

Polyethylene glycol과 1,4-Butanediol을 활용한 이원 공융혼합 PCM의 열적 특성에 관한 연구

박주영 · 박기태 · 서종철*
연세대학교 패키징 및 물류학과

A Study on the Thermal Properties of Binary Eutectic Mixed PCM Using Polyethylene Glycol and 1,4-Butanediol

Jooyoung Park, Kitae Park, Jongchul Seo*

Department of Packaging & Logistics, Yonsei University, 1 Yonseidae-gil, Wonju, Gangwon-do, 26493, South Korea

Abstract Current cold chain logistics relying on organic or eutectic materials within the 2~8°C range as secondary fluids often face limitations in heat storage capacity, necessitating high energy consumption and large volume capacity. An effective approach to address this challenge is by incorporating polymers to enhance the heat storage capacity of eutectic materials. In this study, we investigated the impact of polyethylene glycols (PEGs) on phase change materials using Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR), differential scanning calorimeter (DSC), analyses of endothermic and exothermic phase change processes, and an accelerated thermal cycling test. Our findings indicate that the introduction of PEGs into the phase change materials can lead to improvements in latent heat, thermal conductivity, and 2~8°C retention time. This enhancement is attributed to the high latent heat and thermal conductivity of the polymer, along with its ability to inhibit crystal formation in the eutectic mixture.

Keywords Phase change materials, Eutectic mixture, Cold chain, Polyethylene glycol, Reuseable, Temperature duration

서 론

상변화물질 (Phase change materials, PCM)은 특정 온도 구간에서 흡열 또는 발열반응에 의해 물질의 상이 변화하는 동안 일정한 온도를 유지하는 특성을 나타낸다. 이러한 특성의 PCM은 일정한 온도에서의 보관을 필요로 하는 제품의 콜드체인에서 온도유지 물질로 널리 사용되고 있다. 특히, 식품, 농산물, 백신을 포함한 의약품 등 온도에 민감한 제품일수록 PCM의 온도유지 특성은 매우 중요하다.^{1,2)} 보관 제품별 요구되는 상변화온도에 따른 PCM은 상이하며, 폐기물 감축을 위한 재사용성도 중요시되고 있다. Table 1에 나타난 바와 같이 콜드체인에서 사용하는 온도는 제품의 종류에 따라 -20°C에서 60°C로 매우 다양한 것을 알 수 있다.

이러한 다양한 온도에 대응하는 PCM은 에너지 효율성을 증진하기 위해 최적의 상변화 온도와 높은 온도 유지시간이 필요하다. 기존 PCM은 단일물질 또는 2종 이상의 물질이 혼합된 공융혼합물(Eutectic mixture)이 적용되고 있다. Table 2는 현재 사용되는 단일물질 PCM의 예시를 보여준다. 단일물질 PCM은 안정적인 온도 유지가 가능하지만, 물질 자체의 고정된 상변화 온도로 사용 온도가 제한된다. 그러므로, 상변화 온도를 조절할 수 있는 공융혼합물 PCM의 사용에 대한 관심이 높아지고 있다. 공융혼합물은 두 성분이 고용체를 만들지 않고 액체 상태에서 완전히 섞여 단일 상태로 전환되는 공융비율의 혼합물을 의미한다. 이는 두 성분의 혼합비를 변경하여 상변화 온도를 조절할 수 있어 단일물질 PCM을 대체하는데 많은 관심을 받고 있다.

다양한 상변화 온도 범위에서, 특히 COVID-19의 영향으로 의약품의 보관 및 유통 중 온도 유지(2~8°C)가 중요시되고 있다. 온도 유지가 되지 않을 경우 의료적 문제가 발생하거나 폐기 처리를 해야 하기 때문에 의약품 운송 시 정확한 온도의 유지관리가 필수적이다. 현재 2~8°C를 유지하기 위해 Tetradecane이 널리 사용되고 있다. 하지만, 단

*Corresponding Author: Jongchul Seo
Yonsei University, Department of Packaging & Logistics, 1 Yonseidae-gil, Gangwon-do 26493, South Korea
Tel: +82-33-760-2697, Fax: +82-33-760-2954
E-mail: jseo@yonsei.ac.kr

Table 1. Products categorized by temperature range in cold chain logistics

Product	Frozen food	Refrigerated food	Medicine	Processed food	Warm food
Temperature (°C)	-18	0~10	2~8	10	60

Table 2. Thermal properties of various PCMs for cold chain logistics

Materials	Di-Water	Tetradecane	1-Decanol	Pentadecane	Hexadecane
Phase change temperature (°C)	0	5	7	15	18
Latent heat (J/g)	300	146	78	168	236

Table 3. Thermal properties of various eutectic materials working at the range of 2~8°C

Materials (Mass fraction)	Phase change temperature (°C)	Latent heat (J/g)
Octanoic acid/tetradecane (48:52)	2.03	210.94
Decyl alcohol/myristyl alcohol (87:13)	3.77	178.2
Octanoic acid/laucic acid (81:19)	3.8	141.7
Tetradecane/lauryl alcohol (66:34)	4.3	247.1
Tetradecane/tetradecanol (96:4)	5.5	206.4
Lauryl alcohol/caprylic acid (40:60)	6.2	173.2
Caprylic acid/palmitic acid (40:60)	6.54	116.5

일물질의 제한된 열 용량으로 인해 열 용량을 증가시킬 수 있는 공용혼합물에 대한 연구가 필요하다. Table 3은 정확한 온도 관리를 위한 2~8°C 범위의 공용혼합물에 대한 선행 연구이다. 이전의 연구들은 주로 유기물을 사용하여 공용점 온도를 조절하였다. 반면, 공용혼합물은 사용된 물질의 잠열보다 높은 잠열값을 가질 수 없다. 따라서, 단일물질의 낮은 열 저장 능력 문제를 해결하기 위한 새로운 연구가 시도 되어야한다. 고분자 물질은 타 유기물에 비해 높은 분자량으로 인해 높은 잠열을 나타낸다. 그러나 유기물과 고분자 물질을 사용한 PCM 혼합물에 대한 선행연구가 없으므로, 본 연구에서는 고분자 물질을 사용하여 녹는점이 2~8°C 범위를 가지는 높은 열 저장 능력과 재사용성을 가지는 공용혼합물을 제조하는 방법을 제안하고자 한다. 유기물로는 1,4-butanediol (BDO), 고분자 물질은 polyethylene glycol(PEG)가 사용되었으며 혼합물의 화학적, 형태학적, 열적 특성, 재사용성을 기존 사용되고 있는 Tetradecane과 비교 분석하였다.³⁾

재료 및 방법

1. 실험재료

본 연구에서 사용된 polyethylene glycol 600 (PEG600) (HO-(CH₂CH₂OH)_n-H)는 Sigma Aldrich Co.(USA)에서 구매하였으며 중량평균 분자량 (600 g/mol)을 사용하였다. 1,4-butanediol (BDO), tetradecane은 대정화금(Duksan Pure Chemicals Co., Ltd., Ansan, South Korea)에서 구매하였다.

2. PEG-Butanediol 혼합물 제조

정밀 전자 저울(AL204, Mettler Toledo, USA)을 사용하여 PEG600-BDO의 각 물질 비율대로 100g을 제조하였다.

균일한 혼합을 위해 샘플이 들어 있는 비커를 자기 교반기에 놓고 가열 온도를 60°C로 설정하여 20분 동안 교반 하였다. 그 후 혼합물을 상온까지 자연적으로 냉각하여 PEG600-BDO의 다양한 혼합비의 PCM 혼합액을 얻었다.

3. 실험 방법

제조된 PEG600-BDO 공용혼합물의 화학적 결합 또는 상호작용 특성은 푸리에변환적외선분광법(FT-IR, Perkin-Elmer, Waltham, MA, USA)를 사용하여 측정하였다. 4000-400 cm⁻¹에서 Attenuated total reflection(ATR) 방식으로 측정하였으며, 이때 FT-IR은 4 cm⁻¹로 분해되어 32 scan으로 기록하였다. PEG600-BDO 공용혼합물의 동결 결정형상 및 결정화도를 측정하기 위해 실시간 X선 회절 분석기(In-situ X-ray Diffractometer, Empyrean, Malvern Paralytical, UK)를 사용하였다. 공용혼합물의 동결상태의 결정성 분석을 위해 실시간 X선 회절 분석 온도는 2 °C로 조절되었다. PEG600-BDO 공용혼합물의 열적 특성을 조사하기 위하여 공용혼합물의 녹는점, 용융 엔탈피, 재사용성 및 녹는점 유지 시간을 측정하였다. 공용혼합물의 녹는점 및 용융 엔탈피는 시차주사 열량계 (DSC, TA Instrument Q10, New Castle, USA)를 이용하여 측정하였다. 측정 온도 범위는 -30에서 30°C, 승온 온도 10°C/min 로 질소분위기 하에서 진행되었다. 공용혼합물의 재사용성은 DSC를 이용하여 동일한 조건 하에 100회 측정하여 결정되었다. 온도-시간 그래프는 온도계(Data logger, 176T4, Testo, Japan)를 사용하였으며, 외부 온도는 30°C로 유지하였다.⁴⁾

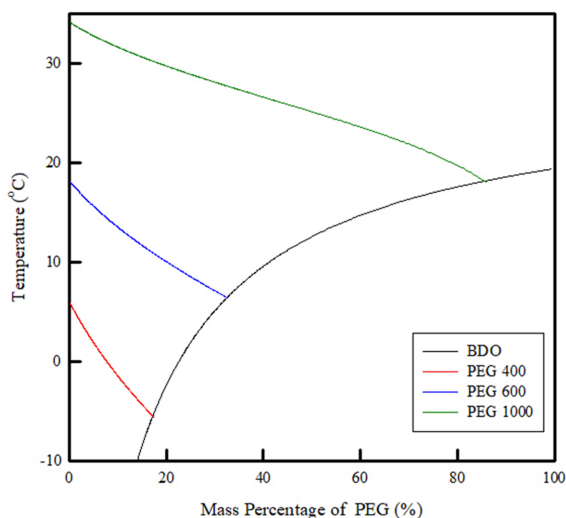
결과 및 고찰

PEG는 분자량에 따라 녹는점 및 잠열이 다르기 때문에,

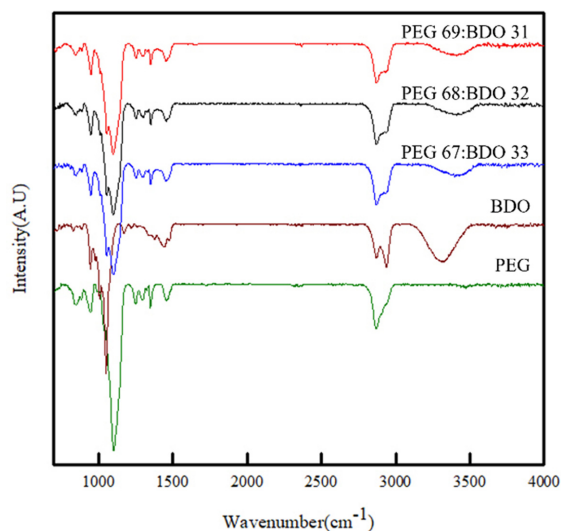
Table 4. Thermal properties of PEG600 and Butanediol

Materials	T_i (°C)	ΔH (J/g)	Molar mass (g/mol)
PEG400	5.8	117.3	400
PEG600	18.0	148	600
PEG1000	33.1	161.1	1000
Butanediol	19.25	158.0	90.12

필요한 온도 범위에 따라 PEG 분자량을 선택적으로 적용할 수 있다. PEG 분자량 별 이원 공융 시스템의 이론적인 상평형도 (phase diagram)는 식 (1)과 (2)를 통해 도출되었다. 다음 식에서 T_m 은 공융혼합물의 공융점, T_i 는 각 성분의 녹는점, X_i , H_i 는 각 성분의 몰분율과 용융 엔탈피, R 은 기체상수($8.315 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$)를 각각 나타낸다. 계산에 사용된 값은 Table 4에 표시하였다. 이 값과 식 (1)과 (2)를 이용하여 다양한 분자량을 갖는 PEG와 BDO 혼합물의 상평형도, 잠열, 공융온도 및 공융비율을 구하였으며, 그 결과를 Fig. 1과 Table 5에 나타내었다.⁵⁾ Fig. 1은 다양한 분자량의 PEG와 BDO의 상평형도를 통해 두 물질의 공융온도를 보여준다. 본 연구에서는 2~8°C 범위의 PCM을 개발하기 위해 6.2°C 공융온도를 가진 PEG600과 BDO 혼합물을 선택하였다. 공융혼합물의 혼합비율을 보다 명확하게 확보하기 위하여 PEG600-BDO 혼합물의 비율을 67:33, 68:32, 그리고 69:31로 조정하여 제조하였다.

**Fig. 1.** PEG-BDO eutectic mixture theoretical phase diagram.**Table 5.** Thermal properties of BDO and PEG with various MWs

Materials	Phase change temperature (°C)	Latent heat (J/g)	Mass ratio (%)
PEG400-BDO	-5.5	144.3	17:83
PEG600-BDO	6.2	146.7	68:32
PEG1000-BDO	18.1	149.3	85:15

**Fig. 2.** FT-IR spectra of PEG-BDO mixture.

$$\frac{1}{T_m} = \frac{1}{T_i} - \frac{R \ln X_i}{H_i} \quad (1)$$

$$X_a + X_b = 1 \quad (2)$$

FT-IR 분석을 통해 PEG600, BDO, 그리고 PEG600-BDO 혼합물에서의 분자 간 상호작용을 조사하였으며, 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. PEG600은 C-O bond ($1100\text{--}1200 \text{ cm}^{-1}$), C-H bond ($1300\text{--}1500, 2887 \text{ cm}^{-1}$)의 피크가,⁶⁾ BDO에서는 O-H bond ($3000\text{--}3500 \text{ cm}^{-1}$), $-\text{CH}_2-$ ($2800\text{--}3000 \text{ cm}^{-1}, 1150\text{--}1400 \text{ cm}^{-1}$)의 피크가 확인되었다.⁷⁾ PEG600-BDO에서는 PEG600, BDO에서 기인한 $-\text{CH}_2-$ ($2800\text{--}3000 \text{ cm}^{-1}, 1150\text{--}1400 \text{ cm}^{-1}$), C-O bond ($1100\text{--}1200 \text{ cm}^{-1}$), C-H bond ($1300\text{--}1500, 2887 \text{ cm}^{-1}$) 피크가 확인되었다. PEG600-BDO에서 O-H bond 피크는 순수 BDO의 O-H bond 피크보다 높은 파수대로 이동하였는데, 이는 BDO의 OH기와 PEG600의 Ether기가 수소결합을 형성하며 고정되는 효과 때문으로 사료된다.⁸⁾ 이러한 FT-IR 결과는 PEG600-BDO에 새로운 화학적 변화가 일어나 안정성이 높아짐을 의미한다.⁹⁾

PCM의 결정화 특성은 외부 열을 효과적으로 처리할 수 있는 능력을 나타내며, 결정화 및 용해 반응으로 인해 발생하는 흡열 및 발열반응과 밀접한 관련이 있다.¹⁰⁾ 높은 결정성을 갖는 물질은 더 높은 열 용량을 가지며, 이는 PCM

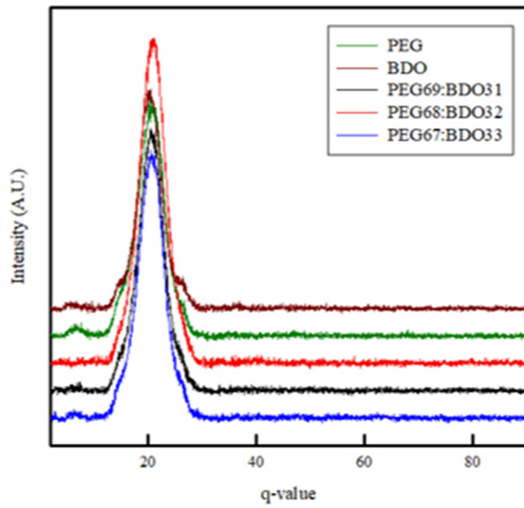


Fig. 3. XRD of PEG-BDO mixture.

이 열에너지를 효과적으로 저장하고 방출할 수 있음을 나타낸다. PEG600, BDO, 및 PEG600-BDO 혼합물의 결정성을 확인하기 위해 XRD분석을 하였으며 Fig. 3에 나타내었다. PEG600, BDO, 그리고 PEG600-BDO 혼합물은 모두 23°에서 결정 피크가 관찰되었으며, PEG600(68)-BDO(32) 혼합물에서 가장 강한 피크가 관찰되었다. 이러한 결과는 PEG600과 BDO의 혼합이 결정 형태에 큰 영향을 미치지 않음을 시사한다. 피크 강도의 차이는 PEG600(68)-BDO(32) 혼합물의 결정화도가 증가했음을 나타내며, PEG600(68)-BDO(32) 결정들의 규칙적인 배열로 높은 열용량을 가질 수 있음을 의미한다.¹¹⁾

DSC를 사용하여 테트라데케인 및 PEG600-BDO 혼합물의 비율에 따른 용융온도와 잠열값 분석 결과를 Fig. 4와 Table 6에 나타내었다. 모든 샘플의 용융온도는 이론적 값인 테트라데케인 5°C 및 PEG600-BDO 혼합물 6.2°C 보다 높게 나타났다.¹²⁾ 이는 DSC가 15°C 미만의 온도에서 결정사이 액체층에서 발생하는 흡열을 감지하지 못하여, 용융온도가 높게 측정되었을 수 있다.^{13,14)} 테트라데케인 대비 PEG600-BDO혼합물의 Onset과 Offset값은 큰 차이를 나타냈다. 이는 고분자 물질의 분자량 분포로 인한 것으로, 상대적으로 낮은 분자량의 PEG가 저온에서 먼저 녹기 시작하고, 높은 분자량의 PEG가 고온에서 녹아 차이가 발생한

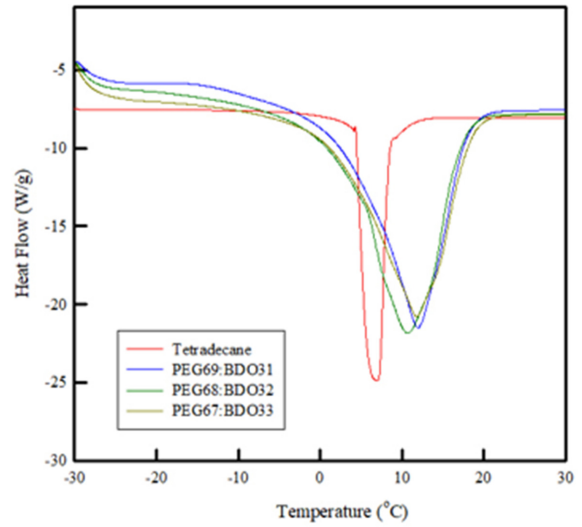


Fig. 4. DSC heating curves of PEG600-BDO mixture and tetradecane.

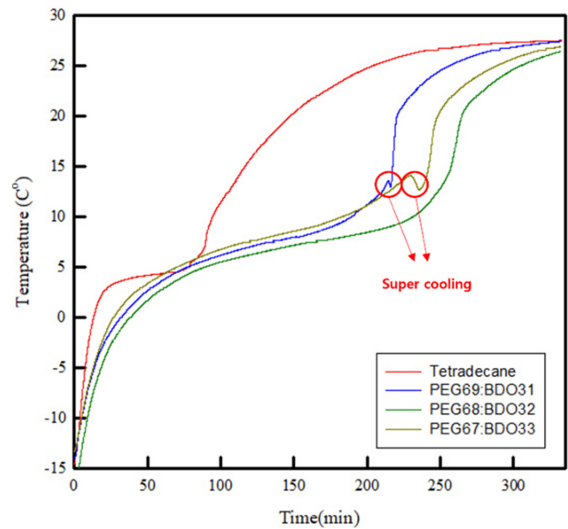


Fig. 5. Temperature-time curves for Tetradecane and PEG-BDO mixture.

것으로 사료된다. 다양한 함량의 PEG600-BDO 혼합물 간의 열 용량이 다르게 나타나는 경향을 보였는데, 이는 공융점을 이루지 못해 고체와 액체가 공존하는 현상으로 인해 발생한다. 그렇지만 결과적으로, PEG600-BDO 혼합물의 잠

Table 6. Thermal properties of PEG600-BDO mixtures and tetradecane

Sample	Tetradecane	PEG(67)-BDO(33)	PEG(68)-BDO(32)	PEG(69)-BDO(31)
Temperature retention time (min)	60	100	152	100
Onset point (°C)	6.1	1.7	1.15	3.2
Offset point (°C)	8.4	17.0	16.5	17.8
Melting point	7.8	11.9	10.7	11.8
Latent heat (J/g)	146.0	166.0	174.2	172.4

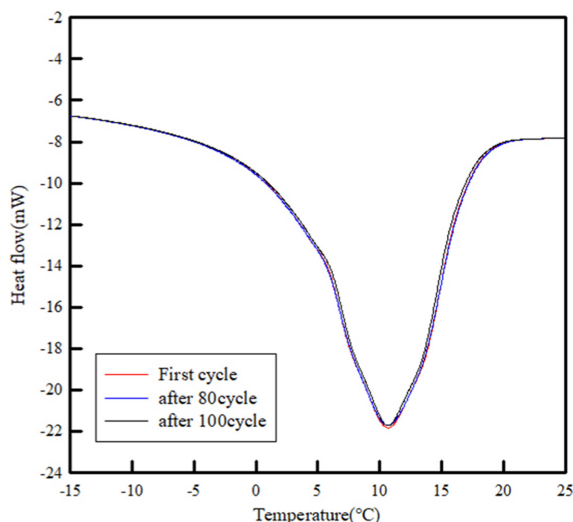


Fig. 6. Thermal cycling test of the PEG(68)-BDO(32) eutectic mixture.

열값은 테트라데케인에 비해 높은 값을 나타내는 것을 확인하였다.

기존 2~8°C PCM과 비교 평가를 위해 테트라데케인과 다양한 함량의 PEG600-BDO 혼합물의 온도 지속 시간을 측정하였다. 물질은 24시간 동결 후, 해동하며 온도 지속 시간을 측정하였으며, 그 결과를 Fig. 5와 Table 6에 나타내었다. 테트라데케인은 2~8°C에서 약 60분의 온도 지속 시간을 보여주었으나, PEG600-BDO 혼합물은 100분 이상의 긴 온도 지속시간을 보였다. PEG600-BDO의 온도 지속시간 증가는 고분자의 용액 내 분산으로 인한 결정화 과정이 지연되고, 동결 및 해동에 필요한 에너지가 증가하기 때문이다.^{15,16} 특히, PEG600-BDO 혼합물은 상변화 구간(0~12°C)에서 온도가 점차 증가하는 경향을 보였는데, 이는 PEG600의 분자량분포로 인한 것으로 해석된다.¹⁷ 이는 DSC에서도 Onset과 Offset의 차이로 나타났다.

한편, PEG600(67)-BDO(33)과 PEG600(69)-BDO(31) 혼합물은 과냉각현상(supercooling)이 관찰되었다. 이는 비공융점으로 고체와 액체의 공존과 PEG의 높은 열 제거율로 인해 발생할 수 있는 에너지 비효율적인 현상이다.¹⁸ 그러나, PEG600(68)-BDO(32)에서 두 물질이 과냉각 없는 상평형을 이루며 가장 긴 온도 지속시간을 나타냄으로 최적의 공융점의 조성물이라고 볼 수 있다. 반면, 공융점이 아닌 PEG600(67)-BDO(33)과 PEG600(69)-BDO(31)의 경우 고분자 물질 사용으로 2~8°C 온도 지속시간은 증가하지만, 온도유지의 불안전성 및 과냉각 현상이 발생하여 에너지 효율성이 떨어질 수 있다. 이러한 문제는 실제 적용에 어려움을 초래할 수 있으므로 고분자 물질의 분자량 분포에 따른 영향을 최소화하는 추가적인 연구가 필요하다.

PCM은 폐기물 발생을 최소화하기 위해 재사용되어야 한

다.¹⁹ 따라서, 최적 공융점을 나타낸 PEG600(68)-BDO(32)의 재사용성을 평가하였다. Fig. 6과 같이, PEG600(68)-BDO(32)는 100회의 재사용에서도 용융온도와 잠열값의 변화가 발생하지 않았다. 이는 100회의 재사용 후에도 일관된 용융온도와 잠열을 유지함으로써 높은 재사용성을 갖는다는 것을 의미한다. PEG600(68)-BDO(32)의 높은 재사용성은 다양한 열 에너지 응용 분야에서 더욱 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다.

요 약

본 연구에서는 PCM 공융혼합물의 열 저장 용량 향상에 대한 고분자 물질의 적용 가능성을 평가하기 위해 PEG와 BDO의 다양한 함량을 조사하여 이들의 열적 특성과 열 안정성을 평가하였다. FT-IR의 결과에서 BDO의 OH기와 PEG600의 Ether기가 수소결합을 형성하며 고정되는 효과로 인해 혼합물이 더욱 높은 안정성을 띠는 것을 확인하였고, XRD 분석을 통해 PEG와 BDO 혼합물의 결정화도가 증가하여 높은 열 용량을 갖을 수 있다는 것을 확인하였다. 또한, DSC 결과와 온도-시간 그래프를 비교하여 고분자가 사용된 PEG600-BDO 혼합물은 상변화 온도의 변화 및 높은 온도 지속 시간이 관찰되었다. 이는 고분자를 이용하여 공융혼합물을 제조할 때 혼합물의 온도 유지 시간이 단일 물질보다 개선되어 열 에너지 저장에 유리함을 알 수 있다. 그러나, 공융점 혼합물이 아닌 경우 PEG의 분자량 분포로 인한 넓은 온도 유지 구간과 과냉각 현상 등의 문제가 발생하였다. 공융점이 형성된 PEG600(68)-BDO(32)의 경우, 재사용성 실험에서 100회까지 잠열과 상변화온도의 변화 없이 우수한 재사용성을 나타내었다. 본 연구 결과를 통하여 공융혼합물 PCM의 열 저장 용량 및 열 안정성을 동시에 확보하기 위하여 고분자 물질의 사용 및 최적의 공융비율 확보가 중요함을 알 수 있다. 한편, 고분자 물질을 사용한 공융혼합물의 실제 사용을 위해 분자량 분포의 영향을 최소화하는 등의 연구를 통하여 넓은 온도의 공융온도 유지와 과냉각 현상 문제 해결이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2023년 정부(과학기술통신부)의 재원으로 한국연구재단(RS202300208596), 2021년 정부(국토교통부)의 재원으로 국토교통과학기술진흥원(RS2021KA163041)의 지원을 받아 수행된 기초기초연구 사업 연구임.

참고문헌

1. Dutil Y, Rousse DR, Ben SN, Lassue S, Zalewski L. A.

2011. Review on phase-change materials: mathematical modeling and simulations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 15(1):112-130.
2. Rupinder Pal Singh, Jia Yin Sze, S. C Kaushik, Dibakar Rakshit, Alessandro Romagnoli. 2021. Thermal performance enhancement of eutectic PCM laden with functionalised graphene nanoplatelets for an efficient solar absorption cooling storage system. *Journal of Energy Storage*. 33:102092.
 3. Amarpreet Singh, Rashmi Walvekar, Mohammad Khalid, Wai Yin Wong, T.C.S.M. Gupta. 2018. Thermophysical properties of glycerol and polyethylene glycol (PEG600) based DES. *Journal of Molecular Liquids*. 252:439-444.
 4. Ahmet Sari, Tawfik A. Saleh, Gökhan Hekimoğlu, V.V. Tyagi, R.K. Sharma. 2021. Microencapsulated heptadecane with calcium carbonate as thermal conductivity-enhanced phase change material for thermal energy storage. *Journal of Molecular Liquids*. 328:115508.
 5. Law, D., Wang, W., Schmitt E.A. et al. 2002. Prediction of Poly(Ethylene) Glycol-Drug Eutectic Compositions Using an Index Based on the van't Hoff Equation. *Pharm Res*. 19:315-321.
 6. Charmi J, Nosrati H, Mostafavi Amjad J, Mohammadkhani R, Danafar H. 2019. Polyethylene glycol (PEG) decorated graphene oxide nanosheets for controlled release curcumin delivery. *Heliyon*. 5(4).
 7. Naheed, S.; Shahid, M.; Zahoor, R.; Siddique, Z.; Rasool, N.; Haider, S.; Khan. 2021. Synthesis and Study of Morphology and Biocompatibility of Xanthan Gum/Titanium Dioxide-Based Polyurethane Elastomers. *Polymers*. 13(19).
 8. Jos P.M. Lommerse, Sarah L. Price, Robin Taylor. 1998. Hydrogen bonding of carbonyl, ether, and ester oxygen atoms with alkanol hydroxyl groups. *Journal of Computational Chemistry*. 18(6):757-774.
 9. Asep Bayu Dani Nandiyanto, Rosi Oktiani, Risti Ragadhita. 2024. How to Read and Interpret FTIR Spectroscopy of Organic Material. *Indonesian Journal of Science and Technology*. 4(1): 97-118.
 10. Marand, Hervé, Huang, Zhenyu. 2004. Isothermal Lamellar Thickening in Linear Polyethylene: Correlation between the Evolution of the Degree of Crystallinity and the Melting Temperature. *Macromolecules*. 37(17):6492-6497.
 11. Lu Xiang, Liu Huanyu, Murugadoss, Vignesh, Seok Ilwoo, Huang Jintao, Ryu, Jong E., Guo, Zhanhu. 2020. Polyethylene Glycol/Carbon Black Shape-Stable Phase Change Composites for Peak Load Regulating of Electric Power System and Corresponding Thermal Energy Storage. *Engineered Science*. 9:25-34.
 12. Els Verdonck, Ko Schaap, Leonard C Thomas. 1999. A discussion of the principles and applications of Modulated Temperature DSC (MTDSC). *International Journal of Pharmaceutics*. 192:3-20.
 13. Ahmet Sari, Alper Bicer, Amir Al-Ahmed, Fahad A. Al-Sulaiman, Md. Hasan Zahir, Shamseldin A. Mohamed. 2018. Silica fume/capric acid-palmitic acid composite phase change material doped with CNTs for thermal energy storage. *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 179:353-361.
 14. Roman Svoboda, Jiří Málek. 2011. Interpretation of crystallization kinetics results provided by DSC. *Thermochimica Acta*. 526: 237-251.
 15. Paul J. Flory. 1956. Role of Crystallization in Polymers and Proteins. *Science*. 124:53-60.
 16. Lemanowicz M, Mielańczyk A, Walica T, Kotek M, Gierczycki A. 2021. Application of Polymers as a Tool in Crystallization-A Review. *Polymers*. 13(16):2695.
 17. Jared A. Baird, Roberto Olayo-Valles, Carlos Rinaldi, Lynne S. Taylor. 2010. Effect of Molecular Weight, Temperature, and Additives on the Moisture Sorption Properties of Polyethylene Glycol. *Journal of Pharmaceutical Sciences*. 99(1): 154-168.
 18. A. Safari, R. Saidur, F.A. Sulaiman, Yan Xu, Joe Dong. 2017. A review on supercooling of Phase Change Materials in thermal energy storage systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 70:905-919.
 19. Muhammad Faisal Junaid, Zia ur Rehman, Nauman Ijaz, Miroslav Čekon, Jakub Čurpek, Ahmed Babeker Elhag. 2022. Biobased phase change materials from a perspective of recycling, resources conservation and green buildings. *Energy and Buildings*. 270:112280.

투고: 2024.04.05 / 심사완료: 2024.04.24 / 게재확정: 2024.05.03