KOSDI
ISSN : 1976-2208 (Print)
ISSN : 2671-5287 (On-line)
www.sodi.or.kr

Journal of the Society of Disaster Information
Vol. 19, No. 2, pp. 305-312, June 2023
https://doi.org/10.15683/kosdi.2023.6.30.305

Original Article

콘크리트 포장에서 발생하는 온도피해 저감에 관한 연구

A Study on the Reduction of Temperature Damage in Concrete Pavement

김재돈[1] · 장일영[2]*
Jae-Don Kim[1], Il-Young Jang[2]*

[1]Doctor's Course, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Republic of Korea
[2]Professor, Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Gumi, Republic of Korea

*Corresponding author: Il-Young Jang, jbond@kumoh.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: Although the damage caused by abnormal temperatures is extensive, blow-up or black ice is typical in concrete structures. In this study, PCM with high phase change energy was mixed with concrete to reduce temperature damage to concrete pavement. **Method:** In order to reduce temperature damage to low temperatures and high temperatures, capsule-type PCM with phase change temperatures of 4.5°C and 44°C was replaced by 10%, 30%, and 50%, and thermal performance experiments and compressive strength experiments were conducted using thermocouples and variable chambers. **Result:** As a result of the thermal performance experiment, it was found that the incorporation of PCM improves temperature resistance by up to 25% or more, and increases thermal resistance at all temperatures with high specific heat when substituted in large amounts. As a result of the compression strength experiment, a substitution of 30% or more resulted in a decrease in the compression strength, and a large strength difference was shown based on the phase change temperature of the PCM. **Conclusion:** The incorporation of PCMs has been shown to increase the thermal performance of concrete, with the greatest increase in thermal performance near the phase change temperature of PCM. In addition, a small strength reduction of 10% to 20% occurs at the highest substitution rate of 50% substitution, so there is no significant problem with usability, and additional PCM substitution is expected to improve thermal performance.

Keywords: Brow-up, Black Ice, Concrete, Phase Change Material, PCM

요 약

연구목적: 본 연구에서는 콘크리트 포장의 온도피해를 줄이기 위해 상변화에너지가 큰 PCM을 콘크리트에 혼입하고 이에 따른 성능테스트를 진행하였다. **연구방법:** 저온 및 고온에 대한 온도피해를 감소시키기 위해 4.5°C와 44°C의 상변화 온도를 가지는 캡슐형 PCM을 10%, 30%, 50% 치환하여 콘크리트에 혼입하였으며 열전대와 변온챔버를 활용하여 열성능 실험과 압축강도 실험을 진행하였다. **연구결과:** 열성능 실험 결과 PCM의 혼입은 최대 25%이상의 온도저항성을 향상시키는 것으로 나타났으며 다량 치환시 높은 비열로 모든 온도에서 열저항성을 높이는 것으로 나타났다. 압축강도 실험 결과 30%이상의 치환은 압축강도를 저하시키는 결과를 나타냈으며 PCM의 상변화온도를 기준으로 큰 강도차이를 나타냈다. **결론:** PCM의 혼입은 콘크리트의 열성능을 증가시키는 것으로 나타났으며 PCM의 상변화 온도 부근에서 가장 큰 열성능 증가폭을 나타냈다. 또한 가장 높은 치환율인 50% 치환에서 10%~20%의 작은 강도저하가 발생하였으므로 사용성에 큰 문제가 없을 것으로 판단되며 열성능 향상을 위해 추가적인 PCM 투입이 가능할 것으로 판단된다.

핵심용어: 블로우업, 블랙아이스, 콘크리트, 상변환재료, PCM

Received | 18 April, 2023
Revised | 21 April, 2023
Accepted | 25 April, 2023

OPEN ACCESS

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in anymedium, provided the original work is properly cited.

ⓒ Society of Disaster Information All rights reserved.

서 론

최근 지구온난화로 인한 이상고온 및 저온현상이 전 세계적으로 발생하고 있다. 이상기후현상은 가뭄, 홍수, 태풍 등의 대규모 자연재해를 발생시키기도 하지만 콘크리트 구조물 등에 국부적인 피해를 야기하기도 한다. 대표적인 피해로 콘크리트 포장이 융기하는 현상인 블로우업(Blow-Up)이나 포장면에 얇고 투명한 얼음이 생성되는 블랙아이스(Black-Ice) 현상이 있다.

블로우업의 경우 콘크리트 포장의 슬래브가 여름철 고온에 노출될 경우 콘크리트의 팽창에 의해 수축 줄눈의 폭이 감소하면서 인접한 슬래브가 맞닿게 되는 줄눈 닫힘 현상이 발생하게 된다. Fig. 1과 같이 포장 내부온도가 줄눈의 거동 한계를 초과할 경우 포장 전체가 일체화 팽창 거동을 보이며 이 때 끝단에서는 횡 방향 압축력이 발생하여 블로우업 현상으로 이어진다(Lee, 2021).

블랙아이스가 생성되는 대표적인 원인으로는 어는 비로 인한 노면 결빙이며 이외에도 강우, 안개 또는 제설제에 의해 녹았던 눈이 낮은 온도에서 다시 결빙되는 경우도 포함된다. 주로 대기 중으로 돌출되어 바람에 의한 열손실이 지표면보다 큰 곳, 주변이 산으로 둘러싸인 분지등에서 자주 발생된다. Fig. 2는 대기 구조에 따른 강수형태를 나타내는 것으로 맨 우측과 같이 기온선이 지상부터 상층까지 영하권에 위치해 있을 경우 눈이 내리고 어는 비의 경우 눈 싸라기와 비슷한 형태의 온도분포를 가지지만 영상권의 고도가 지상근처까지 더 넓게 분포해 있음을 알 수 있다(Korea Expressway Corporation Research Institute, 2016).

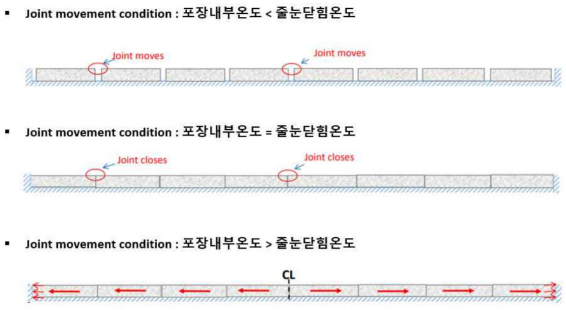

Fig. 1. Blow-Up generation mechanism

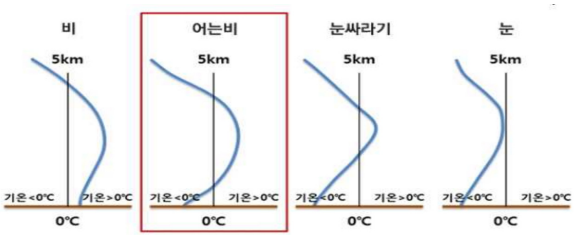

Fig. 2. Black Ice generation mechanism

본 연구에서는 블로우업, 블랙아이스와 같은 콘크리트 구조물에 발생할 수 있는 온도피해를 감소시키기 위해 상변환재료(Phase Change Material; PCM)를 콘크리트에 적용하였다. 상변화란 물질이 고체-액체-기체 상태로 변화하는 것을 의미하며 일반적으로 이용되는 상변화물질은 상변화 과정에서 다량의 에너지를 축적 및 방출할 수 있다(Tyagi, 2007; Hawlader et al., 2003). Fig. 3에 물질의 열에너지 변화에 따른 상변화 물질의 온도변화를 나타냈다. 고체상태의 PCM에 열을 가하면 녹는점에 도달하게 되며 이때 PCM은 고체에서 액체로 상이 변화하면서 용융엔탈피로 알려진 일정한 양의 열을 흡수한다. 이 물질은 열이 투입되었음에도 불구하고 일정한 온도로 머물게 되며(Souayfane et al., 2016; Regin et al., 2008) 이를 두고 그 물질은 잠열을 가지고 있다고 하며 반대로, 액체에서 고체로 상변화가 일어나는 경우에는 PCM이 저장한 잠열을 방출하여 일정한 온도를 유지하게 된다(El-Sebaii et al., 2009).

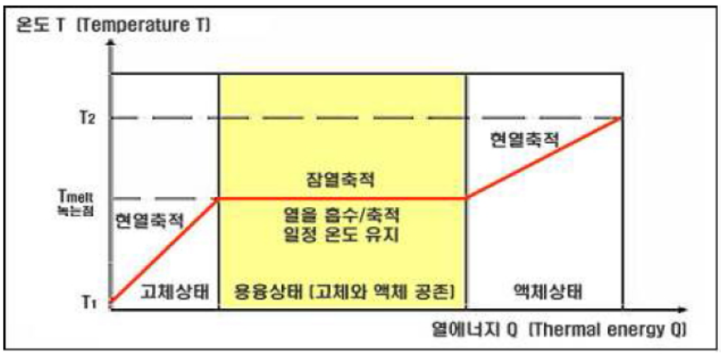

Fig. 3. Temperature changes according to changes in thermal energy of phase change materials

이러한 PCM의 열에너지 축적 및 방출 성질을 활용하기 위해 본 연구에서는 캡슐화 된 PCM을 콘크리트 배합단계에서 첨가하여 콘크리트의 열 성능을 향상시키는 것을 목적으로 하였다. 저온 및 고온에서의 열저항 성능을 향상시키기 위해 서로 다른 상변화 온도를 가지는 2종류의 PCM 물질을 적용하였다. PCM 이 적용된 콘크리트는 열 성능실험과 온도에 따른 압축강도 실험을 진행하였다.

실험계획 및 방법

사용재료

시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 KS L 5201을 만족하는 보통 포틀랜드 시멘트로 CaO를 약 70% 함유하고 있으며 물리화학적 특성을 Table 1에 나타냈다.

Table 1. Physiochemical properties of OPC

Oxides (%)	Fe_2O_3	4.37
	MgO	2.69
	Al_2O_3	3.40
	SiO_2	15.60
	SrO	0.10
	CaO	70.00
	K_2O	1.71
	SO_3	1.45
Specific gravity(g/cm^3)		3.17
Fineness(cm^2/g)		3,610
Average diameter(μm)		7.87

골재

배합에 사용된 잔골재는 하천모래로서 비중이 2.60이고, 흡수율이 1.05인 것을 사용하였다. 굵은 골재는 쇄석으로 비중이 2.65이고, 흡수율이 0.90, 최대 치수(G_{max})가 25mm인 것을 사용하였다.

PCM

PCM은 상분리 문제가 발생하지 않고 결정화 과정에서 과냉각 현상이 비교적 적게 발생하는 파라핀 계열을 선택했으며 상변화온도는 4.5°C, 44°C로 하여 저온 및 고온에서 작용하도록 하였다. 두 종류 PCM의 물리 화학적 특성을 Table 2에 나타냈다.

Table 2. Physicochemical properties of OPC

상변화온도	분자식	분자량	잠열량	순도	기초원료	비중
4.5°C	CH3-(CH2)12-CH3	198g/mol	>210kJ/kg	>97% 이상	식물성	0.85
44°C	CH3-(CH2)20-CH3	310g/mol	>220kJ/kg	>95% 이상	식물성	0.99

배합설계 및 시편 제작

배합설계

PCM 혼입율에 따른 열 특성 및 강도특성을 파악하기 위해 Table 3와 같이 콘크리트 배합설계를 산정하였다. 각 PCM의 치환율은 OPC 부피대비 10% ~ 50%로 하였으며 배합명을 PCM의 상변화 온도_치환율로 하였다. 배합설계의 부피를 일정하게 유지하기 위해 PCM이 투입된 부피만큼 잔골재의 부피를 감소시켰다. 표에서 밝힌 바와 같이 두 종류의 PCM은 비중이 다르므로 치환율에 해당하는 부피에 각각의 비중을 적용하여 배합설계를 진행하였다.

Table 3. PCM concrete mixing design

	Mix design(kg/m^3)					
	OPC	PCM		Water	Gravel	Sand
		4.5°C	44°C			
Control	343.14	-	-	137.26	1087.75	840.68
4.5_10%	343.14	9.26	-	137.26	1087.75	812.35
4.5_30%	343.14	27.78	-	137.26	1087.75	755.71
4.5_50%	343.14	46.30	-	137.26	1087.75	699.06
44_10%	343.14	-	10.78	137.26	1087.75	812.35
44_30%	343.14	-	32.35	137.26	1087.75	755.71
44_50%	343.14	-	53.92	137.26	1087.75	699.06

시편제작

시편의 제작은 열 성능테스트용 시편과 압축강도 테스트용 시편으로 나누어 진행되었다. 열 성능테스트용 시편은 50mm

두께를 가지는 단열재를 활용하여 내부공간이 100 * 100 * 100mm가 되게 제작하였으며 상단으로부터 50mm 지점에 열전대를 배치하여 시편의 온도를 실시간으로 측정할 수 있도록 제작하였다. 압축강도 측정용 시편은 Ø10 * 200mm의 원주형 몰드에 콘크리트를 타설하여 제작하였다. 각 시편은 타설 후 24시간 뒤에 20°C의 수중에서 양생을 진행하였다.

실험방법

열 성능 실험

열성능 실험은 내부온도 조절이 가능한 챔버를 활용하여 진행하였다. 제작한 서로 다른 치환율의 PCM 콘크리트를 온도제어가 되는 챔버에 투입하였고 -10°C ~ 60°C의 환경에서 콘크리트 내부온도의 변화를 측정하였다. 온도의 측정은 데이터로거를 통해 받아들였으며 총 실험시간은 20시간 동안 진행하였다.

압축강도 실험

PCM 혼입율 및 콘크리트 온도에 따른 강도 특성을 파악하기 위해 압축강도 실험을 진행하였다. 재령 28일의 콘크리트를 0°C, 25°C, 50°C의 환경에서 24시간 이상 정치 후 KS F 2456에 의거하여 압축강도 측정을 실시하였다. 최대용량 2,000kN의 만능재료시험기(Universal testing machine; UTM)을 이용하여 재하속도 200kN/분의 하중제어 방식으로 수행되었다. 모든 배합에 대해 5개 시편의 평균값을 압축강도 값으로 사용하였다.

결과 및 고찰

열 성능 실험

열전대를 활용한 PCM 콘크리트 열성능 실험 결과를 Fig. 4에 나타냈다. 온도 센서는 콘크리트의 표면에서부터 50mm 지점에서의 온도를 측정하였고 챔버 내부의 온도를 측정하기 위해 매립되지 않은 온도센서를 챔버 내에 거치하고 air tem이라 명명하였다.

온도가 -10°C로 하락하기 이전에 콘크리트의 온도는 15°C - 20°C에 분포하고 있으며 챔버 온도(air tem)가 하락하기 시작하자 콘크리트의 온도가 하락하기 시작하였다. -10°C환경 노출 5시간 뒤 OPC, 44_30%, 44_10% 및 4.5_10% 시편은 -8°C 부근으로 수렴하였고 나머지 4.5_50%, 4.5_30%, 44_50%시편은 -2°C부근으로 수렴하였다. 60°C환경에서 5시간 유지 후 콘크리트 내부온도는 OPC, 4.5_30% 시편이 52°C로 가장 높았고 4.5_50%,4.5_10% 44_10%시편이 49°C도로 뒤를 이었으며 44_30%, 44_50% 시편이 약 46°C로 가장 낮은 온도를 나타냈다.

-10°C구간에서 가장 높은 저항성능을 나타낸 시료는 4.5_50%로 OPC 가 19°C에서 -8°C로 27°C 하락하는 동안 19.5°C에서 -2°C로 21.5°C 하락하였고 이를 수치로 환산하면 약 25%이상의 성능을 나타낸 것으로 판단된다. 60°C 구간에서 가장 높은 저항성능을 나타낸 시료는 44_30%시료이며 OPC가 -8°C에서 52°C까지 60도의 온도 변화를 나타냈지만 44_30%시편은 -8°C에서 46°C로 54°C의 온도변화를 나타냈으며 이를 수치로 환산하면 약 11%이상의 성능을 나타낸 것으로 판단된다.

한 가지 독특한 점은 PCM 종류에 관계없이 50% 혼입시에는 저온 및 고온 모두에서 저항하는 성질을 나타내는 것으로 확인되는데 이는 PCM 자체의 높은 비열에 의한 것으로 사료된다.

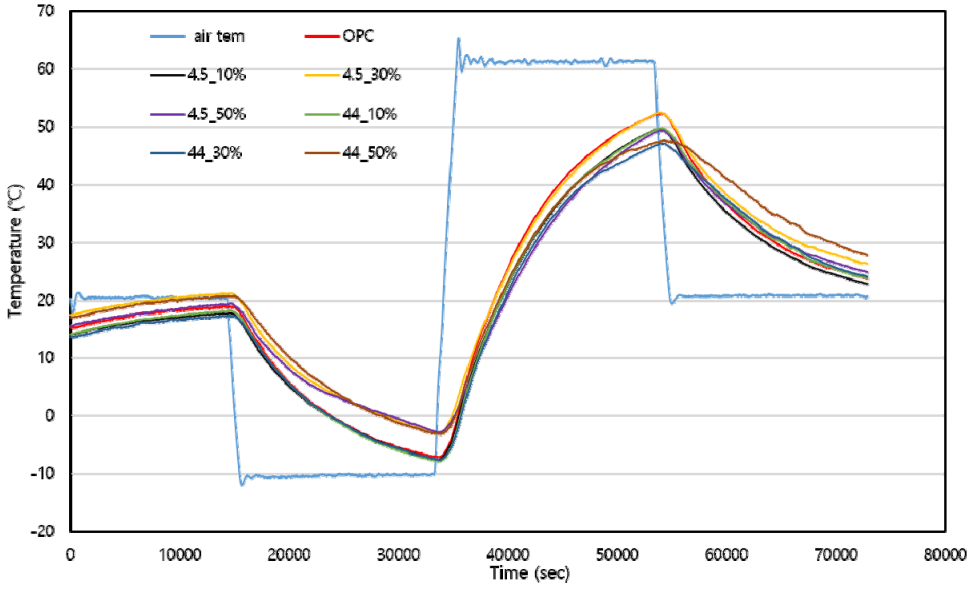

Fig. 4. PCM concrete thermal performance test results

압축강도 실험

세 가지 온도에서 측정한 재령 28일의 PCM 콘크리트의 압축강도 실험 결과를 Fig. 5에 나타냈다. 모든 배합에서 0°C일 때 가장 높은 강도를 나타냈으며 온도가 상승할수록 강도가 하락하는 경향을 나타냈다. 하지만 OPC, 4.5_10%, 4.5_30% 배합에서는 50°C에서 25°C보다 미약하지만 높은 강도를 나타냈다.

두 종류의 PCM 을 10% 치환시 OPC 콘크리트보다 약간 높거나 유사한 강도 값을 나타냈다. 10% 이상의 치환율에서는 OPC 보다 낮은 강도의 발현을 보였으며 치환율이 높아질수록 이러한 경향은 강하게 나타났다. 이와 같은 결과를 볼 때 소량의 PCM 첨가는 강도하락에 큰 영향을 미치지 않으며 미세공극의 채움효과로 인해 오히려 강도의 상승을 일으킬 수 있으며 또한, 다량의 PCM 첨가는 PCM의 낮은 강도로 인해 압축강도의 저하를 발생시키는 것으로 판단된다.

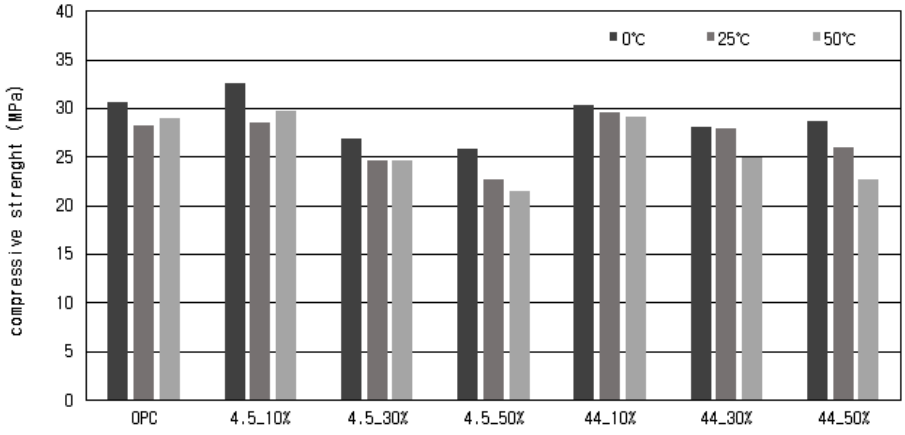

Fig. 5. Results of compressive strength of PCM concrete

4.5°C의 PCM이 혼입된 콘크리트에서는 0°C에서 25°C로 온도가 상승할 때 가장 높은 강도 감소율을 나타냈으며 44°C의 PCM이 혼입된 콘크리트에서는 25°C에서 44°C로 온도가 상승할 때 가장 높은 강도 감소율을 나타냈다. 이와 같은 결과는 캡슐내부의 PCM의 상에 따른 강도변화인 것으로 판단된다. 4.5°C PCM의 경우 0°C에서는 고체상태이고 25°C에서는 액체상태이므로 급격한 강도저하를 나타내며 50°C에서는 액체상태가 유지되므로 큰폭의 강도저하가 발생하지 않으며 44°C PCM의 경우 0°C와 25°C에서 고체상태이지만 50°C에서는 액체상태로 변하므로 큰폭의 강도저하가 발생한 것으로 사료된다.

PCM혼입 콘크리트의 평균 강도의 경우 10% 치환율을 제외하고는 44°CPCM이 높은 강도를 나타냈다. 이와 같은 결과는 PCM 의 비중차이에 의한 것으로 판단되며 44°C의 PCM의 경우 4.5°CPCM 보다 약 16%높은 비중을 가지므로 상대적으로 강도저하에 낮은 영향을 미친 것으로 판단된다.

결 론

본 연구는 콘크리트의 열성능을 향상시키기 위해 PCM을 캡슐화 하여 혼입하였으며 그에 따른 열성능 및 압축강도 양상을 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 일정수준 이상의 PCM 혼입은 콘크리트 열성능을 향상시키는 것으로 나타났으며 PCM의 상변화 온도 구간에서 가장 큰 향상 폭을 보였다. 또한 다량의 PCM 혼입은 PCM의 높은 비열로 인해 외기에 따른 온도변화가 적게 나타났다.

(2) PCM의 혼입은 콘크리트의 압축강도 저하를 유발하지만 50%혼입에서 사용성에 문제가 생길만큼의 강도저하는 나타나지 않으며 추가적으로 감수제 등의 혼화제를 활용한다면 더 높은 혼입율을 적용하여 열성능을 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

(3) PCM 캡슐파괴에 의한 강도저하가 우려되는 만큼 추가적인 연구를 통해 명확한 상관관계를 규명하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

이 연구는 금오공과대학교 학술연구비로 지원되었음(202002070001).

References

[1] El-Sebaii, A.A., Al-Ghamdi, A.A., Al-Hazmi, F.S., Faidah, A.S. (2009). “Thermal performance of a single basin solar still with PCM as a storage medium.” Applied Energy, Vol. 86, No. 7-8, pp. 1187-1195.

[2] Hawlader, M.N.A., Uddin, M.S., Khin, M.M. (2003). “Microencapsulated PCM thermal-energy storage system.” Applied Energy, Vol. 74, No. 1-2, pp. 195-202.

[3] Korea Expressway Corporation Research Institute (2016). Pavement Management Strategy for Traffic Safety in Winter Season. Korea Expressway Corporation, 2016-55-534, 9607, Korea.

[4] Lee, J.H. (2021). Numerical Modeling of Concrete Pavement Growth and Blow-up. Master Dissertation, Gangneung-Wonju National University.

[5] Regin, A.F., Solanki, S.C., Saini, J.S. (2008). “Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review.” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 12, No. 9, pp. 2438-2458.

[6] Souayfane, F., Fardoun, F., Biwole, P.H. (2016). “Phase change materials (PCM) for cooling applications in buildings: A review. Energy and Buildings, Vol. 129, pp. 396-431.

[7] Tyagi, V.V., Buddhi, D.P.C.M. (2007). “PCM thermal storage in buildings: A state of art.” Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 11, No. 6, pp. 1146-1166.