

Analisis Komputasional Aplikasi Penggunaan *Phase Change Material* (PCM) pada Insulasi Dinding *Eco-Reefer container 20 Feet*

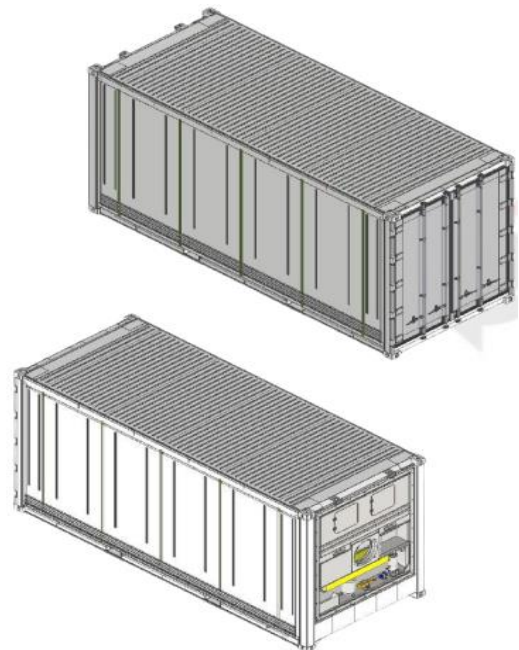
Rifqi Azni Zain, Sutopo Purwono Fitri, dan Ede Mehta Wardhana
Departemen Teknik Sistem Perkapalan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)
e-mail: sutopopurwonofitri@its.ac.id

Abstrak—Sebesar 1,3 miliar ton makanan menghilang setiap tahun, termasuk kerugian dalam transportasi. Pengangkutan produk yang peka terhadap suhu membutuhkan pasokan energi yang hampir konstan untuk mendinginkan, membekukan, atau mengkondisikan barang untuk mencegah kerugian produk selama pengangkutan. Faktor lingkungan yang bervariasi selama perjalanan kargo, seperti kondisi lingkungan, terjadinya benturan, dan sebagainya dapat menyebabkan kegagalan unit pendingin *reefer container*. Saat mengalami kegagalan, suhu udara yang disuplai oleh kipas sirkulasi mungkin lebih rendah dari nilai yang ditetapkan. Pada kasus tersebut, suhu kargo dapat mengalami kenaikan yang cukup signifikan. Salah satu metode yang dapat digunakan dalam mengatasi permasalahan tersebut adalah dengan penambahan bahan *Phase Change Material* (PCM) sebagai bahan insulasi pada *reefer container*. PCM dapat menjaga dan mempertahankan suhu agar tidak terjadi kenaikan suhu yang signifikan. Pada hasil simulasi dengan *Finite Element Method* (FEM), *reefer container* konvensional memiliki suhu dinding rata-rata -1.03 °C. Dengan bantuan PCM, suhu dinding mengalami penurunan dengan rata-rata -16.48 °C. Pada simulasi dengan *Computational Fluid Dynamics* (CFD), *reefer container* kosong dalam keadaan kosong tanpa muatan mencapai suhu terendah sebesar -29.89 °C dengan rata-rata suhu sebesar -29.8 °C. Sedangkan, dengan bantuan PCM suhu terendah dapat mencapai -29.92 °C dan rata-rata suhu sebesar -29.84 °C. Dalam keadaan ruang muat yang berisi muatan, *reefer container* konvensional mencapai suhu terendah sebesar -29.19 °C dengan rata-rata suhu -28.73 °C. Dengan bantuan PCM, suhu *reefer container* pada keadaan berisi muatan dapat mencapai suhu terendah sebesar -29.43 °C dengan rata-rata suhu sebesar -29.21 °C.

Kata Kunci—CFD, FEM, PCM, Reefer Container.

I. PENDAHULUAN

Berdasarkan penelitian, salah satu metode yang dapat digunakan adalah dengan penambahan bahan *Phase Change Material* (PCM). Untuk mempertahankan suhu rendah di dalam wadah untuk waktu yang lama, bahan pengubah fasa (PCM) dapat dimasukkan ke dalam container untuk mengurangi laju kenaikan suhu. Penggunaan PCM dapat memberikan inersia termal yang tinggi ke selubung, yang mengarah pada pengurangan dan perpindahan fase pada beban panas puncak melalui selubung [1]. Secara khusus, sejumlah besar penelitian telah menunjukkan bahwa penambahan PCM ke selubung bangunan dapat mengurangi beban termal dalam konteks iklim hangat terutama selama musim panas. Selain itu, PCM telah banyak digunakan dalam peti kemas kecil untuk menstabilkan suhu internal selama perjalanan singkat pada barang-barang yang mudah rusak seperti makanan, darah, dan obat-obatan [2]. Dalam literatur, banyak peneliti yang telah menyelidiki



Gambar 1. 3D Model *Reefer container* PT. INKA.

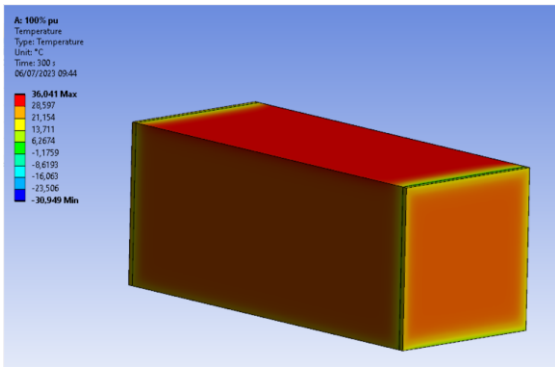
penambahan PCM untuk penyimpanan dingin dan sistem transportasi yang berbeda. Misalnya, Tassou, et.al (2008) menganalisis berbagai cara untuk mengurangi konsumsi energi pada ruang berpendingin dan menunjukkan sistem eutektik sebagai solusi yang memungkinkan [3-4].

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh penggunaan PCM sebagai bahan insulasi pada dinding *reefer container* 20 feet. Simulasi *Finite Element Method* (FEM) dilakukan untuk mengetahui distribusi persebaran suhu pada dinding *container*. Simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD) dapat memberikan prediksi temperatur permukaan pada masing-masing dinding *container*. Model simulasi akan memprediksi temperatur pada dinding-dinding *container* yang telah diberikan bahan PCM. Selain itu pada penelitian ini akan dilakukan perbandingan temperatur dinding *container* konvensional dengan dinding *container* yang telah diberikan PCM sebagai bahan insulasi dinding.

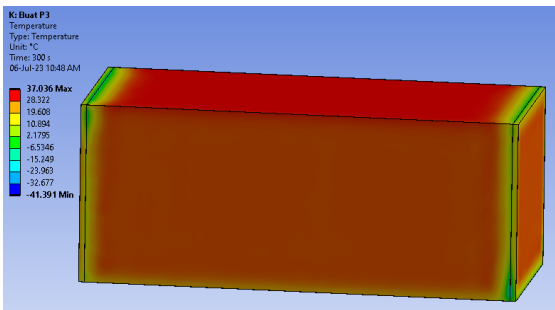
II. DASAR TEORI

A. *Reefer container*

Reefer container merupakan kontainer pelayaran yang digunakan pada intermoda angkutan barang yang didinginkan untuk menunjang kegiatan transportasi pada muatan barang tertentu yang sensitif terhadap perubahan *Ambient Temperature*. Strukturnya terbuat dari rangka baja, dindingnya terbuat dari lembaran aluminium dengan insulasi



Gambar 2. Hasil Simulasi FEM pada Reefer container Konvensional.



Gambar 3. Hasil Simulasi FEM pada Reefer container dengan Dinding PCM.

busa dan lantainya terdiri dari aluminium dalam *T-floor* sehingga udara dapat mengalir dari unit pendingin ke seluruh ruang kargo melalui lantai.

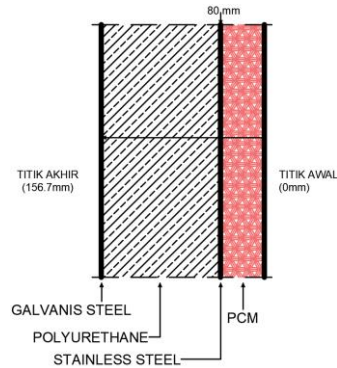
Reefer container bekerja dengan melakukan pengondisian temperatur di dalam kontainer yang disesuaikan dengan persyaratan temperatur dari komoditas yang diangkut. Tiap komoditas mempunyai syarat temperatur pengangkutan yang berbeda-beda sesuai karakteristik bahan komoditas agar tidak mengalami degradasi atau pembusukan pada saat sampai tujuan. *Reefer container* memiliki sensor *flow rate* yang jumlahnya tertera pada panel monitor. Jumlah *flow rate* yang masuk dipengaruhi oleh bukaan ventilasi. Udara masuk didinginkan dengan melalui *coil evaporator* di dalam unit mesin pendingin kontainer tersebut. Udara yang dingin kemudian dialirkan oleh *evaporator fan* melalui *T-Floor* yang ada di bagian bawah permukaan kontainer. Kemudian udara panas dengan massa jenis yang lebih tinggi daripada udara dingin akan bergerak menuju permukaan atap kontainer dan akan diserap kembali oleh *evaporator* untuk melanjutkan siklus refrigerasi [5].

B. Phase Change Material (PCM)

PCM merupakan bahan atau material yang ketika material tersebut mengubah fase dari meleleh (*melting*) atau membeku (*freeze*) sehingga material tersebut akan menyerap atau melepaskan panas pada suhu yang hampir konstan. PCM cocok untuk aplikasi jika stabil setelah beberapa kali siklus peleburan dan pembekuan berulang. PCM harus menunjukkan sifat termal, kimia dan fisik yang sama atau hampir sama setelah beberapa kali siklus pembekuan dan peleburan. Hal ini membuat PCM menjadi alternatif yang bagus media penyimpan panas untuk berbagai macam aplikasi [6].

C. Computational Fluid Dynamics (CFD)

Proses menggambarkan secara matematis fenomena fisik yang melibatkan aliran fluida dan menyelesaikannya secara



Gambar 4. Ilustrasi Pengambilan Data Suhu Dinding.



Gambar 5. Grafik Perbandingan Suhu Dinding dengan FEM

numerik menggunakan keandalan komputasi dikenal sebagai *Computational Fluid Dynamics (CFD)*. Terdapat 3 elemen utama dalam CFD : (1) Pre-Processing, yang digunakan untuk memasukkan geometri masalah, menghasilkan grid, menentukan parameter aliran dan kondisi batas ke kode. (2) Flow Solver, yang digunakan untuk memecahkan persamaan yang mengatur aliran berdasarkan pada kondisi yang diberikan. Ada empat metode berbeda yang digunakan sebagai Flow Solver: (i) metode beda hingga; (ii) metode elemen hingga, (iii) metode volume hingga, dan (iv) metode spektral. (3) Post-Processing, digunakan untuk mengolah data dan menampilkan hasilnya dalam format grafis yang mudah dibaca [7].

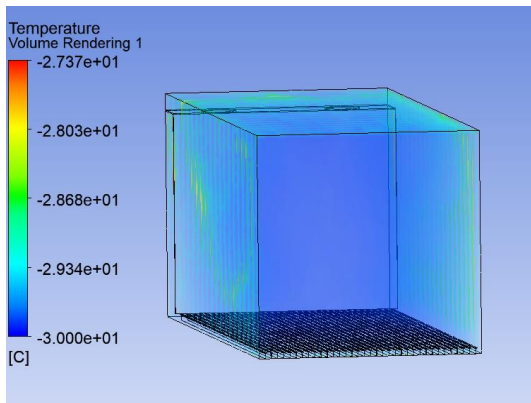
D. Finite Element Method (FEM)

Metode elemen hingga adalah teknik numerik untuk memecahkan masalah yang dijelaskan oleh persamaan diferensial parsial atau dapat diformulasikan sebagai minimalisasi fungsional. Domain yang diminati direpresentasikan sebagai kumpulan elemen hingga. Fungsi pendekatan dalam elemen hingga ditentukan dalam nilai nodal dari bidang fisik yang dicari. Masalah fisik kontinu diubah menjadi masalah elemen hingga yang terdiskritisasi dengan nilai nodal yang tidak diketahui. Untuk masalah linier, sistem persamaan aljabar linier harus diselesaikan. Nilai di dalam elemen hingga dapat dipulihkan menggunakan nilai nodal.

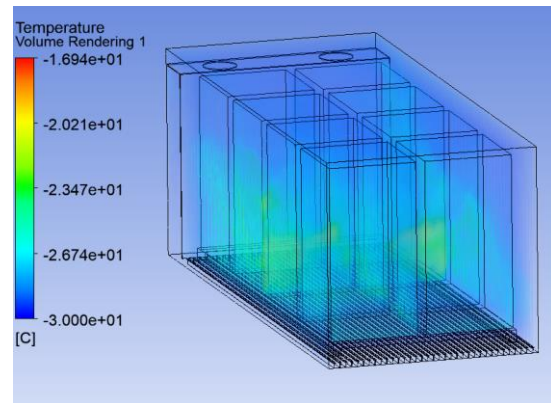
III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Identifikasi Masalah

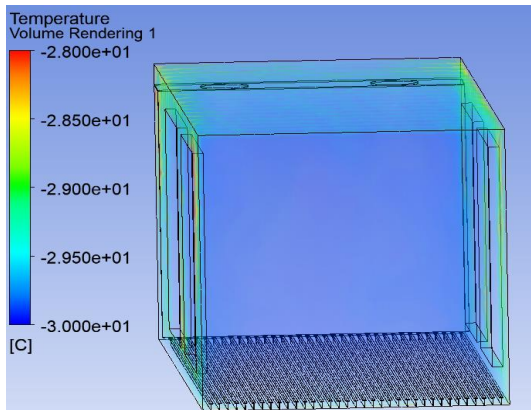
Permasalahan yang terdapat pada penelitian ini adalah bagaimana distribusi suhu pada dinding *reefer container* 20 feet dengan menggunakan PCM sebagai bahan insulasi dinding serta bagaimana perbandingan distribusi suhu pada dinding antara *reefer container* 20 feet konvensional dan *reefer container* 20 feet dengan PCM sebagai bahan insulasi



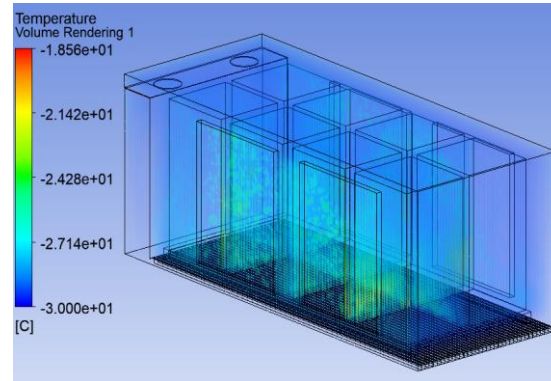
Gambar 6. Volume Rendering R.C. Konvensional tanpa Beban.



Gambar 8. Volume Rendering R.C. Konvensional dengan Beban.



Gambar 7. Volume Rendering R.C. PCM tanpa Beban.



Gambar 9. Volume Rendering R.C. PCM dengan Beban.

dinding. Agar penelitian lebih spesifik, maka penulis membuat batasan penelitian ini yang meliputi material PCM, ukuran kontainer, dan rentang suhu. Setelah itu penulis menentukan metode yang akan digunakan, yaitu dengan simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD).

B. Studi Literatur

Proses ini bertujuan untuk melampirkan teori-teori yang berkaitan dengan penelitian ini, sehingga penulis mempunyai orientasi untuk menyelesaikan penelitian ini. Studi pustaka dapat diperoleh dari buku, jurnal, maupun dari internet yang mendukung penelitian ini.

C. Studi Empiris

Studi empiris bertujuan untuk memperoleh referensi dari penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian yang akan dilakukan, sehingga penulis dapat memperoleh referensi untuk melengkapi penelitiannya. Studi empiris diperoleh dari jurnal, literatur, media online, atau lainnya.

D. Pemodelan CFD

Prototipe kontainer yang akan dimodelkan untuk melakukan simulasi CFD disesuaikan dengan model pada desain *Reefer container* milik PT. INKA yang dapat dilihat melalui *Product Knowledge Reefer container*. Berikut merupakan gambaran 3D dari *Reefer container* milik PT. INKA yang ditunjukkan pada Gambar 1.

E. Simulasi CFD

Aplikasi yang digunakan untuk menjalankan simulasi adalah ANSYS Fluent. Simulasi ini dilakukan untuk mengetahui karakteristik kinerja suhu ruang pengisian dan suhu PCM. Secara garis besar simulasi CFD dibagi menjadi tiga fase yaitu geometri, *mesh*, *set up* dan *solution*.

F. Validasi Data Simulasi

Data yang diperoleh melalui hasil simulasi dibandingkan dengan data yang diperoleh melalui penelitian serupa dengan metode eksperimental. Validasi dilakukan untuk mengetahui apakah data hasil simulasi sudah sesuai dengan data hasil penelitian serupa secara eksperimental.

G. Analisis Kinerja Pendinginan

Pada tahap ini penulis membuat perbandingan pada suhu ruangan *reefer container* 20 feet menggunakan PCM sebagai bahan *wall insulation* pada dinding komposit dan *reefer container* 20 feet tanpa PCM.

H. Kesimpulan dan Saran

Setelah melalui proses, penulis membuat keputusan tentang penelitian ini yaitu memberikan perbandingan suhu ruangan pada *reefer container* 20 feet dan memberikan saran atau rekomendasi untuk penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan topik tersebut.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

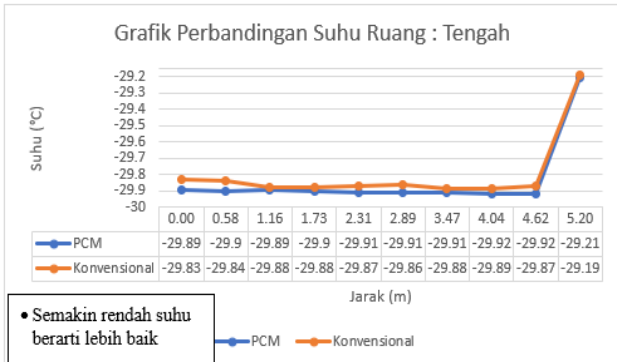
A. Analisis Distribusi Suhu pada Dinding dengan Finite Element Method (FEM)

Terdapat beberapa tahapan di dalam simulasi *Steady State Thermal* yang harus dipenuhi untuk mendapatkan hasil yang diinginkan. Tahapan tersebut diantaranya adalah *Engineering Data*, *Geometry*, *Model*, *Setup*, *Solution*, dan *Results*. Berikut ini merupakan hasil simulasi *Ansys Steady State Thermal* untuk setiap variasinya yang ditunjukkan oleh Gambar 2 dan Gambar 3.

Pada *reefer container* konvensional, tercapai nilai -30.95 °C sebagai temperatur terendah dan 36.04 °C sebagai temperatur tertinggi. Rata-rata temperatur yang didapat pada



Gambar 10. Ilustrasi Pengambilan Data Suhu.



Gambar 11. Grafik Perbandingan Suhu Container tanpa Beban : Tengah.

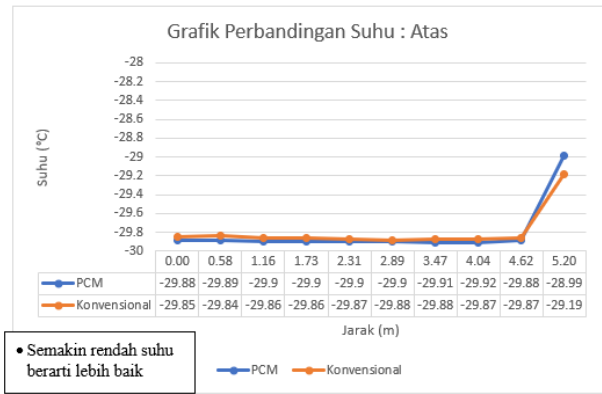
keseluruhan container didapat sebesar $-9.62\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada *reefer container* dengan PCM, tercapai nilai $-41.39\text{ }^{\circ}\text{C}$ sebagai temperatur terendah dan $37.04\text{ }^{\circ}\text{C}$ sebagai temperatur tertinggi. Rata-rata temperatur yang didapat pada keseluruhan container didapat sebesar $-17.94\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Setelah didapatkan hasil simulasi pada kedua variasi, berikutnya adalah melakukan analisis pada bagian dinding yang dimulai dari dinding dalam hingga ke dinding luar. Melalui pengambilan data pada bagian dinding, didapatkan hasil grafik perbandingan antara dinding *reefer container* konvensional dengan *reefer container* dinding PCM sesuai dengan Gambar 5. Semakin rendah suhu berarti lebih baik. Pada dinding *reefer container* konvensional, rata-rata suhu yang diperoleh sesuai dengan Gambar 4 senilai $-1.03\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sedangkan, untuk *reefer container* dengan PCM rata-rata suhu yang diperoleh senilai $-16.48\text{ }^{\circ}\text{C}$.

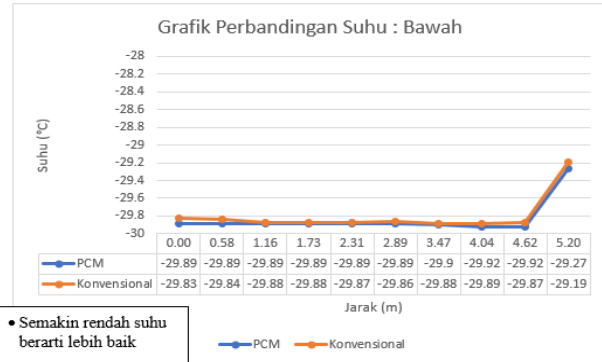
B. Analisis Suhu Ruang dengan Computational Fluid Dynamics

Analisis dilakukan menggunakan Software Ansys dengan jenis simulasi yang digunakan adalah *Fluid Flow (Fluent)*. *Fluent* merupakan sebuah perangkat lunak yang digunakan untuk melakukan simulasi terhadap fluida dengan metode numerik. Terdapat 4 jenis variasi dalam simulasi ini yaitu *reefer container* konvensional tanpa beban, *reefer container* konvensional dengan beban, *reefer container* PCM tanpa beban, dan *reefer container* PCM dengan beban.

Hasil simulasi dari *reefer container* tanpa beban yang ditunjukkan oleh Gambar 6 dan Gambar 7. Pada bagian dalam container, rata-rata suhu udara berkisar pada $-29.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, sedangkan untuk suhu pada area dinding sendiri berkisar antara $-29.34\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $-27.37\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada bagian dalam container, rata-rata suhu udara berkisar pada $-29.84\text{ }^{\circ}\text{C}$, sedangkan untuk suhu pada area dinding sendiri berkisar antara $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $-28\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Gambar 12. Grafik Perbandingan Suhu Container tanpa Beban : Atas.

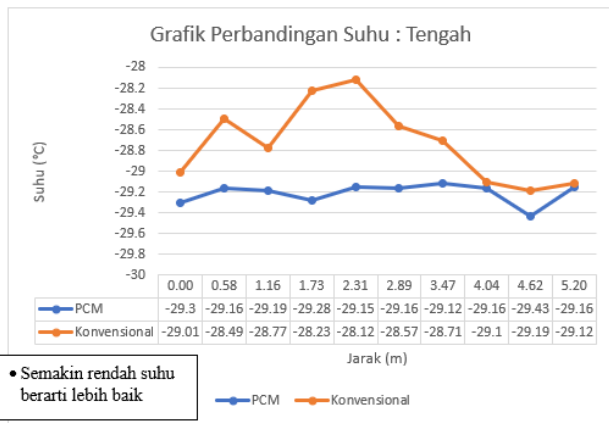


Gambar 13. Grafik Perbandingan Suhu Container tanpa Beban : Bawah.

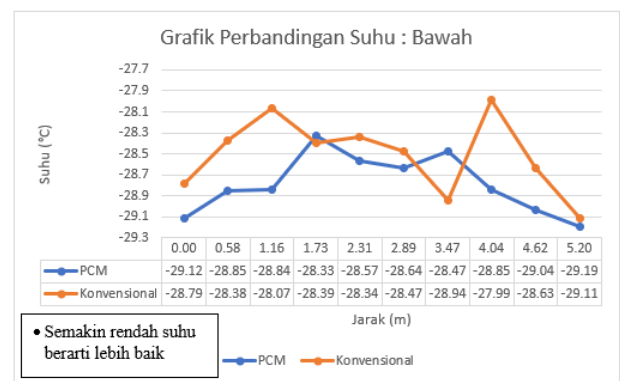
Hasil simulasi *reefer container* dengan beban yang ditunjukkan oleh Gambar 8 dan Gambar 9. Pada bagian dalam container, suhu udara berkisar pada $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $-16.94\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nilai suhu tertinggi sebesar $-16.94\text{ }^{\circ}\text{C}$ berada pada daerah beban. Rata-rata suhu pada ruangan adalah $-28.73\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada bagian dalam container, suhu udara berkisar pada $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $-18.56\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nilai suhu tertinggi sebesar $-18.56\text{ }^{\circ}\text{C}$ berada pada daerah beban. Rata-rata suhu pada ruangan adalah $-29.21\text{ }^{\circ}\text{C}$. Setelah didapatkan hasil simulasi maka akan dilakukan pengambilan data suhu udara pada bagian tengah container dimulai dari titik awal (ujung garis kiri) hingga titik akhir (ujung garis kanan) seperti pada Gambar 10.

Melalui pengambilan data didapatkan grafik perbandingan suhu udara pada *reefer container* untuk membandingkan suhu antara *reefer container* konvensional dengan *reefer container* PCM. Gambar 11, Gambar 12, dan Gambar 13 merupakan grafik perbandingan untuk *reefer container* dalam keadaan tanpa beban antara *reefer container* konvensional dengan *reefer container* PCM. Dapat dilihat melalui grafik, R.C. dinding PCM cenderung memiliki suhu lebih rendah dibandingkan dengan R.C. konvensional. Pada R.C. konvensional, suhu terendah dari sampel data adalah senilai $-29.89\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sedangkan suhu tertinggi senilai $-29.19\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada R.C. dengan dinding PCM, suhu terendah yang berhasil dicapai dari sampel adalah sebesar $-29.92\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sedangkan untuk suhu tertinggi berada pada kisaran $-29.21\text{ }^{\circ}\text{C}$.

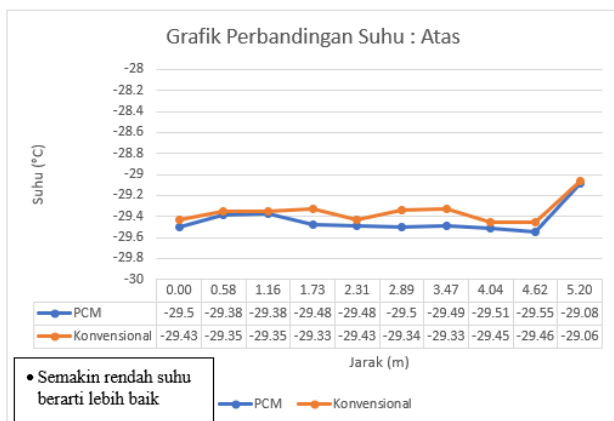
Pada bagian atas dimulai dari titik awal hingga menuju jarak 4.62 meter, suhu ruangan dengan PCM cenderung lebih rendah dibandingkan dengan konvensional. Suhu ruangan dengan PCM pada jarak 5.2 meter mengalami kenaikan dibandingkan konvensional. Pada bagian bawah, dimulai dari titik awal hingga menuju titik akhir pada jarak



Gambar 14. Grafik Perbandingan Suhu Container dengan Beban : Tengah.



Gambar 16. Grafik Perbandingan Suhu Container dengan Beban : Bawah.

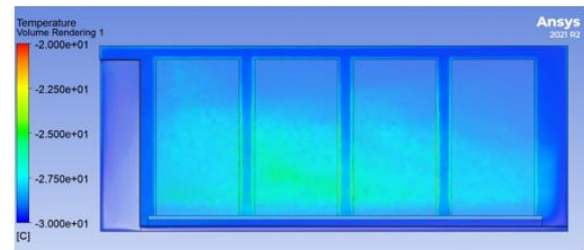


Gambar 15. Grafik Perbandingan Suhu Container dengan Beban : Atas.

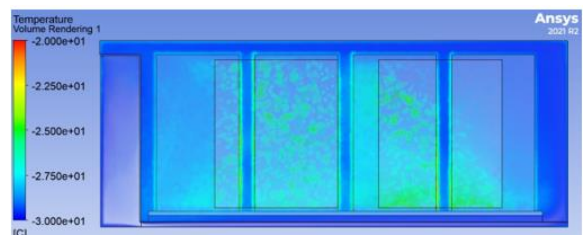
5.2 meter, suhu ruangan dengan PCM cenderung lebih rendah dibandingkan dengan konvensional. Melalui ketiga hasil variasi pengambilan data, hal ini sudah sesuai yang diharap yaitu PCM dapat menjadi salah satu bahan insulasi pada dinding container yang mana dapat berguna dalam mempertahankan suhu dan menjaga kestabilan suhu agar tidak mengalami kenaikan yang begitu signifikan.

Berikutnya, Gambar 14, Gambar 15, dan Gambar 16 merupakan grafik perbandingan untuk *reefer container* dalam keadaan dengan beban antara *reefer container* konvensional dengan *reefer container* PCM. Dapat dilihat melalui grafik, R.C. dinding PCM cenderung memiliki suhu lebih rendah dibandingkan dengan R.C. konvensional. Pada R.C. konvensional, suhu terendah dari sampel data adalah senilai $-29.19\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sedangkan suhu tertinggi senilai $-28.12\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pada R.C. dengan dinding PCM, suhu terendah yang berhasil dicapai dari sampel adalah sebesar $-29.43\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sedangkan untuk suhu tertinggi berada pada kisaran $-29.12\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Pada bagian pengambilan suhu atas, R.C. dengan PCM cenderung lebih dingin bila dibandingkan dengan konvensional. Walaupun memiliki perbedaan yang sedikit, namun suhu pada ruang dengan PCM masih lebih rendah dibandingkan dengan ruang konvensional. Pada bagian pengambilan suhu bawah, R.C. dengan PCM masih cenderung lebih dingin bila dibandingkan dengan konvensional. Terdapat 2 titik pada jarak 1.73 meter dalam pengambilan data dimana suhu konvensional lebih rendah $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}$ dibandingkan PCM. Namun pada titik berikutnya sejauh 2.31 meter, suhu konvensional kembali naik sedangkan suhu R.C. dengan PCM kembali turun. Pada titik



Gambar 17. Udara Pendinginan R.C. Konvensional.



Gambar 18. Udara Pendinginan R.C. dengan PCM.

3.47 meter terjadi perbedaan dimana suhu konvensional lebih rendah $0.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ dibandingkan PCM. Namun pada titik berikutnya sejauh 4.04 meter, suhu konvensional mengalami kenaikan tinggi sebesar $0.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ sedangkan ruang dengan PCM mengalami penurunan hingga $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Selanjutnya merupakan perbandingan antara R.C. Konvensional dengan R.C. PCM dalam segi pendinginan beban yang ditunjukkan oleh Gambar 17 dan Gambar 18 untuk kedua variasi diatur dengan suhu minimal $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan suhu maksimal $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dapat dilihat pada Gambar 17 dan 18, R.C. dengan PCM dapat mengurangi beban panas yang dihasilkan oleh muatan. Terlihat pada R.C. Konvensional dimana beban panas di sekitar muatan tersebar rata. Pada R.C. dengan PCM, beban panas dari muatan terlihat memudar dan lebih berkurang. Melalui perbandingan tersebut dapat dilihat bahwa PCM memiliki kemampuan dalam menjaga kestabilan suhu ruangan agar tidak mengalami kenaikan yang begitu signifikan. Hal ini membuktikan bahwa PCM dapat berfungsi dengan baik sebagai salah satu material insulasi.

V. KESIMPULAN/RINGKASAN

Penelitian terbagi menjadi dua garis besar. Pertama adalah menggunakan *Finite Element Method* (FEM) untuk mengetahui persebaran suhu pada dinding dan yang kedua adalah menggunakan bantuan *Computational Fluid Dynamics* (CFD) untuk mengetahui persebaran udara pendinginan pada bagian dalam container. Berdasarkan

penelitian yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan berikut. (1) Dalam penggunaan *Finite Element Method* (FEM), PCM terbukti dapat menjaga suhu pada dinding. Berikut merupakan rincian suhu dinding dengan metode FEM. (a) R.C. Konvensional, yaitu dengan rata-rata suhu dinding $-1.03\text{ }^{\circ}\text{C}$, rata-rata suhu keseluruhan $-9.62\text{ }^{\circ}\text{C}$, dan suhu terendah pada keseluruhan bagian container sebesar $-30.95\text{ }^{\circ}\text{C}$. (b) R.C. Dinding PCM, yaitu dengan rata-rata suhu dinding $-16.48\text{ }^{\circ}\text{C}$, rata-rata suhu keseluruhan $-17.94\text{ }^{\circ}\text{C}$, dan suhu terendah pada keseluruhan bagian container sebesar $-41.39\text{ }^{\circ}\text{C}$. (2) Pada analisis menggunakan bantuan *Computational Fluid Dynamics* (CFD), PCM juga terbukti dapat menjaga dan mempertahankan suhu udara agar tidak terjadi kenaikan yang begitu signifikan. Berikut merupakan rincian suhu ruang dengan metode CFD. (a) R.C. Konvensional tanpa beban, yaitu rata-rata suhu ruangan $-29.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan suhu terendah $-29.89\text{ }^{\circ}\text{C}$. (b) R.C. Dinding PCM tanpa beban, yaitu rata-rata suhu ruangan $-29.84\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan suhu terendah $-29.92\text{ }^{\circ}\text{C}$. (c) R.C. Konvensional dengan beban, yaitu rata-rata suhu ruangan $-28.73\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan suhu terendah $-29.19\text{ }^{\circ}\text{C}$. (d) R.C. Dinding PCM dengan beban, yaitu rata-rata suhu ruangan $-29.21\text{ }^{\circ}\text{C}$

dengan suhu terendah $-29.43\text{ }^{\circ}\text{C}$.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Fioretti, P. Principi, and B. Copertaro, "A refrigerated container envelope with a PCM (Phase Change Material) layer: Experimental and theoretical investigation in a representative town in Central Italy," *Energy Convers. Manag.*, vol. 122, pp. 131–141, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.enconman.2016.05.071.
- [2] B. Copertaro, P. Principi, and R. Fioretti, "Thermal performance analysis of PCM in refrigerated container envelopes in the Italian context – Numerical modeling and validation," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 102, pp. 873–881, Jun. 2016, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2016.04.050.
- [3] S. A. Tassou, G. De-Lille, and Y. T. Ge, "Food transport refrigeration – Approaches to reduce energy consumption and environmental impacts of road transport," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 29, no. 8–9, pp. 1467–1477, Jun. 2009, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2008.06.027.
- [4] S. A. Tassou, J. S. Lewis, Y. T. Ge, A. Hadawey, and I. Chaer, "A review of emerging technologies for food refrigeration applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 30, no. 4, pp. 263–276, Mar. 2010, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2009.09.001.
- [5] K. K. Sørensen, "Model Based Control of Reefer Container Systems," Aalborg University, Denmark, 2015.
- [6] T. E. Alam, "Experimental Investigation of Encapsulated Phase Change Materials for Thermal Energy Storage," University of South Florida, Tampa, Florida, 2015.
- [7] J. M. Nasser Ashgriz, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics*. Toronto, Canada: University of Toronto, 2002.