan bahwa keberadaan *fiberglass* menyebabkan struktur material menjadi lebih padat. Penambahan serat *fiberglass* juga meningkatkan nilai konduktivitas termal *polyurethane foam* dari 0,0316 menjadi 0,0359 kcal/m·jam·°C. Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa bertambahnya densitas material menyebabkan kemampuan menghantarkan panas semakin besar sehingga kemampuan insulasi termal cenderung menurun. Selain itu, penambahan serat *fiberglass* meningkatkan nilai kekerasan *Shore D* *polyurethane foam* dari 78,50 ± 0,58 menjadi 81,50 ± 0,58. Peningkatan ini menunjukkan bahwa *fiberglass* berfungsi sebagai penguat yang mampu meningkatkan kekakuan dan ketahanan material terhadap penetrasi. Hasil perbandingan menunjukkan bahwa *polystyrene foam* memiliki nilai konduktivitas termal lebih rendah sehingga memberikan performa insulasi termal yang lebih baik, sedangkan *polyurethane foam* berpenguat *fiberglass* memiliki nilai kekerasan yang lebih tinggi. Berdasarkan keseimbangan antara sifat termal dan mekanik, *polyurethane foam* dengan fraksi massa *fiberglass* 10% merupakan komposisi optimum untuk aplikasi insulasi *LNG ISO Tank* pada suhu ruang karena memberikan kombinasi yang baik antara konduktivitas termal dan kekerasan material.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. S. Mokhatab, J. Y. Mak, J. V. Valappil, and D. A. Wood, *Handbook of Liquefied Natural Gas*. Gulf Professional Publishing (Elsevier), 2014.
- [2]. M. D. Tusiani and G. Shearer, *LNG: A Nontechnical Guide*. Tulsa, Oklahoma: PennWell Corporation, 2007.
- [3]. C. V. Delino, *Cold and Chilled Storage Technology*. London: Blackie Academic & Professional, 1997.
- [4]. C. A. Harper, *Handbook of Plastics, Elastomers, and Composites*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2002.
- [5]. K. H. Kim, S. H. Yoon, and D. G. Lee, "Vibration Isolation of LNG Containment Systems Due to Sloshing with Glass Fiber Composite," *Composite Structures*, vol. 94, pp. 469–476, 2012, doi: 10.1016/j.compstruct.2011.08.008.
- [6]. Y. H. Yu, B. G. Kim, and D. G. Lee, "Cryogenic Reliability of Composite Insulation Panels for Liquefied Natural Gas (LNG) Ships," *Composite Structures*, vol. 94, pp. 462–468, 2012, doi: 10.1016/j.compstruct.2011.08.009.
- [7]. J.-W. Wu, W.-F. Sung, and H.-S. Chu, "Thermal conductivity of polyurethane foams," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 42, no. 12, pp. 2211–2217, 1999.
- [8]. I. M. Ibrahim and A. K. Rasheed, "Mechanical and Physical Properties of Glass Wool-Rigid Polyurethane Foam Composites," *College of Engineering Journal*, vol. 18, pp. 41–49, 2015.
- [9]. C. Ye, Y. Lin, and F. Pei, "Comparative Study of Three Insulation Materials Installed on Type C Independent Tank for Offshore LNG Transportation," *Cryogenics*, vol. 126, pp. 1–15, 2022, doi: 10.1016/j.cryogenics.2022.103521.
- [10]. J. H. Kim, S. Y. Lee, Y. T. Kim, and J. M. Kim, "Influence of silica-aerogel on mechanical characteristics of polyurethane-based composites: Thermal conductivity and strength," *Materials*, vol. 14, no. 7, 2021.
- [11]. C. Venkatesan, G.-P. Jin, M.-C. Chyu, J.-X. Zheng, and T.-Y. Chu, "Measurement of thermophysical properties of polyurethane foam insulation during transient heating," *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 40, no. 2, pp. 133–144, 2001.
- [12]. Zulkifli, H. Hermansyah, and S. Mulyanto, "Analisa Kekuatan Tarik dan Bentuk Patahan Komposit Serat Sabut Kelapa Bermatriks Epoxy terhadap Variasi Fraksi Volume Serat," vol. 6, pp. 90–95, 2018.
- [13]. Neswati, Novizar, S. Arief, and Yusniwati, "Synthesis, Characterization and Modification of Flexible Polyurethane Foams Using Raw Material from Biopolyols Based on Palm Oil and Other Vegetable Oils," vol. 9, pp. 1–27, 2019.
- [14]. C. Six and F. Richter, "Isocyanate, Organic," in *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Weinheim: Wiley-VCH, 2003.
- [15]. W. T. Nugroho, "Pengaruh Model Serat pada Bahan Fiberglass terhadap Kekuatan, Ketangguhan, dan Kekerasan Material," *Jurnal Ilmiah Inovasi*, vol. 15, no. 1, pp. 27–32, 2016, doi: 10.25047/jii.v15i1.58.
- [16]. N. Tang, D. Lei, D. Huang, and R. Xiao, "Mechanical Performance of Polystyrene Foam (EPS): Experimental and Numerical Analysis," *Polymer Testing*, vol. 73, pp. 359–365, 2019.
- [17]. A. Firdaus, A. Tjahjono, and S. A. Saptari, "Analisis Pengaruh Bentuk Filler pada Komposit Batang Bambu terhadap Nilai Kekerasan (Hardness Shore D)," *Al-Fiziya: Journal of Materials Science, Geophysics, Instrumentation and Theoretical Physics*, vol. 1, pp. 1–6, 2019, doi: 10.15408/fiziya.v1i2.9506.
- [18]. F. Q. Asyri, K. N. Hafni, and A. H. Simamora, "Pengaruh Limbah Abu Pembakaran Biomassa Kelapa Sawit terhadap Sifat-Sifat Fisika dan Mekanik High Impact Polystyrene," *Jurnal Teknik Kimia USU*, vol. 4, no. 3, 2015.
- [19]. J. Wang, C. Zhang, Y. Deng, and P. Zhang, "A Review of Research on the Effect of Temperature on the Properties of Polyurethane Foam," *Polymers*, vol. 14, no. 21, p. 4586, 2022.
- [20]. S. Członka, M. F. Bertino, J. Kośny, and N. Shukla, "Density and Shrinkage as Guiding Criteria for Thermal Conductivity Optimization of Poly(urethane)-Poly(isocyanurate) Aerogels," *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, vol. 93, pp. 149–167, 2020.