

Journal of Applied Mechanical Engineering and Green Technology

Journal homepage: <https://ojs2.pnb.ac.id/index.php/JAMETECH>
p-ISSN: 2655-9145; e-ISSN: 2684-8201

Perilaku *supercooling* pada proses *solidification* material perubahan fasa berbasis air

I Made Rasta^{1*}, I Nyoman Suamir¹, Adi Winarta¹, I Wayan Adi Subagia² dan I Dewa Made Susila²

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Utilitas MEP, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta selatan, Badung, Bali 80364, Indonesia

²Program Studi Teknik Pendingin dan Tata Udara, Politeknik Negeri Bali, Jl. Kampus, Kuta selatan, Badung, Bali 80364, Indonesia

*Email: maderasta@pnb.ac.id

Abstrak

Penyimpanan energi termal berbasis *phase change material* (PCM) sebagai material penyimpan energi dianggap sebagai teknologi yang menjanjikan untuk memenuhi kebutuhan energi di masa depan karena biayanya yang rendah dan kapasitas penyimpanan yang tinggi pada kondisi isothermal. Penyimpanan energi termal menjadi komponen yang tak terelakkan dari pemanfaatan teknologi energi terbarukan yang bersifat intermiten, karena perannya yang signifikan dalam meningkatkan efisiensi dan *Quality of Service* (QoS). Saat ini, salah satu penelitian utama dalam sistem tersebut adalah meningkatkan efisiensi penukar panas dan pembawa panas. Oleh karena itu, mempelajari perilaku termal dan sifat termofisika penyimpanan panas sangat penting. *Supercooling* adalah sifat termofisika PCM yang bermasalah dalam aplikasi penyimpanan termal dan merupakan tantangan dalam aplikasi teknis. *Supercooling* bahan perubahan fasa (PCM) selama proses perubahan dari cair ke padat adalah masalah utama dalam penyimpanan energi termal, yang mengurangi efisiensi energi dan memperburuk pemborosan energi. Studi ini berfokus pada karakteristik *supercooling* PCM di bawah nukleasi heterogen, yang memberikan ide baru untuk meneliti pengaruh agen nukleasi pada tingkat *supercooling* larutan berair. Pemahaman, prediksi dan, jika mungkin, pencegahan, atau setidaknya pengurangan, *supercooling* sangat penting khususnya untuk sistem penyimpanan energi termal panas laten, karena perbedaan suhu di dalamnya harus kecil untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi. Air adalah PCM yang paling terkenal saat ini, karena mempunyai karakteristik yang baik, namun mempunyai kelemahan yaitu *supercooling* tinggi. Berbagai metoda telah dicari dan dikembangkan untuk mengendalikan perilaku atau cairan *supercooling*. Metode yang paling ekonomis dan efisien untuk mengurangi atau menghilangkan *supercooling* adalah penambahan agen nukleasi. Berbagai sampel PCM yaitu larutan propilenglikol dalam air dibuat dengan berbagai prosentase (10/90, 20/80 dan 30/70) dengan tujuan untuk mengurangi *supercooling* air. Sampel yang dibuat di uji dengan metoda T-history. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *supercooling* air semakin berkurang seiring dengan bertambahnya prosentase larutan propilin glikol dalam air, dari 10 derajat berturut-turut menjadi masing-masing 6, 4, 2 derajat, sehingga sesuai untuk aplikasi pendingin.

Kata kunci: *Supercooling*, agen nukleasi, bahan perubahan fasa, penyimpanan energi termal.

Abstract: *Thermal energy storage based on phase change material (PCM) as an energy storage material is considered a promising technology to meet future energy needs due to its low cost and high storage capacity under isothermal conditions. Thermal energy storage is an inevitable component of intermittent use of renewable energy technology, due to its significant role in improving efficiency and Quality of Service (QoS). At present, one of the main researchers in such systems is to improve the efficiency of heat exchangers and heat carriers. Therefore, studying the thermal behaviour and thermophysical properties of heat storage is very important. Supercooling is a thermophysical property of PCM that is problematic in thermal storage applications and is a challenge in technical applications. Supercooling of phase change materials (PCM) during the process of changing from liquid to solid is a major problem in thermal energy storage, which reduces energy efficiency and exacerbates energy wastage. This study focuses on the supercooling characteristics of PCM under heterogeneous nucleation, which provides a new idea to investigate the effect of nucleating agents on the supercooling rate of aqueous solutions. Understanding, predicting and, where possible, preventing, or at least reducing, supercooling is of particular importance for latent heat thermal energy storage systems, as the temperature differences within them must be small to achieve higher efficiencies. Water is the most popular PCM today, because it has good characteristics, but has a weakness, namely high supercooling. Various methods have been sought and developed to control the behaviour of supercooling fluids. The most economical and efficient method for reducing or eliminating supercooling is the addition of a nucleating agent. Various PCM samples, namely propylene glycol solution in water, were made in various percentages (10/90, 20/80 and 30/70) with the aim of reducing supercooling of water. The samples made were tested by the T-history method. The results showed that the water supercooling decreased with the increase in the percentage of propylene glycol solution in water, from 10 degrees to 6, 4, 2 degrees respectively, making it suitable for cooling applications.*

Keywords: *supercooling*, nucleation agent, phase-Change Material, thermal energy storage

1. Pendahuluan

Teknologi penyimpanan energi perubahan fase telah menjadi topik banyak penyelidikan sampai saat ini karena memiliki banyak aplikasi industri termasuk aerospace, air conditioning dan refrigerasi, sistem penyimpanan panas matahari, dan pemanas gedung. Sejumlah besar literatur tentang studi eksperimental dan numerik diterbitkan dalam beberapa dekade terakhir [1-4].

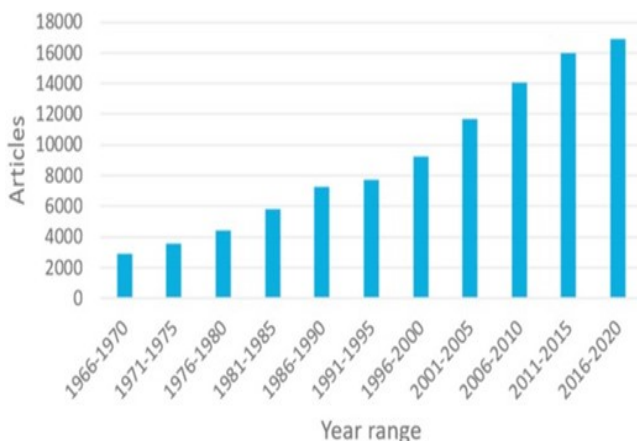
Konsep penyimpanan termal diselidiki lebih awal pada tahun 1970-an [5]. Penyimpanan energi termal laten menggunakan bahan perubahan fasa (*phase change material* = PCM) telah disarankan untuk meningkatkan kinerja, karena kepadatan penyimpanan energi yang besar dan perubahan suhu minimal selama transisi fasa [6].

PCM biasanya dibagi menjadi dua kategori: organik dan anorganik. PCM anorganik memiliki karakteristik rentang temperatur transisi fasa yang besar, nilai entalpi yang besar, dan keluaran energi yang tidak stabil, sedangkan PCM organik memiliki karakteristik densitas penyimpan panas yang rendah, tidak korosi, dan tidak mengalami supercooling [7]. Entalpi transisi fase garam anorganik besar, dan suhu transisi fase stabil, tetapi tingkat supercooling selama transisi fase besar, yang korosif terhadap bahan penyimpanan dan pemisahan fase terjadi dengan peningkatan jumlah siklus [8].

Ada beberapa metode untuk mengatasi supercooling PCM, seperti nucleating agent [9-11], getaran ultrasonik [12-15], dan getaran mekanis [16]. Menambahkan agen nukleasi dan agen pengental untuk bahan perubahan fasa adalah metode yang luas dan terkemuka diadopsi oleh para peneliti untuk mengurangi tingkat supercooling dan pemisahan fasa [17-21].

Supercooling merupakan suatu fenomena dimana cairan membeku di bawah titik beku normalnya. Bahan PCM masih cair dibawah titik lelehnya, yang dapat menyebabkan kegagalan bahan berfungsi sebagai penyimpanan energi termal. Maka mengendalikan supercooling menjadi sangat penting dalam teknologi PCM sehingga dapat terjadi penyimpanan energi panas laten pada suhu isothermal.

Pentingnya fenomena ini tercermin dari meningkatnya jumlah artikel, konferensi, dan paten yang mengandung *supercooling* dalam judul dan abstraknya, selama beberapa dekade terakhir. Berdasarkan data Google scholar, Gambar 1 menggambarkan tren ini.



Gambar 1. Peningkatan jumlah artikel tentang *supercooling* [22]

Tergantung pada aplikasi yang diberikan, supercooling dapat berguna atau merusak. Namun, memperlakukan fenomena ini membutuhkan pengetahuan yang baik tentang perilakunya dalam kondisi yang berbeda. Supercooling adalah salah satu fenomena yang sangat umum di alam dan proses teknologi tetapi masih baru bagi para peneliti dan pengembang.

Pengenalan menyeluruh untuk supercooling dilakukan melalui kemunculannya di alam atau aplikasi sehari-hari seperti pengawetan makanan dan sistem penyimpanan energi panas. Air adalah PCM yang paling terkenal saat mempelajari kejadian supercooling di alam. Pentingnya mempertimbangkan fenomena ini dalam karya eksperimental dan penelitian dijelaskan dengan menghadirkan efek langsungnya pada kinerja dan efisiensi aplikasi.

Saat ini mencari bahan untuk penyimpanan energi panas laten dengan biaya lebih rendah telah membawa para peneliti untuk mempelajari bahan baru sebagai bahan penyimpanan energi termal baru. Bahan perubahan fase baru harus memiliki kinerja yang lebih baik atau setidaknya stabilitas termal dan kimia yang diharapkan untuk PCM.

Air saat ini merupakan PCM terkenal, karena mempunyai karakteristik yang baik. Namun, air mempunyai supercooling tinggi yang membatasi aplikasi praktisnya sebagai penyimpan energi termal. Ruang lingkup makalah ini adalah untuk memilih agen nukleasi terbaik untuk digunakan dengan air untuk mengoptimalkan kinerjanya sebagai bahan perubahan fasa dengan mengurangi *supercooling*-nya. Pemilihan agen nukleasi dipertimbangkan dan dibandingkan dengan hasil yang diperoleh untuk menguatkan pengaruhnya.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengurangi dan bahkan kalau memungkinkan meniadakan derajat supercooling air dengan menambah larutan glikol, karena supercooling parameter kunci dan masalah kritis dari sudut pandang praktis penyimpanan energi termal. Pemahaman faktor dan metode untuk mengontrol supercooling adalah dasar untuk memajukan penelitian dan teknologi energi panas.

Dengan demikian, kemampuan nukleasi yang andal saat melepaskan panas laten sangat penting. Selain itu, material *supercooled* harus memiliki energi aktivasi yang besar untuk nukleasi untuk menghindari kristalisasi spontan dalam kondisi *supercooled*. Meskipun beberapa pengembang telah memberikan teori cairan metastabil yang terhormat, perhitungan sifat termofisika masih tetap menjadi masalah terbuka dan mengendalikan perilaku atau cairan *supercooled* merupakan tantangan dalam aplikasi teknis. Oleh karena itu, memahami proses kristalisasi sangat penting untuk kemajuan dalam penelitian dan teknologi PCM.

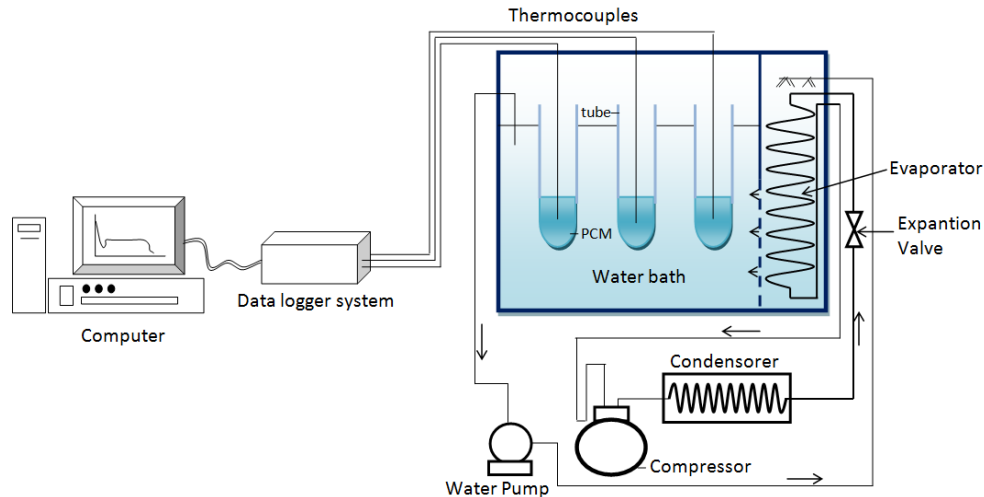
2. Metode dan Bahan

Bahan yang digunakan sebagai PCM dalam penelitian ini adalah berbasis air. Berbagai prosentase (5%, 10%, 15%, 20%, 25%, dan 30%) larutan propilen glikol dalam air dibuat untuk diuji sebagai sampel PCM.

Ada berbagai metoda pengukuran derajat supercooling yang mengukur titik leleh dan titik beku cairan superdingin dengan akurasi yang dapat diterima. Salah satu sistem pengukuran umum digambarkan pada Gambar 2.

Metode T-history adalah sebuah metode sederhana untuk menentukan titik leleh, kalor lebur, kalor jenis dan konduktivitas termal PCM. Kurva *Temperatur - Time* dari sampel PCM diambil dan sifat *thermophysical* mereka diperoleh dengan membandingkan kurva dengan kurva *Temperature - Time* dari bahan lain yang dikenal berfungsi sebagai referensi (biasanya air murni) [23]. Dibandingkan dengan metode lain seperti metode kalorimetrik konvensional, DSC dan DTA, metode- T history [24-26] memiliki beberapa keistimewaan sebagai berikut: (i) telah

dirancang untuk menguji sampel besar; (ii) unit percobaan sederhana, (iii) ia mampu mengukur beberapa sifat *thermophysical* beberapa sampel dari PCM secara bersamaan, dan (iv) memungkinkan seseorang untuk mengamati proses perubahan fase dari masing-masing sampel PCM. Zhang dan Jiang mengukur sifat termofisik beberapa PCM menggunakan metode T dan ditemukan kesesuaian yang diinginkan antara hasil dan data yang tersedia dalam literatur.

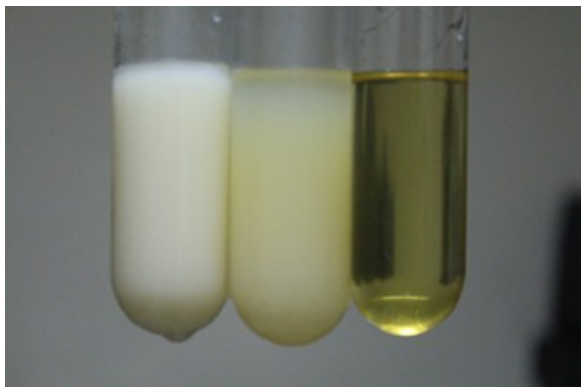


Gambar 2. Diagram skematik Metoda T-history

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Penyimpanan energi termal cairan supercooled

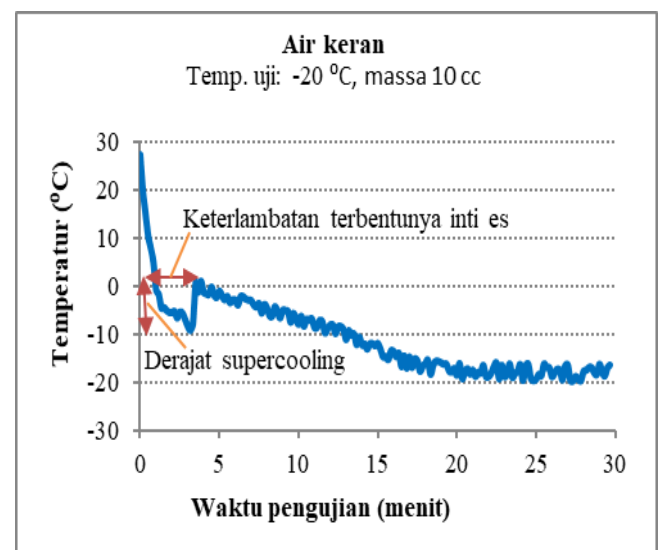
Gambar 3 menunjukkan cairan *supercooled* atau sangat dingin dan keadaan padatnya. Cairan di mana mereka tetap dalam fase cair ketika didinginkan di bawah suhu titik lelehnya. Cairan *supercooled* membutuhkan energi tambahan untuk melepaskan panas laten yang tersimpan. Selain itu, material *supercooled* harus memiliki energi aktivasi yang besar untuk nukleasi dan menghindari kristalisasi spontan dalam kondisi *supercooled*. Misalnya, air murni dapat *supercooled* hingga $-41\text{ }^{\circ}\text{C}$, pada tekanan atmosfer di laboratorium tanpa terjadi transisi ke fase padat [25].



Gambar 3. Cairan *supercooled* dan keadaan padatnya

Kurva *supercooling* dan perilaku termal dari cairan *supercooled* sebelum dimulai *solidification* (perubahan

wujud dari cair menjadi padat) ditunjukkan pada Gambar 4. *Supercooling* air yang tinggi diakibatkan karena proses pertumbuhan kristal (nukleasi) yang buruk, sehingga dibutuhkan energi yang besar sampai terbentuknya inti es (*nuclei*). Dibuktikan dengan dibutuhkan waktu yang lama sampai terbentuknya inti es (*nucleation delay*) dan temperatur yang jauh lebih rendah dari titik lelehnya, sehingga menjadi tantangan dalam aplikasi praktis sebagai penyimpanan energi termal. Setelah terbentuknya inti, suhu naik dan stabil pada titik leleh (T_m) segera setelah kristalisasi (Gambar 5).



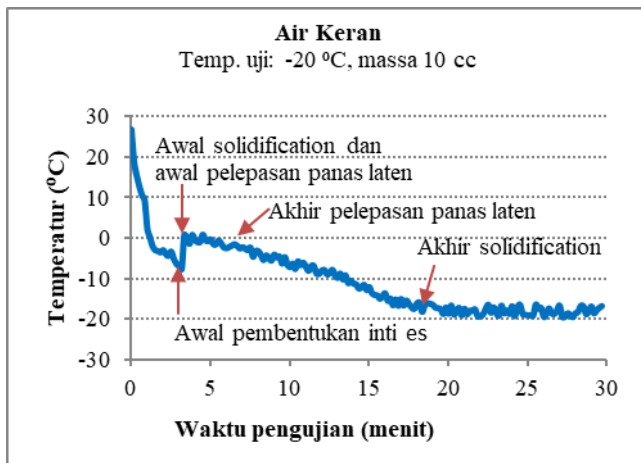
Gambar 4. Kurva *supercooling* air

3.2 Derajat Supercooling

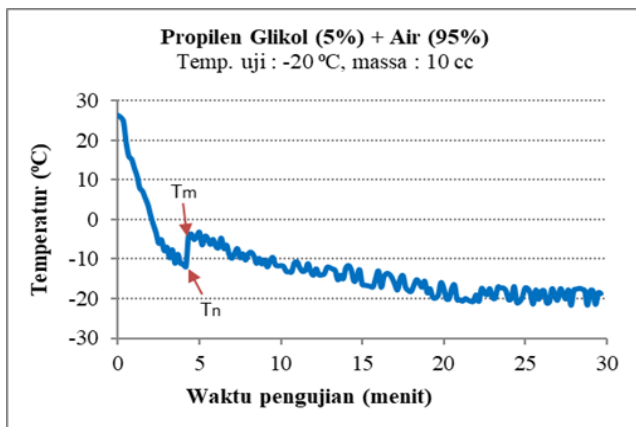
Derajat *supercooling* adalah perbedaan antara suhu leleh teoritis dan suhu terendah yang dicapai oleh fasa cair, disebut suhu nukleasi (*nucleation*) yaitu start mulai terbentuknya inti es. Hal ini dapat ditunjukkan sebagai persamaan histeresis [26]:

$$\Delta T_s = T_m - T_n \quad (1)$$

di mana ΔT_s menunjukkan derajat *supercooling*, T_m adalah suhu leleh dan T_n adalah suhu nukleasi. Peningkatan kapasitas panas efektif cairan superdingin dapat dilakukan melalui pengurangan interval kisaran suhu leleh dan beku ($T_m - T_n$) yang merupakan derajat pendinginan



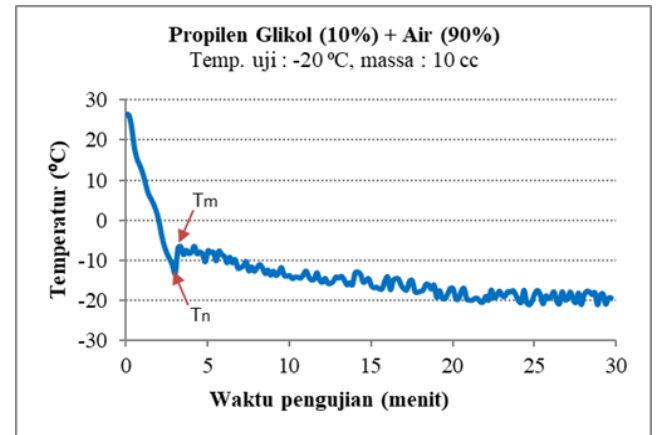
Gambar 5. Kurva solidification air



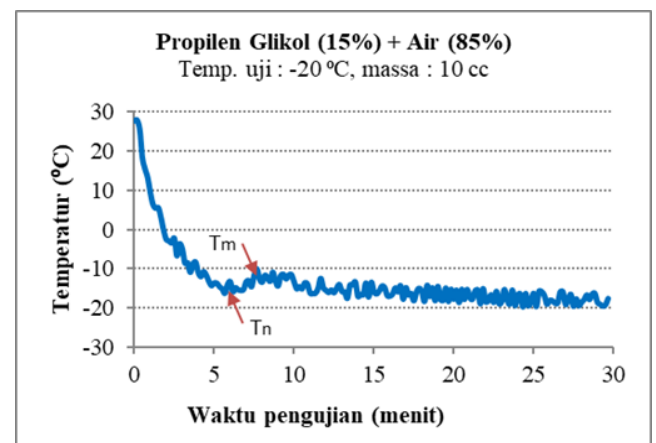
Gambar 6. Kurva solidification 5% propilen glikol dengan 95% air

Gambar 6, 7, 8, 9 menunjukkan proses solidifikasi, yaitu perubahan wujud cair dari campuran berbagai prosentase, masing-masing 5%, 10%, 15%, 20% propilen glikol dengan 95%, 90%, 85%, 80% air menjadi padat. Cairan membeku setelah suhu pendinginan jauh dibawah suhu titik beku normalnya. Proses kristalisasi melalui beberapa fase yaitu fase induksi, fase pertumbuhan kristal dan fase pertumbuhan kembali kristal. Selama fase induksi, inti terbentuk dan tumbuh hingga ukuran yang cukup untuk menjadi stabil (terbentuk pusat nukleasi). Selanjutnya, kristal PCM berdifusi menuju nukleus untuk diadsorpsi di permukaannya, dan karenanya menumbuhkan nukleus.

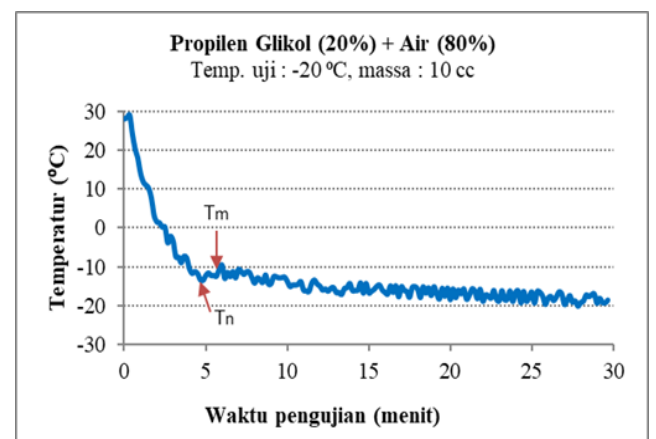
Bahan teradsorpsi bermigrasi sepanjang permukaan dan dimasukkan ke dalam bentuk kristal. Kristal kecil ini terus tumbuh dan akhirnya menjadi cukup besar dan cukup banyak untuk mempertahankan laju pertumbuhan kristal yang cepat. Laju kristalisasi melambat saat proses pembekuan hampir selesai. Bahkan setelah bahan benar-benar beku, proses redistribusi terus memodifikasi bentuk partikel dan distribusi ukuran.



Gambar 7. Kurva solidification 10% propilen glikol dengan 90% air

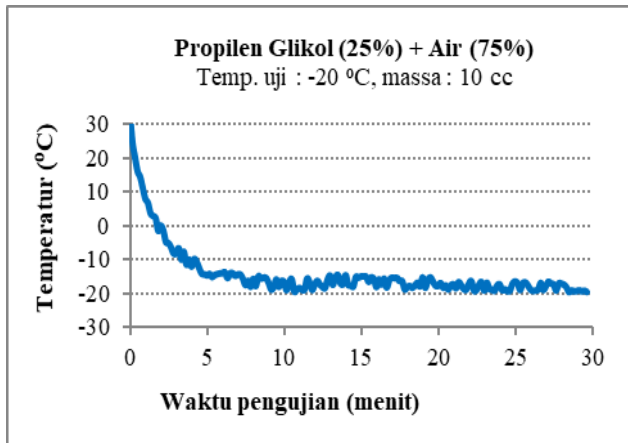


Gambar 8. Kurva solidification 15% propilen glikol dengan 85% air

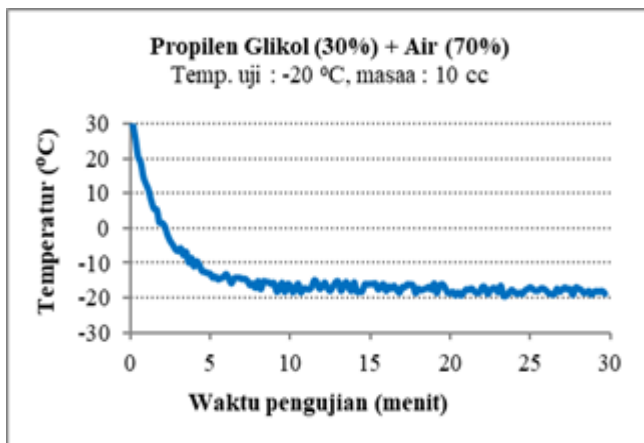


Gambar 9. Kurva solidification 20% propilen glikol dengan 80% air

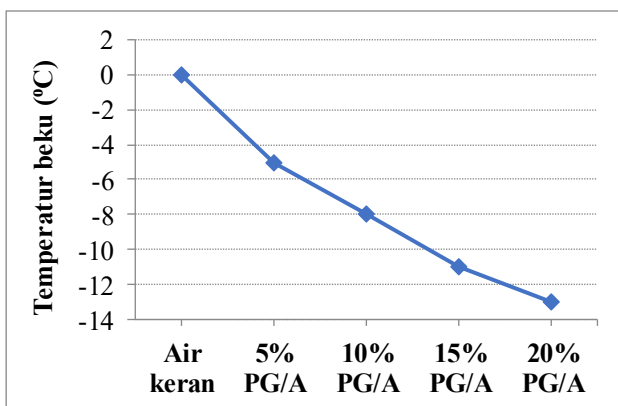
Penambahan propilen glikol kedalam air menyebabkan titik beku air menurun dan derajat supercooling juga menurun. Penambahan berbagai prosentase larutan propilen glikol (5%, 10%, 15% dan 20%) kedalam air secara berturut-turut masing-masing menyebabkan titik beku air menurunkan menjadi 5 °C, 8 °C, 11 °C, dan 13 °C. Hal yang sama juga terjadi pada derajat supercooling, yaitu terjadi penurunan derajat supercooling masing-masing berturut-turut menjadi 8 K, 7 K, 4 K, dan 1 K.



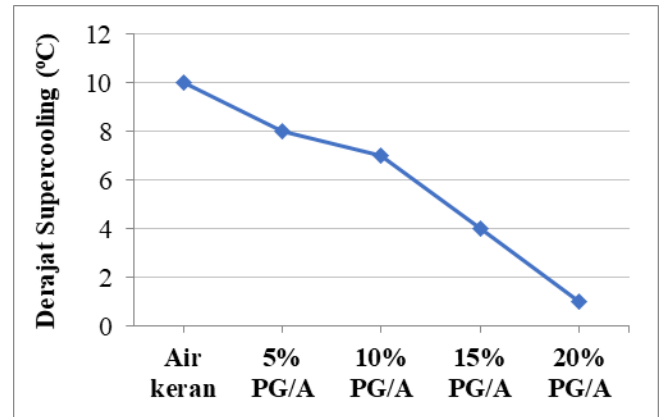
Gambar 10. Kurva pendinginan (*cooling*) 25% propilen glikol dengan 75% air



Gambar 11. Kurva pendinginan (*cooling*) 30% propilen glikol dengan 70% air



Gambar 12. Temperatur beku dari air dan berbagai prosentase propilen glikol dalam air



Gambar 13. Derajat supercooling dari air dan berbagai prosentase propilen glikol dalam air

Table 1. Sifat termal PCM dari air keran dan campuran propilen glikol dalam air.

Sample (Vol.%)	T-history	
	Proses pendinginan	
	Suhu pembekuan (T _m , °C)	Derajat supercooling (K)
Air keran	0	10
5/95 (PG/A)	5	8
10/90 (PG/A)	8	7
15/85 (PG/A)	11	4
20/80 (PG/A)	13	1
25/75 (PG/A)	Tidak membeku	-
30/70 (PG/A)	Tidak membeku	-

PG/A = Propilen Glikol dalam Air

Sedangkan dengan penambahan larutan 25% dan 30% propilen glikol kedalam air tidak terjadi perubahan wujud dari cairan menjadi padat (*solidification*), seperti ditunjukkan pada Gambar 10 dan 11. Hal ini kemungkinan disebabkan oleh: (1) titik beku larutan lebih rendah dari temperatur uji, (2) tidak terdapat partikel yang dapat memicu terbentuknya inti untuk pertumbuhan kristalisasi, (3) waktu pengujian belum cukup untuk tercapainya solidifikasi, dan lai-lain. Sehingga bahan hanya menyimpan panas sensible saja.

Gambar 12 menunjukkan suhu beku air dan larutan berbagai prosentase propilen glikol dalam air. Gambar 13 menunjukkan derajat supercooling air dan beberapa larutan propilen glikol dalam air. Secara terperinci suhu beku dan derajat supercooling air dan berbagai prosentase propilen glikol dalam air ditunjukkan pada Tabel 1. Hasil eksperimen menunjukkan penambahan propilen glikol dalam air mengakibatkan suhu pembekuan dan derajat supercooling air mengalami penurunan. Hasil yang paling menarik penambahan 20% propilen glikol dalam air menyebabkan supercooling air menurun drastic, bahkan sangat kecil (1 K), sehingga sangat sesuai untuk aplikasi penyimpanan energi termal temperatur rendah (refrigerasi).

4. Kesimpulan

Selama beberapa dekade terakhir, banyak pekerjaan eksperimental dan analitis telah dilakukan, menghasilkan peningkatan yang signifikan terhadap PCM yang andal dan

hemat biaya. Doping, pencangkakan, atau penggabungan bahan berstruktur unik meningkatkan konduktivitas termal, panas sensibel, dan panas laten fusi PCM murni. Stabilitas termal dan kimia dari rekayasa tersebut harus dinilai lebih lanjut sebelum penggunaan praktis.

Efisiensi perangkat penyimpanan energi termal perubahan fase secara langsung berkaitan dengan sifat termofisikanya. Campuran baru PCM murni dan aditif sedang dikembangkan untuk penggunaan penyimpanan energi termal. Ini adalah area penelitian yang sangat menarik dan penting saat ini. Sebagian besar metode untuk meningkatkan sifat PCM, produksi, dan efektivitas biaya masih dalam tahap pengujian, meskipun temuan menunjukkan bahwa mereka sangat menjanjikan untuk industri penyimpanan energi termal.

Studi ini difokuskan pada peningkatan kapasitas penyimpanan termal PCM. Kapasitas penyimpanan termal PCM dapat ditingkatkan dengan menggunakan aditif yang sesuai dalam proporsi yang sesuai. Namun, konsentrasi yang tidak tepat dapat menyebabkan pengurangan kapasitas penyimpanan panas.

Menambahkan aditif atau agen nukleasi yang sesuai ke PCM adalah salah satu metode yang paling sering digunakan untuk mengurangi derajat *supercooling* karena dapat memicu nukleasi. Hasil pengujian dari beberapa sampel PCM berbasis air yang dikembangkan dengan penambahan aditif propilen glikol, dapat mengurangi dan bahkan menghilangkan derajat *supercooling* air dan menurunkan titik beku air sehingga sesuai untuk aplikasi penyimpanan dingin. Derajat *supercooling* tergantung pada bentuk dan ukuran wadah, komposisi PCM, laju pemanasan dan pendinginan, area perpindahan panas, dan lain-lain.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan banyak terima kasih atas bantuan dan dukungan dari tim peneliti, Pranata Laboratorium Pendidikan (PLP), unit publikasi Pusat Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (P3M) Politeknik Negeri Bali yang telah membantu penyelesaian dan publikasi paper ini.

Daftar Pustaka

- [1] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. Razack, and S. Al-Hallaj, "A Review on Phase Change Energy Storage: Materials and Applications," *Energy Conversion Management*, 45(9), 2004, pp. 1597-1615. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.015>
- [2] T. U. Rehman, H. M. Ali, M. M. Janjua, U. Sajjad, and W. M. Yan, "A Critical Review on Heat Transfer Augmentation of Phase Change Materials Embedded with Porous Materials/foams," *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 135, 2019, pp. 649-673. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.02.001>
- [3] A. Sharma, R. Chauhan, M. A. Kalliolu, V. Chinnasamy, and T. Singh, "A Review of Phase Change Materials (PCMs) for Thermal Storage in Solar Air Heating Systems," *Material Today Procedia*, 44, 2020, pp. 4357-4363. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.560>
- [4] A. Raeesi, I.N. Suamir, S.A. Tassou, "Energy storage in freezer cabinets using phase change materials", The 2nd IIR International Conference on Sustainability and the Cold Chain, Paris.
- [5] J. Xu, R. Z. Wang, Y. Li, "A review of available technologies for seasonal thermal energy storage," *Solar Energy* 103, 2014, pp. 610–638.
- [6] Y. P. Zhang, J. H. Ding, X. Wang, R. Yang, K. P. Lin, "Influence of additives on thermal conductivity of shape stabilized phase change material," *Solar Energy Material Solar Cells*, 90 (11), 2006, pp. 1692-1702.
- [7] B. Swa, B. Tya, B. Zka, B. Wpa, "Thermal conductivity enhancement on phase change materials for thermal energy storage: A review," *Energy Storage Materials*, 25, 2020, pp. 251-295.
- [8] Q. Wang, J. Wang, Y. Chen, C. Y. Zhao, "Experimental investigation of barium hydroxide octahydrate as latent heat storage materials," *Solar Energy*, 177, 2019, pp. 99-107.
- [9] P. Hu, D. J. Lu, X.Y. Fan, X. Zhou, Z.S. Chen, "Phase change performance of sodium acetate trihydrate with AlN nanoparticles and CMC," *Solar Energy Materials Solar Cells*, 95, 2011, pp. 2645-2649.
- [10] B. M. L. Garay Ramirez, C. Glorieux, E. San Martin Martinez, J. J. A. Flores Cuautle, "Tuning of thermal properties of sodium acetate trihydrate by blending with polymer and silver nanoparticles," *Applied Thermal Engineering*, 62, 2014, pp. 838–844.
- [11] L. L. Wei, K. Ohsasa, "Supercooling and solidification behavior of phase change material," *ISIJ International*, 50 2010, pp. 1265-1269.
- [12] T. Inada, X. Zhang, A. Yabe, Y. Kozawa, "Active control of phase change from supercooled water to ice by ultrasonic vibration 1. Control of freezing temperature," *International Journal Heat and Mass Transfer*, 44, 2001, pp. 4523-4531.
- [13] X. Zhang, T. Inada, A. Yabe, Y. Kozawa, "Active control of phase change from supercooled water to ice by ultrasonic vibration 2. Generation of ice slurries and effect of bubble nuclei," *International Journal Heat and Mass Transfer*, 44, 2001, 4533-4539.
- [14] E. Miyasaka, M. Takai, H. Hidaka, Y. Kakimoto, I. Hirasawa, "Effect of ultrasonic irradiation on nucleation phenomena in a Na₂HPO₄•12H₂O melt being used as a heat storage material," *Ultrasonic Sonochemical*, 13, 2006, pp' 308-312.
- [15] X. Zhang, L. Cai, S. U. Zhongjie, C. Ping, Y. Zhong, "Effects of ultrasound on phase separation and crystallization of sodium acetate trihydrate," *CIESC Journal*, 61, 2010, pp. 104-108.
- [16] L. H. Pan, L. W. Huang, Y. Qiao, J. Zhao, M. Jiang, "Influence of vibration on the supercooling relex of inorganic salt solution as a phase change material," *Journal Zhejiang University Technology*, 36, 2008, pp. 655-658.
- [17] Y. Fang, C. Jin, X. Liang, X. Gao, Z. Zhang, "Preparation and performance of sodium acetate

- trihydrate/formamide composite phase change material,” *CIESC Journal*, 66, 2015, pp. 5142-5148.
- [18] W. Fu, T. Zou, X. Liang, S. Wang, X. Gao, Z. Zhang, Y. Fang, “Thermal properties and thermal conductivity enhancement of composite phase change material using sodium acetate trihydrate–urea/expanded graphite for radiant floor heating system,” *Applied Thermal Engineering*, 138, 2018, pp. 618-626.
- [19] W. U. Dongling, L. I. Tingxian, H. E. Feng, R. Wang, “Preparation and performance of modified sodium acetate trihydrate composite phase change material for thermal energy storage,” *CIESC Journal*, 69, 2018, pp. 2860-2868.
- [20] L. Jintian, M. Jinfeng, L. Weihua, L. Jing, X. Xiaoyan, “Supercooling mechanism and experimental study of sodium acetate trihydrate,” *Journal of Refrigeration*, 30, 2009, pp. 32-35.
- [21] L. Jintian, M. Jinfeng, L. Jing, Y. A. Shiguang, “A selection and optimization experimental study of additives to thermal energy storage material sodium acetate trihydrate,” *Journal of Function Materials*, 42, 2011, pp. 144-147. (In Chinese)
- [22] Shamseddine, F. Pennec, P. Biwole, F. Fardoun, “Supercooling of phase change materials: A review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 2022, 112172.
- [23] Y. Zhang, G. Zhou, K. Lin, Q. Zhang, H. Di, “Application of latent heat thermal energy storage in buildings: state of the art and outlook,” *Building and Environmental*. 42, 2007, pp. 2197-209.
- [24] I. M. Rasta, and I. N. Suamir, “The role of vegetable oil in water phase change materials for medium temperature refrigeration,” *Journal of Energy Storage*, 15, 2018, pp. 368-378.
- [25] I.N. Suamir, I.M. Rasta, Sudirman, K.M. Tsamos, “Development of Corn-Oil Ester and Water Mixture Phase Change Materials for Food Refrigeration Applications”, *Energy Procedia*, 161, 198-206.
- [26] I. M. Rasta, and I. N. Suamir, “Study on Thermal Properties of Bio-PCM Candidates in Comparison with Propylene Glycol and Salt Based PCM for sub-Zero Energy Storage Applications”, *Materials Science and Engineering*, 494 (1), 012024.
- [27] A. Awasthi, N. Ali Shah, Y. J. Oh Kyung Kwon, J. D. Chung, “Supercooling effects and solidification of water inside a horizontal cylinder with a rough, sinusoidal surface shape,” *Journal of Energy Storage*, 51, 2022, 104442.
- [28] N. Beaupere, U. Soupremanien, L. Zalewski, “Experimental measurement of the residual solidification duration of supercooled sodium acetate trihydrate,” *International Journal of Thermal Sciences*, 158, 2020. 106544.