

## Efektivitas Perubahan Fase Material KCl/H<sub>2</sub>O sebagai Sistem Pendingin Ikan Laut

Iqbal Alief, Sri Rahayu Alfitri Usna\*, Astuti, Sri Oktamuliani  
Laboratorium Material, Departemen Fisika  
Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Andalas  
Kampus Unand Limau Manis, Padang, 25163, Indonesia

Info Artikel	ABSTRAK
<p><b>Histori Artikel:</b> Diajukan: 20 Juli 2023 Direvisi: 16 September 2023 Diterima: 25 Oktober 2023</p>	<p>Penelitian ini bertujuan untuk menentukan efektivitas material berubah fase (<i>phase change material</i>, PCM) KCl/H<sub>2</sub>O sebagai sistem pendingin ikan. KCl/H<sub>2</sub>O merupakan PCM eutektik garam hidrat yang memiliki temperatur lebur -10,7 °C dan entalpi 273 kJ/kg. Sampel yang diuji adalah ikan laut Kuwe dengan massa 1 kg (4 ekor). Variasi massa ikan terhadap KCl/H<sub>2</sub>O adalah 1:0,5; 1:1; 1:2; dan 1:3. Proses peleburan temperatur sistem pendingin ikan setiap waktu diukur menggunakan sensor temperatur DS18B20. Berdasarkan hasil penelitian, secara teknis KCl/H<sub>2</sub>O efektif menurunkan temperatur ikan sebesar -0,22 °C/menit. Penggunaan 2 kg KCl/H<sub>2</sub>O efektif mempertahankan temperatur ikan pada rentang temperatur 0 hingga 5 °C selama 20 jam dan penggunaan 3 kg KCl/H<sub>2</sub>O baik dalam mempertahankan temperatur ikan dalam rentang temperatur lebih rendah yaitu -5 hingga 0 °C selama 16 jam. Dari segi ekonomi, biaya penanganan proses pendinginan ikan menggunakan sistem KCl/H<sub>2</sub>O enam kali lebih besar dibandingkan sistem pendingin konvensional, sehingga sistem ini kurang direkomendasikan.</p>
<p><b>Kata kunci:</b> ikan kuwe KCl/H<sub>2</sub>O PCM pendingin ikan</p>	<p><i>This study aims to determine the effectiveness of phase change material (PCM) KCl/H<sub>2</sub>O as a fish cooling system. KCl/H<sub>2</sub>O is a eutectic PCM of hydrate salts with a melting temperature of -10.7 °C and an enthalpy of 273 kJ/kg. The samples tested were Kuwe marine fish with a mass of 1 kg (4 heads). The variation in fish mass to KCl/H<sub>2</sub>O is 1:0.5, 1:1, 1:2, and 1:3. The process of changing the temperature of the fish cooling system every time is measured using the DS18B20 temperature sensor. Based on the study's results, KCl/H<sub>2</sub>O is effective in reducing fish temperature by -0.22 °C/minute. The use of 2 kg KCl/H<sub>2</sub>O is effective in maintaining fish temperature in the temperature range of 0 to 5 °C for 20 hours, and the use of 3 kg KCl/H<sub>2</sub>O is good in maintaining fish temperature in the lower temperature range of -5 to 0 °C for 16 hours. In terms of economy, the cost of handling the fish cooling process using KCl/H<sub>2</sub>O is six times greater than conventional cooling, so this system is less recommended.</i></p>
<p><b>Keywords:</b> <i>kuwe fish KCl/H<sub>2</sub>O PCM fish cooler</i></p>	
<p><b>Penulis Korespondensi:</b> Sri Rahayu Alfitri Usna Email: <a href="mailto:sriahayualfitri@sci.unand.ac.id">sriahayualfitri@sci.unand.ac.id</a></p>	

Copyright © 2024 Author(s). All rights reserved

## I. PENDAHULUAN

*Phase change material* (PCM) atau material berubah fase merupakan bahan penyimpan panas laten dengan nilai panas laten yaitu 283 kJ/kg, sehingga memungkinkan untuk digunakan sebagai sistem penyimpan kalor dalam jumlah besar pada temperatur yang hampir konstan. Ketika temperatur lingkungan lebih tinggi dari temperatur perubahan fase maka akan terjadi penyerapan sejumlah kalor, sebaliknya jika temperatur lingkungan lebih rendah dari temperatur perubahan fase maka akan terjadi pelepasan sejumlah kalor (Wang dkk., 2023). Pemanfaat PCM sebagai penyimpan panas laten telah diterapkan diberbagai bidang seperti sistem pendingin ruangan (Iskandar dkk., 2023; Ismail dkk., 2022; Sharma dkk., 2022), sistem penghangat ruangan (Jeong dkk., 2023; Kong dkk., 2022; Wan & Wang, 2018; Xu dkk., 2023), sistem penjaga kenyamanan termal pada pakaian (Gao, 2014; Hu dkk., 2023; Wang dkk., 2023), sistem pendingin produk makanan (Sarkar dkk., 2022; Siddique dkk., 2023; Tas & Unal, 2021; Zhang dkk., 2023). Lebih lanjut, aplikasi PCM pada produk makanan juga dimanfaatkan dalam sistem pendingin ikan dan produk makanan laut lainnya setelah ditangkap oleh nelayan, sehingga kesegaran produk laut bisa dijaga.

Pemanfaatan PCM komersial produk KITECH yang memiliki titik lebur -4 hingga -12 °C sebagai sistem pendingin produk makanan laut menunjukkan kinerja memperpanjang waktu temperatur simpan produk dan mencapai temperatur yang lebih rendah dibandingkan sistem pendingin konvensional. Hasil uji mikrobiologi membuktikan tidak terjadinya perubahan pada kualitas produk (Pudjiastuti dkk., 2015). Kinerja PCM organik jenis parafin sebagai sistem pendingin alternatif *cold storage* dimanfaatkan sebagai sistem pendingin ikan. Parafin memiliki titik lebur -7 sampai -4 °C menunjukkan kemampuan mempertahankan temperatur meningkat seiring dengan meningkatnya jumlah PCM, baik pada *cool box* dengan sistem sirkulasi udara maupun pada sistem tanpa sirkulasi udara (Taufiqurrahman, 2016). Sukoco dkk. (2021) melakukan penelitian tentang penggunaan PCM kalium klorida (KCl) dalam kotak penyimpanan ikan (*storage box*). Percobaan ini membandingkan performa termal dan kualitas ikan antara penggunaan PCM KCl dan es batu yang biasa digunakan oleh nelayan tradisional untuk menjaga kesegaran ikan saat dikirim ke pasar. Performa termal menunjukkan bahwa PCM KCl yang disimpan di dalam kantong aluminium mampu menurunkan temperatur ruang kotak yang mulai stabil pada -2,8 °C, temperatur kotak meningkat perlahan mencapai 2,1 °C setelah 24 jam. Sementara es batu bekerja secara stabil pada temperatur 0 °C lebih tinggi dibanding temperatur KCl. Uji Kesegaran ikan dilihat dari hasil uji organoleptik, dan menunjukkan bahwa PCM KCl bekerja lebih baik dalam menjaga kesegaran ikan dibanding penggunaan es batu sebagai sistem pendingin ikan.

Pada penelitian ini diuji efektivitas PCM KCl/H<sub>2</sub>O sebagai sistem pendingin ikan laut pasca tangkapan baik dari segi teknis maupun ekonomi. Kotak penyimpanan ikan yang digunakan jenis *styrofoam* dan PCM KCl(19,5%)/H<sub>2</sub>O sebagai sistem pendingin. Perubahan temperatur setiap waktu pada PCM KCl/H<sub>2</sub>O dan ikan diamati menggunakan sensor temperatur DS18B20.

## II. METODE

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Fisika Material, Departemen Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Andalas. PCM yang digunakan yaitu KCl/H<sub>2</sub>O yang dibuat dengan cara melarutkan 19,5% massa KCl ke dalam 80,5% H<sub>2</sub>O. Selanjutnya massa larutan KCl/H<sub>2</sub>O divariasikan pada tiap pengujian yaitu 0,5 kg, 1 kg, 2 kg, dan 3 kg. Ikan laut yang dijadikan objek penelitian yaitu 1 kg ikan Kuwe (4 ekor ikan dengan ukuran seragam). Kotak penyimpanan ikan yang digunakan berbahan *styrofoam* dengan ukuran 40×26,5×15 cm<sup>3</sup> dengan ketebalan 2 cm. Perubahan temperatur tiap waktu diukur menggunakan sensor temperatur DS18B20.

### 2.1 Pengujian Karakteristik Termal PCM KCl/H<sub>2</sub>O

Larutan 0,5 kg KCl/H<sub>2</sub>O beserta sensor temperatur DS18B20 dimasukkan ke dalam wadah plastik bening. Selanjutnya larutan dibekukan dalam freezer selama ± 24 jam hingga seluruh larutan berubah menjadi beku (lepasan kalor), selama proses pembekuan perubahan temperatur PCM KCl/H<sub>2</sub>O diamati. Selanjutnya proses pembekuan larutan KCl/H<sub>2</sub>O dengan variasi massa 1 kg, 2 kg, dan 3 kg dilakukan dengan cara yang sama.

PCM KCl/H<sub>2</sub>O yang sudah beku dipindahkan ke dalam kotak *styrofoam*. Selanjutnya PCM KCl/H<sub>2</sub>O dibiarkan melebur (serapan kalor) secara alami hingga fase PCM KCl/H<sub>2</sub>O seluruhnya

berubah menjadi cairan selama ± 24 jam. Perubahan temperatur PCM KCl/H<sub>2</sub>O selama proses peleburan diamati.

## 2.2 Pengujian Efektivitas KCl/H<sub>2</sub>O sebagai Sistem Pendingin Ikan

PCM KCl/H<sub>2</sub>O sebanyak 0,5 kg dibagi dalam tiga wadah plastik dan sensor temperatur DS18B20 juga dimasukkan ke dalam wadah tersebut. PCM KCl/H<sub>2</sub>O dibekukan dalam *freezer* selama ± 24 jam. Empat ekor ikan Kuwe segar disiapkan dengan massa total 1 kg. Selanjutnya PCM yang sudah beku beserta ikan kuwe dimasukkan ke dalam kotak styrofoam dengan susunan PCM, 2 ekor ikan, PCM, 2 ekor ikan, dan PCM seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 1.



**Gambar 1** Susunan ikan dan PCM KCl/H<sub>2</sub>O dalam kotak *styrofoam*

Kotak ditutup rapat untuk mengurangi pengaruh temperatur lingkungan. Selama pengujian efektivitas KCl/H<sub>2</sub>O, perubahan temperatur PCM KCl/H<sub>2</sub>O, ikan Kuwe, dan ruangan kotak *styrofoam* diamati. Penelitian dilakukan kembali dengan cara yang sama untuk perbandingan massa ikan banding massa PCM yaitu 1:1; 1:2; dan 1:3.

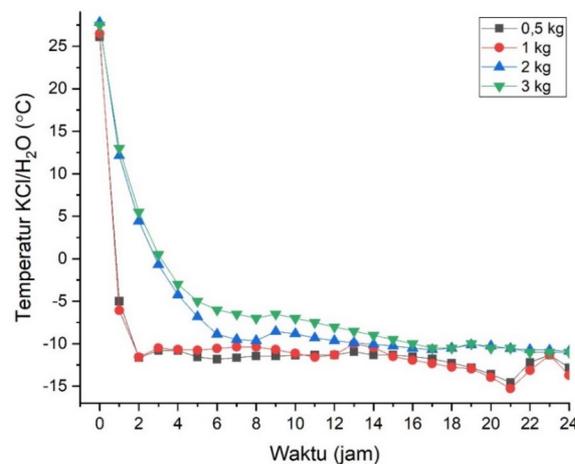
Efektivitas KCl/H<sub>2</sub>O sebagai sistem pendingin ikan Kuwe secara teknis dikelompokkan dalam dua aspek, yaitu kemampuan dalam menurunkan temperatur ikan dan kemampuan dalam mempertahankan temperatur ikan pada temperatur penyimpanan yang direkomendasikan. Efektivitas KCl/H<sub>2</sub>O dalam menurunkan temperatur ikan ditinjau dari kemampuan PCM dalam menurunkan temperatur ikan ( $\Delta T$ ) tiap menit ( $\Delta t$ ). Dari definisi ini, maka dapat dibuat persamaan efektivitas KCl/H<sub>2</sub>O dalam menurunkan temperatur ikan seperti yang ditunjukkan pada Persamaan (1) berikut.

$$Efektivitas = \frac{\Delta T_{ikan} (^{\circ}C)}{\Delta t (menit)} \quad (1)$$

## III. HASIL DAN DISKUSI

### 3.1 Karakteristik Termal PCM KCl/H<sub>2</sub>O

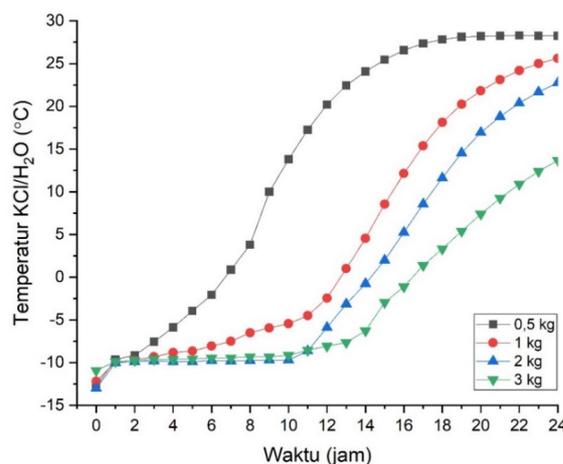
Pada temperatur ruang, KCl/H<sub>2</sub>O dalam bentuk fase cair sehingga diperlukan proses pendinginan atau pelepasan kalor agar KCl/H<sub>2</sub>O membeku yaitu pada temperatur lebur -10,7 °C. Karakteristik termal KCl/H<sub>2</sub>O dapat diamati dari perubahan temperatur terhadap waktu selama proses pembekuan yang dapat dilihat pada Gambar 2.



**Gambar 2** Grafik perubahan temperatur terhadap waktu selama proses pembekuan KCl/H<sub>2</sub>O

Dari Gambar 2 dapat dilihat bahwa 0,5 kg dan 1 kg KCl/H<sub>2</sub>O memiliki karakteristik pembekuan yang hampir sama. KCl/H<sub>2</sub>O yang semula berada pada fase cair dalam temperatur ruang dimasukkan ke dalam *freezer* sehingga nilai temperatur turun menuju temperatur lebur (pelepasan panas sensibel) selama  $\pm 2$  jam. Perubahan fase 0,5 kg dan 1 kg KCl/H<sub>2</sub>O dari cair ke padat berlangsung masing-masing selama  $\pm 14$  jam dan  $\pm 16$  jam yang ditandai oleh perubahan temperatur yang cenderung konstan. Nilai rata-rata temperatur pembekuan 0,5 kg dan 1 kg KCl/H<sub>2</sub>O secara eksperimen masing-masing yaitu -11,37 °C dan -10,89 °C. Nilai ini sudah cukup mendekati nilai temperatur lebur KCl/H<sub>2</sub>O secara literatur yaitu -10,7 °C (Mehling, 2008), dengan kata lain sistem yang bekerja cukup stabil. Selanjutnya temperatur mulai turun di bawah temperatur lebur yang mengindikasikan panas sensibel kembali bekerja pada KCl/H<sub>2</sub>O.

Proses pembekuan 2 kg dan 3 kg KCl/H<sub>2</sub>O juga menunjukkan karakteristik termal yang hampir serupa, dimana untuk menurunkan temperatur KCl/H<sub>2</sub>O agar menuju temperatur lebur dibutuhkan waktu berturut-turut 16 jam dan 17 jam. Waktu ini jauh lebih lama dibandingkan waktu yang dibutuhkan 0,5 kg dan 1 kg KCl/H<sub>2</sub>O agar temperaturnya turun menuju temperatur lebur. Hal ini disebabkan karena semakin banyak massa sistem yang digunakan maka semakin besar energi kalor yang harus dilepaskan atau diserap agar sistem dapat berubah fase (Pitzer, 1995). Nilai temperatur peleburan rata-rata 2 kg dan 3 kg KCl/H<sub>2</sub>O berdasarkan Gambar 2 yaitu -10,52 °C. Nilai ini sudah cukup mendekati nilai temperatur lebur KCl/H<sub>2</sub>O secara literatur yaitu -10,7 °C (Mehling, 2008). Semakin banyak jumlah massa KCl/H<sub>2</sub>O maka semakin lama waktu yang dibutuhkan material untuk berubah fase dari padat ke cair. Grafik perubahan temperatur setiap waktu pada proses peleburan KCl/H<sub>2</sub>O dapat dilihat pada Gambar 3.



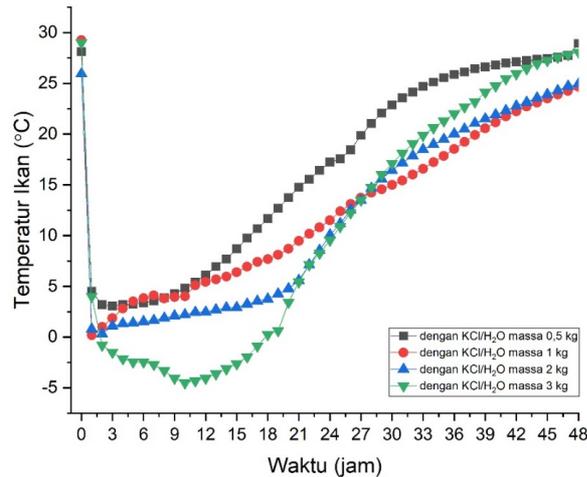
**Gambar 3** Grafik perubahan temperatur terhadap waktu dalam proses peleburan KCl/H<sub>2</sub>O

Pada proses peleburan empat variasi massa KCl/H<sub>2</sub>O menunjukkan nilai temperatur lebur rata-rata yaitu -9,86 °C. Nilai ini tidak sesuai dengan nilai temperatur lebur 19,5% KCl/H<sub>2</sub>O secara literatur yaitu -10,7 °C. Hal ini dapat disebabkan karena adanya kebocoran termal dari kotak *styrofoam* saat pengukuran berlangsung. Semakin banyak KCl/H<sub>2</sub>O yang digunakan maka semakin banyak kalor laten yang dibutuhkan untuk berubah fase dari padat ke cair, sehingga durasi waktu latennya juga semakin lama.

### 3.2 Efektivitas KCl/H<sub>2</sub>O sebagai Sistem Pendingin Ikan

#### 3.2.1 Efektivitas dari segi teknis

Karakteristik termal KCl/H<sub>2</sub>O sebagai sistem pendingin ikan Kuwe diamati berdasarkan perubahan temperatur ikan dan KCl/H<sub>2</sub>O yang dimasukkan ke dalam kotak penyimpanan ikan (*styrofoam*) selama 48 jam. Adapun hasil yang diperoleh ditunjukkan oleh Gambar 4.



**Gambar 4** Grafik perubahan temperatur terhadap waktu dalam proses pendinginan ikan oleh KCl/H<sub>2</sub>O

Dari Gambar 4 efektivitas KCl/H<sub>2</sub>O sebagai sistem pendingin ikan Kuwe secara teknis dikelompokkan dalam dua aspek, yaitu kemampuan dalam menurunkan temperatur ikan dan kemampuan dalam mempertahankan temperatur ikan pada temperatur penyimpanan yang direkomendasikan.

Efektivitas KCl/H<sub>2</sub>O dalam menurunkan temperatur ikan dapat ditinjau oleh Persamaan (1) dan dinyatakan pada Tabel 2.

**Tabel 2** Efektivitas KCl/H<sub>2</sub>O dalam menurunkan temperatur 1 kg ikan Kuwe

Massa KCl/H <sub>2</sub> O (kg)	Temperatur Ikan (°C)			Δt (menit)	Efektivitas (°C/menit)
	T <sub>awal</sub>	T <sub>akhir</sub>	Δt (T <sub>awal</sub> - T <sub>akhir</sub> )		
0,5	28,12	3,19	-24,93	120	-0,20
1	29,26	1,01	-28,25	120	-0,23
2	30,87	1,63	-29,24	120	-0,24
3	29	-0,8	-29,8	120	-0,24

Secara umum, variasi massa KCl/H<sub>2</sub>O tidak signifikan mempengaruhi nilai efektivitas KCl/H<sub>2</sub>O dalam menurunkan temperatur ikan. Hal ini bisa dilihat dari nilai efektivitas pada tiap variasi massa berkisar antara -0,20 hingga -0,24 °C. Nilai ini mengindikasikan bahwa KCl/H<sub>2</sub>O efektif menurunkan temperatur ikan sebesar -0,24 °C/menit.

Menurut Diyantoro (2007) penyimpanan ikan pada temperatur 5 °C dapat menjaga mutu ikan hingga 6 hari, ikan yang disimpan pada temperatur 0 °C dapat menjaga mutu ikan hingga 14 hari. Ikan yang disimpan pada temperatur -1 hingga -2 °C dapat menjaga mutu ikan selama 20 hari. Berdasarkan informasi ini, maka efektivitas KCl/H<sub>2</sub>O dalam mempertahankan temperatur ikan dikaji dari durasi waktu penyimpanan yang dibagi dalam dua rentang data yaitu -5 hingga 0 °C dan 0 hingga 5 °C. Efektivitas KCl/H<sub>2</sub>O dalam mempertahankan temperatur ikan dinyatakan pada Tabel 3.

**Tabel 3** Efektivitas KCl/H<sub>2</sub>O dalam mempertahankan temperatur 1 kg ikan Kuwe

Massa KCl/H <sub>2</sub> O (kg)	Rentang Temperatur		Durasi Waktu dalam Mempertahankan Temperatur Ikan (jam)
	T <sub>awal</sub>	T <sub>akhir</sub>	
0,5	-5	0	-
	0	5	10
1	-5	0	-
	0	5	10
2	-5	0	-
	0	5	20
3	-5	0	16
	0	5	3

Tabel 3 menyatakan bahwa pada variasi massa KCl/H<sub>2</sub>O 0,5 kg, 1 kg, dan 2 kg belum dapat menjaga temperatur ikan dalam rentang temperatur -5 hingga 0 °C, sementara penggunaan 3 kg KCl/H<sub>2</sub>O dapat mempertahankan temperatur ikan pada rentang temperatur tersebut selama 16 jam. Pada rentang temperatur 0 hingga 5 °C, variasi massa KCl/H<sub>2</sub>O 0,5 kg dan 1 kg dapat mempertahankan temperatur ikan selama 10 jam, variasi massa 2 kg KCl/H<sub>2</sub>O dapat mempertahankan temperatur ikan selama 20 jam, sementara variasi massa 3 kg KCl/H<sub>2</sub>O dapat mempertahankan temperatur ikan selama 3 jam. Berdasarkan data tersebut dapat disimpulkan bahwa penggunaan 2 kg KCl/H<sub>2</sub>O lebih baik dalam mempertahankan temperatur ikan pada rentang temperatur 0 hingga 5 °C, sementara penggunaan 3 kg KCl/H<sub>2</sub>O paling baik dalam mempertahankan temperatur ikan dalam rentang temperatur lebih rendah yaitu -5 hingga 0 °C.

### 3.2.2 Efektivitas dari segi ekonomi

Efektivitas KCl/H<sub>2</sub>O sebagai sistem pendingin ikan juga dikaji secara ekonomi, yaitu dari segi biaya yang harus dikeluarkan oleh nelayan dalam penyimpanan ikan pasca tangkap. KCl/H<sub>2</sub>O dibuat dengan cara melarutkan 19,5% massa KCl ke dalam 80,5% air (aquades/ air pdam/ air sumur/ air tanah). KCl berbentuk serbuk dapat dibeli dari toko kimia ataupun pasar *online* dengan harga rata-rata Rp25.000,00/kg. Satu kg KCl bisa menghasilkan sebanyak 5,13 kg larutan KCl/H<sub>2</sub>O, sehingga biaya untuk memperoleh 1 kg KCl/H<sub>2</sub>O sekitar Rp5.000,00. Jika dianalogikan dengan penggunaan es batu yang terbuat dari air biasa sebagai sistem pendingin ikan, biasanya 1 kg es batu dijual dengan harga Rp1.000,00. Dari harga es batu ini, maka dapat ditaksir harga KCl/H<sub>2</sub>O dalam bentuk es (beku) setidaknya dijual dengan harga Rp6.000,00. Harga KCl/H<sub>2</sub>O beku ini enam kali lebih mahal dibandingkan harga es batu, sehingga biaya dalam pendinginan ikan akan meningkat enam kali lebih besar dibanding penggunaan es batu sebagai sistem pendingin ikan konvensional. Oleh karena itu, secara ekonomi penggunaan KCl/H<sub>2</sub>O sebagai sistem pendingin ikan kurang direkomendasikan. Namun tingginya biaya penggunaan KCl/H<sub>2</sub>O sebagai sistem pendingin ikan dapat diantisipasi dengan penggunaan KCl/H<sub>2</sub>O secara berulang.

## IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian maka dapat disimpulkan bahwa, pada proses pembekuan setiap variasi massa KCl/H<sub>2</sub>O diperoleh nilai rata-rata pembekuan yaitu -10,92 °C, nilai tersebut sudah mendekati nilai temperatur beku KCl/H<sub>2</sub>O secara literatur yaitu -10,7 °C. Pada proses peleburan, empat variasi massa KCl/H<sub>2</sub>O menunjukkan nilai temperatur lebur rata-rata yaitu -9,86 °C lebih rendah dibandingkan nilai temperatur lebur literatur yaitu -10,7 °C. Variasi massa PCM tidak signifikan mempengaruhi nilai efektivitas KCl/H<sub>2</sub>O dalam menurunkan temperatur ikan. Nilai efektivitas rata-rata dari ke empat variasi massa KCl/H<sub>2</sub>O dalam menurunkan temperatur ikan Kuwe yaitu -0,22 °C/menit. Penggunaan 2 kg KCl/H<sub>2</sub>O efektif dalam mempertahankan temperatur ikan Kuwe pada rentang temperatur 0 hingga 5 °C selama 20 jam, sementara penggunaan 3 kg KCl/H<sub>2</sub>O efektif dalam mempertahankan temperatur ikan dalam rentang temperatur lebih rendah yaitu -5 hingga 0 °C selama 16 jam. Dari segi ekonomi, biaya penanganan proses pendinginan ikan menggunakan KCl/H<sub>2</sub>O enam kali lebih besar dibandingkan pendinginan konvensional, sehingga sistem ini kurang direkomendasikan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih atas dana hibah “Riset Publikasi Terindeks (RPT) Universitas Andalas Tahun 2022” dengan nomor kontrak: T/165/UN.16.17/PT.01.03/PRK-RPT/2022, sehingga riset ini bisa terlaksana.

## DAFTAR PUSTAKA

- Diyantoro. (2007). Pengaruh Lama Penyimpanan yang Berbeda dalam Campuran Air Laut dan Es terhadap Kemunduran Mutu Kesegaran Ikan Nila. Dalam *Skripsi*.
- Gao, C. (2004). Phase-change materials (PCMs) for warming or cooling in protective clothing. In *Protective Clothing* (pp. 227-249). Woodhead Publishing.

- Hu, C., Wang, Z., Bo, R., Li, C., & Meng, X. (2023). Effect of the cooling clothing integrating with phase change material on the thermal comfort of healthcare workers with personal protective equipment during the COVID-19. *Case Studies in Thermal Engineering*, 42, 102725.
- Iskandar, S. H., Cofré-Toledo, J., Cataño, F. A., Ortega-Aguilera, R., & Vasco, D. A. (2023). Experimental study of the unconstrained melting of a phase change material for air-conditioning applications: Étude expérimentale de la fusion sans restriction d'un matériau à changement de phase pour les applications de climatization. *International Journal of Refrigeration*.
- Ismail, M., Zahra, W. K., Ookawara, S., & Hassan, H. (2022). Boosting the air conditioning unit performance using phase change material: Impact of system configuration. *Journal of Energy Storage*, 56, 105864.
- Jeong, S. G., Heo, J. E., Choi, S. Y., & Kim, S. (2023). Heating efficiency enhanced by combination of phase change materials and activated carbon for dry floor heating system. *Journal of Energy Storage*, 70, 108027.
- Kong, X., Zhang, C., Guo, L., & Ren, J. (2022). Operation optimization of a solar collector integrated with phase change material storage heating system. *Energy and Buildings*, 275, 112440.
- Mehling, H., & Cabeza, L. F. (2008). Heat and cold storage with PCM. *Heat and mass transfer*, 11-55.
- Pitzer, K.S. (1995). *Thermodynamics*. Third Edition. Singapore: McGraw-Hill.
- Pudjiastuti, W., Listyarini, A., & Riyanto, A. (2015). Application Of Phase Change Materials (PCM's) To Preserve The Freshness Of Seafood Products. *Jurnal Kimia dan Kemasan*, 37(1), 61-66.
- Sarkar, S., Mestry, S., & Mhaske, S. T. (2022). Developments in phase change material (PCM) doped energy efficient polyurethane (PU) foam for perishable food cold-storage applications: A review. *Journal of Energy Storage*, 50, 104620.
- Sharma, R. K., Yagnamurthy, S., & Rakshit, D. (2022). Energy analysis of a phase change material embedded heat exchanger for air conditioning load reduction in different Indian climatic zones. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 53, 102776.
- Siddique, A. R. M., Bozorgi, M., Venkateshwar, K., Tasnim, S., & Mahmud, S. (2023). Phase change material-enhanced solid-state thermoelectric cooling technology for food refrigeration and storage applications. *Journal of Energy Storage*, 60, 106569.
- Sukoco, R. K., Indartono, Y. S., & Mujahidin, D. (2021). Eutectic potassium chloride (KCl) solution as phase change material (PCM) for fish cold storage. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 1109, No. 1, p. 012062). IOP Publishing.
- Tas, C. E., & Unal, H. (2021). Thermally buffering polyethylene/halloysite/phase change material nanocomposite packaging films for cold storage of foods. *Journal of Food Engineering*, 292, 110351.
- Taufiqurrahman. (2016). Analisa Kinerja Phase Change Material Organik sebagai Pendingin Alternatif Cold Storage. Dalam *Skripsi*.
- Wan, X., & Wang, F. (2018). Numerical analysis of cooling effect of hybrid cooling clothing incorporated with phase change material (PCM) packs and air ventilation fans. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 126, 636-648.
- Wang, F., Pang, D., Liu, X., Liu, M., Du, W., Zhang, Y., & Cheng, X. (2023). Progress in application of phase-change materials to cooling clothing. *Journal of Energy Storage*, 60, 106606.
- Xu, T., Zhang, J., Fan, G., Zou, T., Hu, H., Du, Y., Yang, Y. Li, H., & Huang, P. (2023). Hydrate salt/fumed silica shape-stabilized composite phase change material with adjustable phase change temperature for radiant floor heating system. *Journal of Building Engineering*, 71, 106400.