



PATRYCJA WCISŁO*

patrycja.wcislo@wp.pl



MICHAŁ RYMS*

michal.ryms@pg.gda.pl



WITOLD M.
LEWANDOWSKI*

wlew@chem.pg.gda.pl



EWA KLUGMANN-
RADZIEMSKA*

ewa.klugmann-radziemska@pg.gda.pl

* Politechnika Gdańska

Materiały zmiennofazowe do stabilizowania temperatury nawierzchni asfaltowych

(artykuł dyskusyjny)

Redakcja zamieszcza artykuł Autorów z Katedry Aparatury i Maszynoznawstwa Chemicznego Politechniki Gdańskiej w celu wskazania możliwości redukcji temperatury nawierzchni asfaltowych. Dążenie do poprawy stabilności termicznej nawierzchni asfaltowej, a zwłaszcza możliwość obniżania temperatury nagrzewania się asfaltowych warstw konstrukcyjnych jest sprawą priorytetową dla drogownictwa. W artykule opisano ciekawe zagadnienia, których rozwijanie i badanie jest konieczne.

Użycie materiałów zmiennofazowych (PCM – ang. *Phase Change Materials*) jest przedmiotem badań prowadzonych zarówno przez producentów, jak i naukowców. Powodem tego jest duży popyt, zarówno na nowe materiały, jak i nowe wdrożenia już istniejących. Dlatego tak ważna jest modyfikacja istniejących materiałów, poszukiwanie nowych oraz prowadzenie badań w kierunku innowacyjnych zastosowań PCM. W wyniku izotermicznych przemian fazowych materiały zmiennofazowe są w stanie absorbować, magazynować, a następnie uwalniać duże ilości energii. Zjawiska te pozwalają na pozyskanie i zagospodarowanie ciepła odpadowego, bardziej optymalne wykorzystanie energii słonecznej oraz nadwyżek ciepła w konstrukcjach pasywnych, oraz na bardziej efektywne zarządzanie ciepłem [1], [2].

Dotychczas materiały zmiennofazowe znalazły zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu m.in. w przemyśle spożywczym, budowlanym, elektronicznym, medycznym i innych. W budownictwie stosuje się je w rozwiązaniach konstrukcyjnych w celu zapewnienia komfortu cieplnego budynku. Używa się ich jako dodatku do cementu, gipsu czy farb, a także umieszcza bezpośrednio w przegrodach budynku. Działania te mają na

celu poprawę właściwości energetycznych budynku i zapewnienie komfortu cieplnego [3], [4], [5]. W przemyśle elektronicznym materiały zmiennofazowe stosuje się, aby zapobiec przegrzewaniu urządzeń, natomiast w przemyśle spożywczym stosowanie materiałów PCM ma na celu zapewnienie właściwej temperatury przechowywanej żywności. W tym przypadku stosuje się odpowiednie pojemniki modyfikowane materiałami zmiennofazowymi, których zadaniem jest utrzymanie niskiej względnie wysokiej temperatury posiłków czy napojów. Nowym zastosowaniem, które jest przedmiotem prowadzonych badań w Katedrze Aparatury i Maszynoznawstwa Chemicznego Politechniki Gdańskiej, jest możliwość

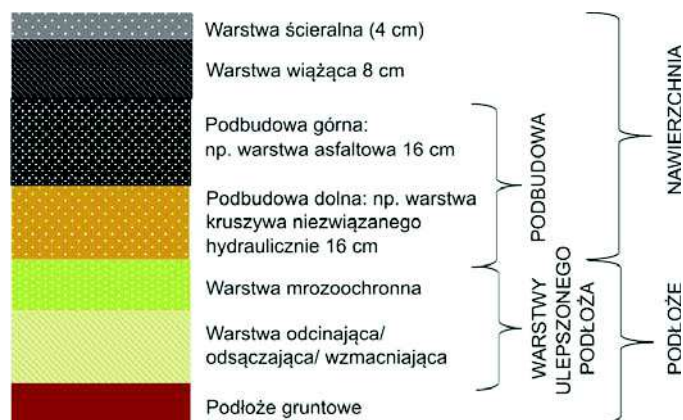
wykorzystania materiałów zmiennofazowych jako akumulatorów ciepła do stabilizacji temperatury nawierzchni asfaltowej, zapobiegając przed jej nagrzaniem.

Nawierzchnia asfaltowa składa się zazwyczaj z trzech warstw asfaltowych [6]:

- podbudowy,
- warstwy wiążącej,
- warstwy ścieralnej.

Warstwa ścieralna jest wierzchnią warstwą nawierzchni, która jest w bezpośrednim kontakcie z kołami pojazdów oraz jest bezpośrednio narażona na czynniki środowiskowe i klimatyczne.

Większość dróg w Polsce posiada nawierzchnie stanowiące pakiet warstw asfaltowych. Na rysunku 1 przedstawiono najczęściej występujący przekrój nawierzchni drogowej.



Rys. 1. Przykładowa konstrukcja drogi [6]

Jednym z problemów, które występują podczas eksploatacji nawierzchni drogowych jest nadmierne nagrzewanie się warstwy ścieralnej, co prowadzi do jej pofałdowania, tworzenia kolein itp. [7], [8], [9]. Dlatego tak ważne jest, aby wierzchnia warstwa nawierzchni była odporna zarówno na ścieranie, jak i oddziaływanie wysokiej temperatury. Kombinacja właściwości magazynowania ciepła przez materiały zmiennofazowe w połączeniu ze stabilizacją temperatury nawierzchni asfaltowej stanowi interesujący temat badawczy. Wstępne badania możliwości zastosowania materiałów akumulujących ciepło, do wykonania jednej z warstw, są bardzo obiecujące z punktu widzenia obniżenia temperatury nawierzchni asfaltowej w okresach, kiedy temperatura jest wysoka. Po analizie właściwości termodynamicznych i użyt-

kowych, takich jak: temperatura topnienia, ciepło właściwe, entalpia właściwa, dostępność, cena i wpływ na środowisko, spośród wielu dostępnych materiałów zmiennofazowych do dalszych, bardziej szczegółowych badań wybrano cerezynę, która jest pozostałością po rafinacji ropy naftowej. Badania potwierdziły, że wybrany materiał zmiennofazowy może być odpowiedni do tego rodzaju zastosowań. Niniejsza praca miała na celu zbadanie możliwości użycia w formie zmodyfikowanego cerezyną lekkiego kruszywa budowlanego w celu stabilizacji temperatury nawierzchni asfaltowej.

Uwaga: w dalszej części publikacji stosowane są następujące pojęcia, symbole i indeksy.

Pojęcia

- a – współczynnik wyrównania temperatury (dyfuzyjność cieplna) [m^2/s]
- A – energia zaabsorbowana przez asfalt [kJ]
- S – powierzchnia asfaltu [m^2]
- C – współczynnik empiryczny zależny od charakteru konwekcyjnej wymiany ciepła [-]
- c_p – ciepło właściwe [kJ/(kg·K)]
- E – energia promieniowania słonecznego [kJ]
- g – przyspieszenie ziemskie [m/s^2]
- H_p – gęstość strumienia energii promieniowania słonecznego [W/m^2]
- l – charakterystyczny wymiar liniowy [m]
- m_A – masa asfaltu [kg]
- m_{ECA} – masa lekkiego kruszywa budowlanego (ECA) [kg]
- m_{PCM} – masa materiału zmiennofazowego (PCM) [kg]
- Nu – liczba Nusselta [-]
- Pr – liczba Prandtla [-]
- Q – energia cieplna [kJ]
- R – energia przekazywana przez promieniowanie [kJ]
- r – ciepło utajone [kJ/kg]
- Ra – liczba Rayleigha [-]
- Re – liczba Reynoldsa [-]
- t – temperatura [$^{\circ}C$]
- T – temperatura [K]
- T_b – temperatura równowagowa [K]
- T – energia przenikająca [kJ]
- w – prędkość przepływu, w tym przypadku: wiatru [m/s]

Symbole greckie

- α – współczynnik przenikania ciepła [$W/(m^2 \cdot K)$]
- β – współczynnik rozszerzalności objętościowej powietrza [$1/K$]
- ε – współczynnik emisyjności asfaltu [-]
- λ – współczynnik przewodzenia ciepła [$W/(m \cdot K)$]
- $\sigma = 5,669 \cdot 10^{-8}$ [$W/(m^2 \cdot K^4)$] – stała Stefana Boltzmanna
- τ – czas [s]
- ν – lepkość kinematyczna [m^2/s]

Indeksy

- A – asfalt
- dif – promieniowanie rozproszone
- dir – promieniowanie bezpośrednie
- ECA – lekkie kruszywo budowlane

- ext – temperatura zewnętrzna
- fin – końcowa temperatura warstwy
- $forc$ – konwekcja wymuszona
- $free$ – konwekcja swobodna
- in – wewnętrzna
- ini – początkowa temperatura
- PCM – materiał zmiennofazowy

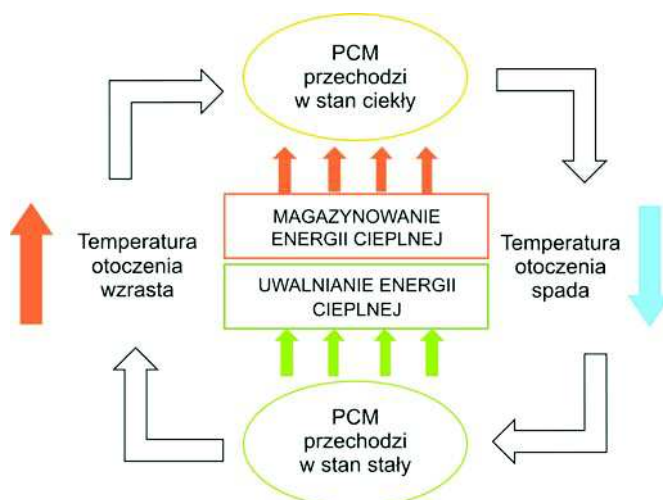
Materiały zmiennofazowe (PCM) – ogólna charakterystyka

Istnieje wiele substancji zdolnych do magazynowania dużych ilości ciepła podczas zmiany fazy oraz uwalniania tej samej ilości ciepła w procesie odwrotnym. W przypadku czystych substancji zmiana fazy odbywa się w tej samej temperaturze, a proces topnienia i krzepnięcia może być powtarzany przez wiele cykli, bez zmian właściwości fizykochemicznych danego materiału zmiennofazowego. Istnieje wiele grup materiałów zdolnych do magazynowania dużych ilości energii, wyróżnia się trzy główne grupy: związki organiczne (np. woski, parafiny, kwasy tłuszczowe, alkohole), związki nieorganiczne (np. uwodnione sole) oraz mieszaniny eutektyczne (rysunek 2) [10].



Rys. 2. Klasyfikacja związków zmiennofazowych [11]

Podczas zmiany fazy ze stałej w ciekłą dochodzi do akumulacji i magazynowania ciepła, natomiast podczas zmiany fazy z ciekłej w stałą, wcześniej zmagazynowane ciepło zostaje uwolnione. Taki cykl może powtarzać się wiele razy bez zmian właściwości fizyko-chemicznych danego materiału zmiennofazowego (rysunek 3) [1].



Rys. 3. Zasada działania materiałów zmiennofazowych (PCM) [1]

W związku z tym, że materiały zmiennofazowe należą do różnych grup substancji chemicznych, mają różne zakresy temperatury zmiany fazy. Pozwala to na zastosowanie PCM w różnych dziedzinach przemysłu. Na rynku dostępne są komercyjne materiały zmiennofazowe przygotowane do odpowiednich zastosowań. Materiały zmiennofazowe powinny charakteryzować się właściwościami, które trudno spełnić jednocześnie. Są to m.in. wysoka czystość, odpowiednio duża pojemność cieplna, przemiana fazowa w wąskim zakresie temperatury, wytrzymałość, nietoksyczność, niska cena oraz możliwość działania w długim okresie czasu [12]. Z tego powodu bardzo ważne jest poszukiwanie nowych i badanie znanych materiałów pod kątem zastosowania ich jako akumulatorów ciepła. PCM należące do wielkocząsteczkowych węglowodorów, w tym również cerezyna, którą zastosowano do badań, posiadają wiele zalet, m.in. dużą pojemność cieplną, nietoksyczność, brak oddziaływania korozyjnego, przystępną cenę. Jednakże organiczne materiały zmiennofazowe mają również pewne wady, np. niską przewodność cieplną, czy szeroki zakres wartości temperatury topnienia. Ponadto czyste chemicznie parafiny są drogie i palne [10].

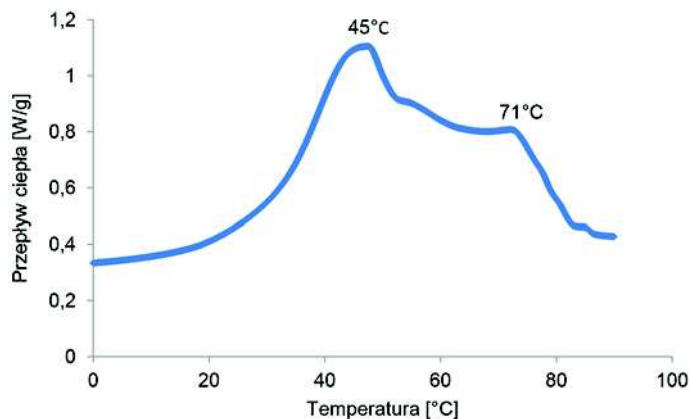
Cerezyna jako materiał zmiennofazowy (PCM)

Cerezyna należy do wyższych węglowodorów i jest pozostałością po rafinacji ropy naftowej. Jest to kremowo-żółta, stała masa przypominająca wosk, o temperaturze topnienia 68-72°C. Do tej pory była stosowana do produkcji świec, jako dodatek do maści i kremów w przemyśle farmaceutycznym i kosmetycznym oraz jako materiał izolacyjny. Może być również stosowana z powodzeniem jako akumulator ciepła w określonych systemach.

Wstępne wyniki uzyskane w Katedrze Aparatury i Maszynoznawstwa Chemicznego PG wykazały, że cerezyna jest obiecującym materiałem zmiennofazowym do modyfikacji nawierzchni asfaltowej. Rozszerzone badania przy użyciu skaningowej kalorymetrii różnicowej (DSC) pozwoliły na określenie typowych właściwości termofizycznych cerezyny, tzn. entalpii, ciepła właściwego oraz temperatury zmiany fazy. Badania właściwości cerezyny wykonano za pomocą kalorymetru skaningowego typu TA Q20. Krzywe DSC rejestrowano podczas ogrzewania próbek z szybkością 10°C/min w zakresie temperatury od 0 do 90°C.

Na termogramie DSC (rysunek 4) widoczne są dwa charakterystyczne piki, co wskazuje, że cerezyna składa się z kilku frakcji węglowodorowych, z których najbardziej widoczne są dwie przy temperaturze zmiany fazy: 45°C oraz 71°C.

Z uwagi na taką charakterystykę cerezyny próbowano dokonać wydzielenia poszczególnych frakcji, jednak ze względu na zbyt małą różnicę gęstości i zbyt duże podobieństwo budowy chemicznej nie udało się ani fizycznie, ani fizykochemicznie dokonać rozdzielenia i uzyskać dwie czyste frakcje węglowodorów. W związku z tym do badań użyto ich mieszaninę, tzn. cerezynę dostępną na rynku. Taki wybór ma również zaletę, ponieważ użycie handlowej cerezyny pozwala na minimalizację kosztów związanych z dodatkowym procesem separacji, a także na szersze możliwości zastosowania tego materiału w sytuacji, kiedy wymagane są zarówno niskie,



Rys. 4. Termogram DSC dla cerezyny

jak i wysokie temperatury zmiany fazy. Wadą tego wyboru są różne ciepła przemiany fazowej w temperaturze 45°C i 71°C (rysunek 4), ale zakłada się, że nie będzie to miało istotnego wpływu na stabilizację temperatury nawierzchni asfaltowej w warunkach rzeczywistych, które nieco odbiegają od warunków laboratoryjnych.

Jedną z możliwości zastosowania zmodyfikowanego cerezyną lekkiego kruszywa budowlanego ECA może być stabilizacja temperatury nawierzchni asfaltowej, która w okresie letnim nagrzewa się do wysokiej temperatury. Cerezyna spełnia w tym przypadku rolę materiału zmiennofazowego, gdyż może pochłaniać ciepło przez długi czas, a tym samym zapobiegać nadmiernemu przegrzewaniu nawierzchni drogi asfaltowej. Nagrzewanie się nawierzchni asfaltowej w ciągu dnia, a chłodzenie w nocy jest niekorzystne, nie tylko z powodu naprężeń wewnętrznych i szkodliwego wpływu na konstrukcję nawierzchni drogowych, ale także może być szkodliwe ze względu na emisję w podwyższonej temperaturze toksycznych lotnych związków organicznych oraz pyłów szkodliwych dla ludzi, zwierząt i środowiska naturalnego [13].

Teoretyczne rozważania związane z nagrzewaniem nawierzchni asfaltowej

Podczas analizy zagadnień wymiany ciepła stosuje się prawo addytywności, które zakłada niezależność rodzajów wymiany ciepła, co oznacza, że obliczone ilości energii wymienionej na drodze przewodzenia, konwekcji i promieniowania sumuje się.

Ilość energii słonecznej docierającej do powierzchni asfaltowej drogi E jest równa sumie promieniowania bezpośredniego – E_{dir} oraz promieniowania rozproszonego (promieniowanie odbite od różnych obiektów np. chmur, drzew, ziemi, itp.) – E_{diff} . Suma strumieni tych energii jest znana jako całkowite promieniowanie słoneczne i zależy nie tylko od szerokości, ale także od pory dnia, roku, lokalizacji drogi i jej nachylenia:

$$E_r = E_{dir} + E_{diff} \quad (1)$$

Promieniowanie słoneczne w kontakcie z nawierzchnią asfaltową, zgodnie z zasadą zachowania energii ulega odbiciu

i adsorpcji. Strumień energii przenikający (T) w przypadku asfaltu nie występuje:

$$E = R + T + A \quad (2)$$

Sucha nawierzchnia asfaltowa może być rozpatrywana jako ciało doskonale czarne ($T = 0$, $R = 0$ i $E = A$), ale po deszczu jest bardziej śliska i błyszcząca ($T = 0$, $R \neq 0$ i $E = A + R$). Jednakże ten przypadek został pominięty, gdyż podczas opadów deszczu strumień ciepła odprowadzony z powierzchni asfaltu z parującą wodą jest większy niż ilość energii dostarczona w postaci energii słonecznej. Dlatego zakłada się, że cała dostarczana do powierzchni drogi energia słoneczna (E) jest absorbowana i zamieniana w ciepło (Q), z którego część jest emitowana z powierzchni przez promieniowanie, strumień strat promieniowania Q_p , a część przez konwekcję Q_c . Pozostała energia cieplna Q_r powoduje nagrzewanie nawierzchni [14]:

$$E = Q + Q_c + Q_r \quad (3)$$

Konwekcyjna wymiana ciepła

Konwekcja jest sposobem wymiany ciepła, który związany jest z ruchem materii w płynie. Ilość konwekcyjnie odprowadzanej z nawierzchni asfaltowej, zmodyfikowanej obecnością PCM (*) i bez PCM, energii cieplnej w wietrzną pogodę, od powierzchni drogi o temperaturze t_{inA} lub t_{inA}^* do otoczenia t_{ext} , opisuje prawo Newtona:

$$\frac{dQ_c}{d\tau} = \alpha \cdot S \cdot (t_{inA} - t_{ext}) \quad (4)$$

$$\frac{dQ_c^*}{d\tau} = \alpha \cdot S \cdot (t_{inA}^* - t_{ext}) \quad (5)$$

gdzie: α – współczynnik przejmowania ciepła [$W/(m^2 \cdot K)$] w przypadku konwekcji naturalnej (C_{free}) lub wymuszonej (C_{forc}) jest związany z liczbą Nusselta (Nu), Rayleigha (Ra), Reynoldsa (Re) i Prandtla (Pr) poprzez następujące relacje:

$$Nu = C_{free} \cdot Ra^n \quad i \quad Nu = C_{forc} \cdot Re^m \cdot Pr^{1/3} \quad (6)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot l}{\lambda}, \quad Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (t_{inA} - t_{ext}) \cdot l^3}{\nu \cdot \alpha} \quad i \quad Ra = \frac{w \cdot l}{\nu} \quad (7)$$

gdzie: l [m] – charakterystyczny wymiar liniowy płaskiej płyty poziomej.

Stałe C_{free} , C_{forc} , n i m zależą od geometrii układu, rodzaju konwekcji, która może być samoistna lub wymuszona i odbywać się w zamkniętej lub otwartej przestrzeni z różnym natężeniem (zakres laminarny, przejściowy, burzliwy). Ustalenie stałych C , n i m wymaga analitycznych i numerycznych rozwiązań Neviera – Stokesa, Fouriera – Kirchoffa i równania ciągłości, a następnie eksperymentalnej weryfikacji otrzymanych wyników [15], [16]. Teoretyczne i eksperymentalne badania naturalnego konwekcyjnego przenoszenia ciepła z poziomych izotermicznych powierzchni przeprowadzone przez Michieyewa pokazują następujące relacje:

$$Nu = 0,54 \cdot Ra^{0,25} \quad dla \quad 10^4 < Ra < 10^7 \quad (8)$$

(zakres laminarny)

$$Nu = 0,15 \cdot Ra^{0,33} \quad dla \quad 10^7 < Ra < 10^{15} \quad (9)$$

(zakres poziomy i burzliwy)

Nawierzchnia asfaltowa może osiągnąć w lecie temperaturę nawet $70^\circ C$ (t_{inA}), w poniższych rozważaniach przyjęto: $t_{inA} = 50^\circ C$ oraz $t_{inA}^* = 40^\circ C$ (w przypadku modyfikowanego podłoża PCM). Temperatura otoczenia obu warstw (modyfikowanej PCM oraz niemodyfikowanej PCM) jest taka sama i wynosi około $30^\circ C$. Przy średniej temperaturze powietrza $t_{av} = (50+30+40)/3 = 40^\circ C$ istotne parametry fizyczne powietrza wynoszą odpowiednio: $\lambda = 2,76 \cdot 10^{-2} W/(m \cdot K)$, $\beta = 1/313,15 K^{-1}$, $\alpha = 24,31 \cdot 10^{-6} m^2/s$, $\nu = 16,96 \cdot 10^{-6} m^2/s$ i $Pr = 0,699$. Jako charakterystyczny wymiar liniowy przyjęto długość badanych eksperymentalnie, w warunkach rzeczywistych, powierzchni asfaltowych $l = 0,33 m$, możliwe jest obliczenie liczby Rayleigha i Nusselta z równania (6) i (7).

$$Ra = \frac{9,81 \cdot (50-30) \cdot 0,33^3}{313,15 \cdot 24,31 \cdot 10^{-6} \cdot 16,96 \cdot 10^{-6}} = 1,655 \cdot 10^8 \quad (10)$$

$$Ra^* = \frac{9,81 \cdot (40-30) \cdot 0,33^3}{313,15 \cdot 24,31 \cdot 10^{-6} \cdot 16,96 \cdot 10^{-6}} = 8,274 \cdot 10^7 \quad (11)$$

$$Nu = 0,15 \cdot Ra^{0,333} = 81,837 \quad (12)$$

$$i \quad Nu^* = 0,54 \cdot Ra^{0,2} = 20,698$$

W związku z powyższym współczynnik przewodzenia ciepła i szybkość przepływu ciepła przez konwekcję przy płaskiej izotermicznej powierzchni: $A = 0,33 \times 0,23 = 0,0759 m^2$ oblicza się:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l} = 6,844 [W/(m^2 \cdot K)] \quad (13)$$

$$i \quad \alpha^* = \frac{Nu^* \cdot \lambda}{l} = 1,731 [W/(m^2 \cdot K)]$$

$$\frac{dQ_c}{d\tau} = \alpha \cdot S \cdot (t_{inA} - t_{ext}) = 6,844 \cdot 20 \cdot 0,0759 = 10,389 W \quad (14)$$

$$\frac{dQ_c^*}{d\tau} = \alpha^* \cdot S \cdot (t_{inA}^* - t_{ext}) = 1,731 \cdot 10 \cdot 0,0759 = 1,314 W \quad (15)$$

Radiacyjne strumienie ciepła

Promieniowanie (radiacja) energii w postaci fal elektromagnetycznych emitowanych z powierzchni warstwy asfaltowej (Q_r i Q_r^*) jest konwersją ciepła na energię fal elektromagnetycznych. Częstotliwość emitowanego promieniowania w funkcji temperatury opisuje prawo Plancka i prawo Wiena, a intensywność mocy promieniowania jest opisana przez prawo Stefana-Boltzmann [17]:

$$\frac{dQ_r}{d\tau} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S (T_{inA}^4 - T_{ext}^4) \quad (16)$$

$$\frac{dQ_r^*}{d\tau} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S (T_{inA}^{*4} - T_{ext}^4) \quad (17)$$

gdzie: $\varepsilon = 0,9 - 0,98$ (1,00; $t = 0 - 250^\circ C$) [18] – emisyjność asfaltu w temperaturze otoczenia [19],

$T_{inA}/T_{inA}^* = 273,15 + t_{inA}/t_{inA}^*$ i $T_{ext} = 273,15 + t_{ext}$ K, $^\circ C$, – temperatury bezwzględne powierzchni warstwy i otoczenia w obu modelach.

Wartości radiacyjnych strumieni ciepła z powierzchni badanego obszaru $S = 0,0759 m^2$ z PCM i bez PCM obliczone z powyższych równań przy $\varepsilon = 1$, $T_{inA} = 273,15 + 50 = 323,15 K$, $T_{inA}^* = 273,15 + 40 = 313,15 K$, $T_{inA}^* = 273,15 + 30 = 303,15 K$, są równe:

$$\frac{dQ_r}{d\tau} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S (T_{inA}^4 - T_{ext}^4) = 1,0 \cdot 5,669 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0759 \cdot (323,15^4 - 303,15^4) = 10,581 W \quad (18)$$

$$\frac{dQ_r^*}{dt} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot S(T_{in,A}^{*4} - T_{ext}^4) = 1,0 \cdot 5,669 \cdot 10^{-8} \cdot 0,0759 \cdot (313,15^4 - 303,15^4) = 5,037W \quad (19)$$

Na podstawie powyższych rozważań porównano radiacyjne i niewymuszone konwekcyjne przepływy ciepła od powierzchni asfaltu o emisyjności $\varepsilon = 1$:

$$\frac{Q_r}{Q_c} = 1,018 \text{ i } \frac{Q_r^*}{Q_c^*} = 3,833 \quad (20)$$

Porównanie strumieni energii

Zakładając, że współczynnik emisyjności nawierzchni asfaltowej jest równy $\varepsilon = 1$, a typowe wartości gęstości strumienia energii promieniowania słonecznego w południe latem w Polsce wynoszą $H_p = 800W/m^2$ (w stanie równowagi termicznej) według prawa Stefana-Boltzmana temperatura równowagi jest obliczana jako [20]:

$$T_b = \sqrt[4]{\frac{H_p}{\varepsilon \cdot \sigma}} = \sqrt[4]{\frac{800}{5,669 \cdot 10^{-8}}} = 344,66K = 71,51^\circ C \quad (21)$$

Strumień energii docierający do badanych powierzchni asfaltowych ($S = 0,0759 m^2$) jest równy:

$$\dot{E}_r = \dot{E}_r^* = H_p \cdot S = 60,72W \quad (22)$$

W przybliżeniu można przyjąć, że: $\dot{E}_r \gg \dot{Q}_c > \dot{Q}_{r,b}$, a więc strumienie konwekcyjne i radiacyjne mogą być pominięte. Z punktu widzenia temperatury powierzchni to założenie jest korzystne, ponieważ w rzeczywistości te strumienie dodatkowo chłodzią nawierzchnię.

Ciepło zaabsorbowane i ogrzewające asfalt

Według bilansu energii (2) i przy założeniu, że $R = R^*$, $T = T^*$ oraz $E = E^*$, gdyż wartość tych strumieni energii nie zależy od obecności PCM w powierzchni asfaltowej, strumienie ciepła ogrzewające nawierzchnię wynoszą:

$$Q = E - Q_c - Q_r \text{ i } Q^* = E^* - Q_c^* - Q_r^* \quad (23)$$

Uwzględniając Q i Q^* według zależności (23) oraz masę asfaltu m_A [kg], czystego kruszywa (ECA) m_{ECA} [kg], m_{PCM} [kg] oraz początkową temperaturę $t_{ini} = t_{ini}^*$ i końcową temperaturę asfaltu ($t_{fin,A}^*$, $t_{fin,A}^*$), ECA ($t_{fin,ECA}^*$, $t_{fin,ECA}^*$) oraz PCM ($t_{fin,PCM}^*$), możemy zapisać zależności dla dwóch wariantów wykonanych i poddanych badaniu laboratoryjnym i w warunkach rzeczywistych powierzchni:

• bez PCM:

$$Q = m_A \cdot c_{p,A}(t_{fin,A} - t_{ini}) + m_{ECA} \cdot c_{p,ECA}(t_{fin,ECA} - t_{ini}) \quad (24)$$

• z wykorzystaniem PCM:

$$Q_r^* = m_A \cdot c_{p,A}(t_{fin,A}^* - t_{ini}) + m_{ECA} \cdot c_{p,ECA}(t_{fin,ECA}^* - t_{ini}) + m_{PCM} \cdot c_{p,PCM}(t_{fin,PCM} - t_{ini}) + m_{PCM} \cdot r_{PCM} \quad (25)$$

Porównując równania (23), (24) i (25) oraz pomijając konwekcyjne i radiacyjne strumienie ciepła, otrzymujemy:

$$m_A \cdot c_{p,A}(t_{fin} - t_{fin,A}^*) - m_{ECA} \cdot c_{p,ECA}(t_{fin,ECA}^* - t_{fin,ECA}) - m_{PCM} \cdot r_{PCM} = 0 \quad (26)$$

Przy założeniu: $t_{fin,A} \approx t_{fin,ECA} = t_{fin}$ and $t_{fin,A}^* \approx t_{fin,ECA}^* = t_{fin}^*$, uproszczona zależność, opisująca obniżenie temperatury

powierzchni asfaltu dzięki zastosowaniu kruszywa modyfikowanego, w funkcji udziału masy PCM ma postać [14]:

$$t_{fin} - t_{fin}^* = \frac{m_{PCM} \cdot r_{PCM}}{m_A \cdot c_{p,A} + m_{ECA} \cdot c_{p,ECA}} [K] \quad (27)$$

Przegrzewanie się nawierzchni asfaltowej

Temperatura nawierzchni asfaltowej w upalny dzień zgodnie z równaniem (21) może osiągnąć temperaturę powyżej $71^\circ C$, co po przekroczeniu temperatury mięknięcia asfaltu, może stanowić poważny problem ze względów na obniżenie trwałości nawierzchni oraz bezpieczeństwo użytkowników dróg. Dodatkową istotną kwestię stanowią problemy środowiskowe, spowodowane zwiększoną emisją z asfaltu szkodliwych, lotnych substancji organicznych [13].

Konstrukcja nawierzchni asfaltowej zazwyczaj składa się z kilku warstw, tj. warstwy mrozoochronnej, ulepszonego podłoża, podbudowy dolnej (najczęściej z kruszywa łamanego), podbudowy górnej (asfaltowej), warstwy wiążącej i warstwy ścieralnej. Najczęściej konstrukcja drogi składa się z co najmniej 3 warstw, z czego dwie warstwy stanowi mieszanka mineralno-asfaltowa. W celu przeprowadzenia badań zbudowano stanowisko pomiarowe obejmujące dwa modele nawierzchni (zasadniczy i kontrolny). Jeden model zawierał warstwę kruszywa modyfikowanego materiałem zmiennofazowym (cerezyna), natomiast drugi zawierał kruszywo bez cerezyny i służył jako punkt odniesienia.

Lekkie kruszywo jako nośnik materiału zmiennofazowego (PCM)

Lekkie kruszywo budowlane może spełniać rolę nośnika materiału zmiennofazowego, głównie ze względu na jego porowatość. Do badań jako nośnik cerezyny wykorzystano produkowany w Polsce Pollytag.

Kruszywo to jest wytwarzane z popiołów lotnych elektrociepłowni o uziarnieniu do 0,5 mm. W celu uzyskania porowatej, dobrze rozwiniętej powierzchni granulek, do sproszkowanego popiołu wymagane jest dodawanie miazgi węglowej i bentonitu. W rezultacie gotowy produkt ma gęstość nasypową w stanie luźnym powietrzno-suchym 650-850 kg/m³ (w zależności od frakcji), a gęstość pozorną ziaren kruszywa wynosi ok. 1,45 g/cm³. Wytrzymałość ziaren na miążdżenie dochodzi do 10 MPa (W zależności od optymalizacji procesu technologicznego wytrzymałość ta może zostać zwiększona, lecz działanie takie wymaga dodatkowych badań w tym zakresie). Porowatość ziaren wynosi około 40%, jamistość stosu okruszowego mieszanki 4 – 12 mm w stanie luźnym około 45% i stanie zagęszczonym około 37%. Nasiąkliwość 20% ± 4% po 30 minutach i 22% ± 4% po 24 godzinach, wskaźnik ścieralności ok. 30%, mrozoodporność < 5 % ubytku masy, żaroodporność 3% ubytku masy po 5 cyklach. Promieniotwórczość naturalna jest poniżej poziomu dopuszczalnego w przypadku materiałów stosowanych w budownictwie obiektów przeznaczonych do stałego pobytu ludzi. Przybliżony skład chemiczny: SiO₂ – 58%, Al₂O₃ – 22%, CaO – 2,2%, MgO – 1,4%, SO₃ – 0,3%, straty prażenia – do 4%, nieoznaczone – 3,8%.

Wyróżnia się trzy główne frakcje kruszywa:

- frakcja o średnicy ziaren od 6 do 12 mm – do produkcji betonów jamistych, lekkich bloczków i dyli betonowych oraz wylewek termoizolacyjnych na stropach. Stosuje się także w ogrodnictwie i małej architekturze, w przemyśle metalurgicznym oraz jako zasypki przy ściankach szczelnych i murach oporowych. Przeznaczony jest również na drenaże. Gęstość nasypowa kruszywa w stanie luźnym wynosi około 760 kg/m³.
- średnia frakcja o średnicy ziaren 4 - 8 mm – do produkcji drobnowymiarowych prefabrykatów betonowych o cienkich ściankach jak: pustaki stropowe, pustaki ścienne, pustaki ogrodowe, itp. oraz w połączeniu z innymi frakcjami do produkcji betonów konstrukcyjnych. Gęstość nasypowa kruszywa w stanie luźnym wynosi około 750 kg/m³.
- drobna frakcja o rozmiarze ziaren od 0,5 - 2 mm i 2 - 4 mm do produkcji betonów i kształtek żaroodpornych, a w kompozycji z grubszymi frakcjami do wylewania lekkich betonów zwartych oraz półzwartych. Gęstość nasypowa kruszywa w stanie luźnym wynosi około 720 kg/m³ [21].

Eksperyment

Przygotowanie kruszywa – nośnika materiału zmienno-fazowego

Przygotowanie kruszywa polegało na nasyceniu jego porów materiałem zmienno-fazowym (cerezyną). Proces ten przebiegał następująco:

- zważenie odpowiedniej ilości lekkiego kruszywa budowlanego,
- dodanie kruszywa do roztopionego materiału zmienno-fazowego,
- mieszanie kruszywa i cerezyny w temperaturze około 90°C przez około 1h w celu dokładnego wypełnienia porów ziaren materiałem zmienno-fazowym,
- odsączenie kruszywa z nadmiaru cerezyny,
- wygrzewanie w suszarce w celu usunięcia nadmiaru cerezyny z powierzchni ziaren.

Następnie określono masę zaabsorbowanej cerezyny. Wielkość absorpcji wynosiła około 20%. Wygląd ziaren lekkiego kruszywa bez materiału PCM oraz wysyconego materiałem PCM przedstawiono poniżej (rysunek 5).



Rys. 5. Ziarna kruszywa A – niemodyfikowanego PCM, B – nasyczonego PCM

Stanowiska badawcze

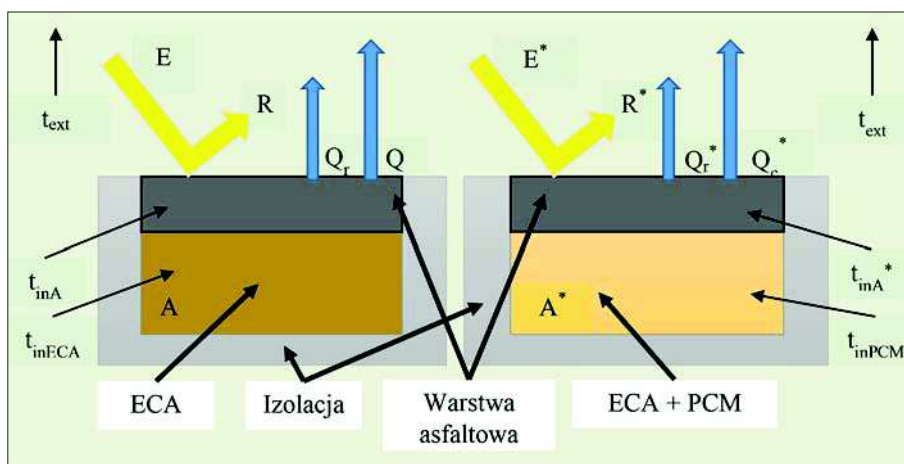
W celu zbadania akumulacji ciepła przez lekkie kruszywo budowlane nasączone cerezyną zbudowano stanowisko badawcze, którego schemat przedstawia rysunek 6. Stanowisko to symuluje zachowanie nawierzchni asfaltowej narażonej na oddziaływanie warunków atmosferycznych, w tym w szczególności promieniowania słonecznego. Jedna

z prób badawczych została przygotowana z użyciem lekkiego kruszywa budowlanego niemodyfikowanego materiałem zmienno-fazowym (PCM), natomiast druga zawierała kruszywo nasączone PCM.

Przygotowanie stanowisk badawczych

Przygotowano stanowisko, składające się z dwóch próbek badawczych (właściwej i kontrolnej – odniesienia). W pierwszej 1m³ kruszywa niemodyfikowanego cerezyną zmieszano z mieszanką mineralno-asfaltową w stosunku 1 : 1, co stanowiło dolną warstwę nawierzchni drogi asfaltowej i było punktem odniesienia do drugiej, tak samo skonstruowanej, ale z użyciem kruszywa zmodyfikowanego PCM. Proporcje jakie dobrano do badań wstępnych miały na celu potwierdzenie możliwości użycia kruszywa, jako nośnika materiału zmienno-fazowego. W przyszłości proporcje kruszywa do mieszanki mineralno-asfaltowej ustalone zostaną na podstawie przeprowadzonych badań wytrzymałościowych oraz doboru odpowiedniej ilości materiału PCM. Na warstwach tych ułożono jednolitą masę czystej mieszanki mineralno-asfaltowej. Warstwy te odizolowano od spodu i z boku za pomocą spienionego polistyrenu (rysunek 6).

Do budowy stanowiska badawczego użyto łącznie 25 kg mieszanki mineralno-asfaltowej (po 12,5 kg na każdą próbkę). Stanowisko wyposażono w czujniki temperatury. Wszystkie zainstalowane czujniki podłączono do dwóch 8-kanalowych modułów termometrycznych AVT570, które zapewniały odczyt danych z rozdzielczością 0,1 K i dokładnością do 0,25 K w zakresie temperatury od 0 do 80°C. Dane były rejestrowane



Rys. 6. Schemat stanowiska pomiarowego

ne przy wykorzystaniu specjalnie opracowanego programu komputerowego, który umożliwił ich dalszą analizę. Pomiar przeprowadzono w ciągu 4 dni, 24 godziny na dobę.

Weryfikacja założeń teoretycznych

W celu zweryfikowania poprawności założeń teoretycznych i potwierdzenia użyteczności materiału zmiennofazowego jako akumulatora ciepła w nawierzchni asfaltowej zebrano całość danych ze stanowiska badawczego. Właściwości charakterystyczne użytych materiałów zestawiono w tabeli 1.

Próbkę materiału zmiennofazowego oraz kruszywa modyfikowanego i niemodyfikowanego materiałem zmiennofazowym analizowano za pomocą różnicowej kalorymetrii skaningowej (DSC) TA Q20 firmy TA Instruments. Urządzenie to umożliwia rejestrację w szerokim zakresie temperatur, od -90 do 450°C. Cerezyną oraz kruszywa badano w zakresie temperatury od 10 do 90°C, co pozwoliło uzyskać informacje na temat typowych właściwości termofizycznych danego materiału. Wyniki analizy DSC kruszywa, kruszywa modyfikowanego PCM oraz cerezyny przedstawiono na rysunku 7.

Pojemność cieplna kruszywa nasączonego cerezyną jest niższa niż w przypadku czystej cerezyny, ponieważ kruszywo

zawiera 20% wagowo cerezyny, nadal wykazując dobre możliwości akumulowania ciepła. Podstawiając wartości parametrów fizykochemicznych (tabela 1) oraz obliczoną wartość ciepła utajonego r_{PCM} do równania (27), gdzie $m_{PCM} = 0,4\text{kg}$, $r_{PCM} = 80\text{kJ/kg}$, $m_A = 12,5\text{kg}$, $c_{p,A} = 0,92\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$, $m_{ECA} = 1,38\text{kg}$, $c_{p,ECA} = 0,84\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$, otrzymujemy przewidywaną różnicę temperatury nawierzchni asfaltowej z kruszywem modyfikowanym cerezyną i nawierzchni porównawczej bez cerezyny:

$$\Delta t_{fin} = t_{fin} - t_{fin}^* = 2,53\text{ K}$$

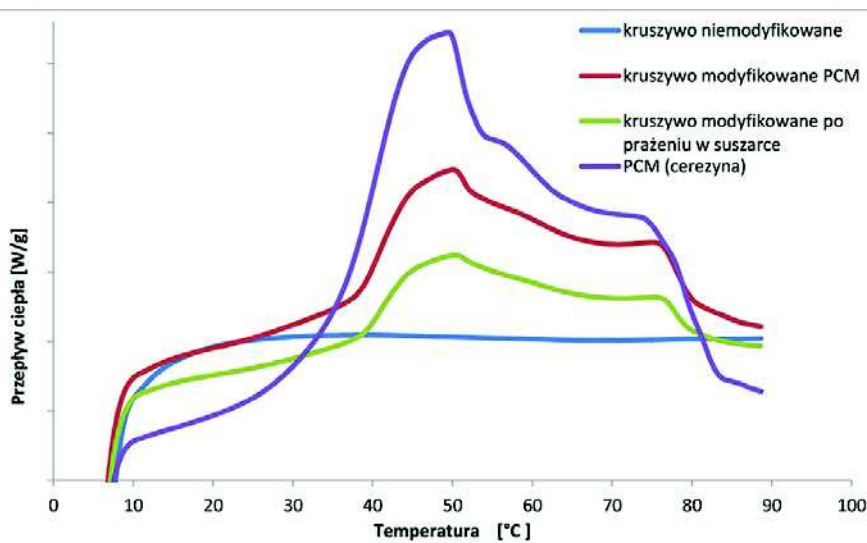
Celem zbudowania stanowiska badawczego i przeprowadzenia na nim eksperymentalnych badań w warunkach rzeczywistych i laboratoryjnych było zweryfikowanie poprawności teoretycznie wyznaczonej różnicy temperatury.

Wyniki badań eksperymentalnych i ich analiza

Badania zostały przeprowadzone w lipcu 2014 roku. Na rysunku 8 zaprezentowano wyniki uzyskane na stanowisku pomiarowym w trakcie 4 słonecznych dni w okresie 8-11 lipiec 2014 r. Temperatura niemodyfikowanej warstwy przekroczyła 66°C przy największym nasłonecznieniu. We wszystkich przypadkach okazało się, że dodatek cerezyny obniża temperaturę nawierzchni w porównywaniu z temperaturą nawierzchni kontrolnej.

Rysunek 9 przedstawia graficzne zestawienie różnic temperatur pomiędzy warstwami mieszanki mineralno-asfaltowej i warstwami kruszywa z dwóch stanowisk. Uzyskano dobrą powtarzalność wyników w kolejnych dniach prowadzenia badań oraz na wyraźne obniżenie temperatury warstwy asfaltowej oraz kruszywa w wyniku działania cerezyny w południe, przy największej intensywności promieniowania słonecznego. Maksymalne obniżenie temperatury wyniosło 5,9°C w przypadku warstwy modyfikowanej kruszywem nasączonym PCM i 4,6°C w samym kruszywie nasączonym PCM.

W tabeli 2 przedstawiono maksymalne wartości temperatury asfaltu i kruszywa uzyskane w przebiegu eksperymentu. Z uwagi na fakt, że zaproponowana metoda pomiaru prowadzona była w identycznych warunkach na dwóch takich samych modelach nawierzchni, różniących się tylko brakiem lub obecnością cerezyny w lekkim kruszywie budowlanym, błędy niepewności związane ze zmiennością warunków pogodowych i ich wpływ na otrzymane wyniki mogą być pominięte. Błędy pomiarów mogą wynikać jedynie ze znaną dokładnością czujników temperatury (0,25 K).

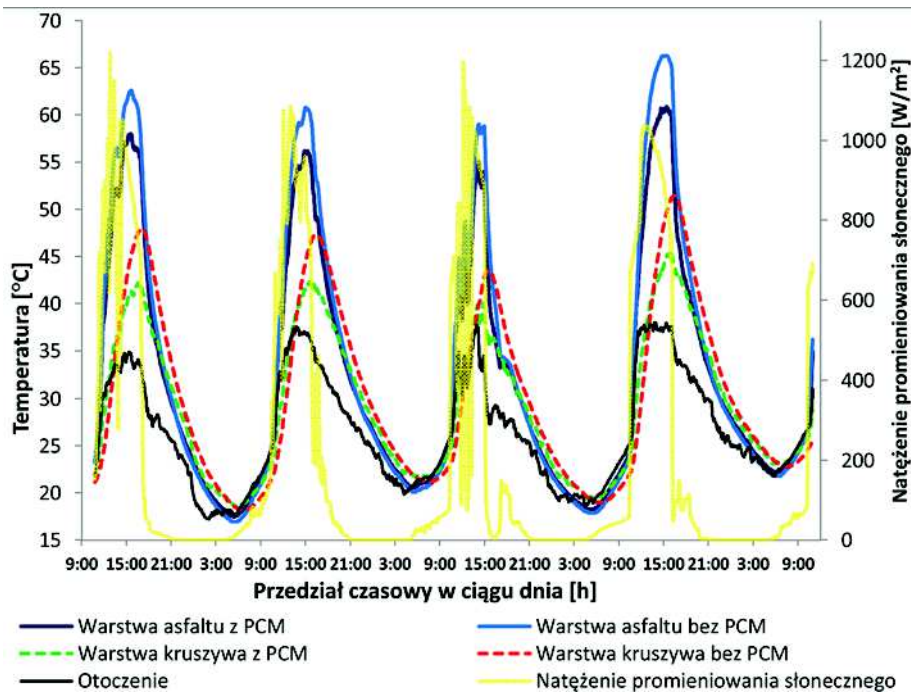


Rys. 7. Wynik analizy DSC: Cerezyna (PCM), kruszywo niemodyfikowane (ECA), kruszywo nasączone cerezyną (ECA+PCM) oraz kruszywo modyfikowane cerezyną po prażeniu w suszarce (ECA po prażeniu)

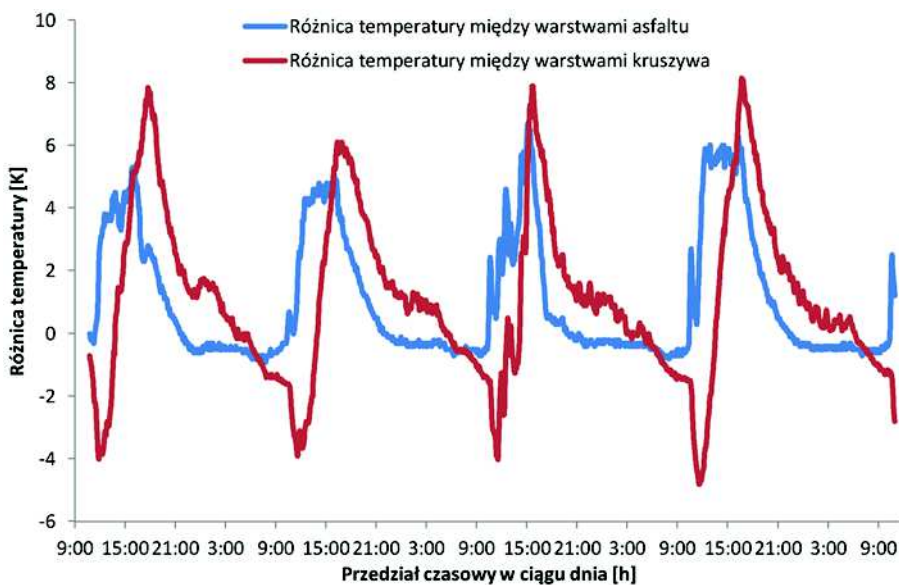
Tabela 1. Charakterystyczne właściwości termofizyczne materiałów wykorzystywanych w stanowisku pomiarowym [7], [9]

Materiał	Temperatura topnienia t_m	Ciepło właściwe C_p	Gęstość ρ	Gęstość nasypowa P_{nb}	Współczynnik przewodności cieplnej λ
	[°C]	[kJ/ (kg·K)]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[W/(m·K)]
Kruszywo	–	0,84	1380	710±15%	0,14
MMA	–	0,92	1750	–	0,17
PCM	61-78	2,3	800-947*	475	0,25

* W temperaturze $t = 50^\circ\text{C}$ frakcja ciekła $\rho = 0,800$ [kg/m³] i frakcja stała $\rho = 0,947$ [kg/m³].



Rys. 8. Dane z dwóch stacji pomiarowych, uzyskane w okresie 4 dni pomiarowych od 08.07.2014 r. do 11.07.2014 r.



Rys. 9. Różnica temperatur między warstwami asfaltu i kruszywa z i bez cerezyny, uzyskane w okresie 4 dni pomiarowych na dwóch stanowiskach

Tabela 2. Maksymalne temperatury zarejestrowane w trakcie badań

Data/czas	Temperatura [°C]				Otoczenie	Δt_A [°C]	Δt_{ECA} [°C]
	Stanowisko pomiarowe 1 (odniesienia)		Stanowisko pomiarowe 2 (ECA + PCM)				
	Asfalt	ECA	Asfalt	ECA			
2014-07-08 15:41	62,6	45,4	57,8	41,3	35	4,8	4,1
2014-07-09 15:26	60,5	45,9	55,8	42,1	37	4,7	3,9
2014-07-10 14:20	58,5	40,3	52,8	37,8	34	5,7	2,6
2014-07-11 15:07	66,3	48,9	60,4	44,3	38	5,9	4,6

Δt_A – różnica temperatury pomiędzy zmodyfikowaną a niemodyfikowaną warstwą asfaltową
 Δt_{ECA} – różnica temperatury pomiędzy zmodyfikowaną a niemodyfikowaną warstwą kruszywa (ECA)

Na podstawie zebranych danych można stwierdzić, że zastosowanie kruszywa modyfikowanego cerezyną jako jednej z warstw nawierzchni drogi ma duży wpływ na temperaturę warstwy narażonej na działanie promieniowania słonecznego. Zastosowanie odpowiedniej ilości PCM pozwala na obniżenie temperatury o kilka stopni, a tym samym zapobiega przegrzaniu nawierzchni asfaltowej. Uzyskane w toku eksperymentu wartości obniżenia temperatury w wyniku modyfikacji nawierzchni asfaltowej poprzez zastosowanie materiału zmiennofazowego (cerezyny) są większe od przewidywanych w wyniku rozważań teoretycznych. Może to być spowodowane zastosowaniem założeń upraszczających, w tym wyeliminowanie w obliczeniach ciepła wymienianego na drodze konwekcji i promieniowania.

Podsumowanie

W artykule zostały przedstawione wyniki badań dotyczące stabilizowania temperatury nawierzchni asfaltowej, dzięki zastosowaniu kruszywa nasyczonego cerezyną. Kruszywo służyło w tym przypadku jako nośnik materiału zmiennofazowego i stanowiło podbudowę nawierzchni. Z przeprowadzonych badań wynika, że istnieje możliwość wprowadzenia nowego rozwiązania opartego na wykorzystaniu lekkiego kruszywa modyfikowanego odpowiednim materiałem zmiennofazowym (PCM). Przeprowadzone pomiary temperatury potwierdziły skuteczność tego rozwiązania. Stwierdzono zauważalne różnice pomiędzy nawierzchnią warstwy asfaltowej modyfikowanej materiałem PCM a nawierzchnią drogi bez tej modyfikacji. Różnica temperatury nie przekracza 6°C, jednak z przeprowadzonych rozważań teoretycznych oczekiwano niższej różnicy temperatury. Obniżenie temperatury o około 6°C jest możliwe dzięki zastosowaniu 20% wagowych cerezyny (PCM) w stosunku do masy zastosowanego lekkiego kruszywa budowlanego. W odniesieniu do całkowitej masy kruszywa i mieszanki mineralno asfaltowej udział PCM wynosi zaledwie 3%. W związku z powyższym można stwierdzić, że dodatek niewielkiej ilości cerezyny zapewnia dostateczne obniżenie temperatury asfaltu w upalne dni.

Należy prowadzić dalsze badania z użyciem większego dodatku materiału zmienno-fazowego. Byłoby to możliwe przez zastosowanie kruszywa o większej porowatości ziaren bądź przez wprowadzenie PCM bezpośrednio do mieszanki mineralno-asfaltowej.

Bibliografia

- [1] P. Lamberg, R. Lehtiniemi, and A.M. Henell, "Numerical and experimental investigation of melting and freezing processes in phase change material storage," *Int. J. Therm. Sci.*, vol. 43, no. 3, pp. 277–287, Mar. 2004
- [2] M. Zwolińska and A. Bogdan, "Związki zmienno-fazowe w zastosowaniach techniczno-użytkowych i ergonomicznych," *Ergonomia*, vol. 4, pp. 22–25, 2012
- [3] G. Zhou, Y. Zhang, X. Wang, K. Lin, and W. Xiao, "An assessment of mixed type PCM-gypsum and shape-stabilized PCM plates in a building for passive solar heating," *Sol. Energy*, vol. 81, no. 11, pp. 1351–1360, Nov. 2007
- [4] Y. Zhang, K. Lin, Y. Jiang, and G. Zhou, "Thermal storage and nonlinear heat-transfer characteristics of PCM wallboard," *Energy Build.*, vol. 40, no. 9, pp. 1771–1779, Jan. 2008
- [5] M. A. Izquierdo-Barrientos, J. F. Belmonte, D. Rodríguez-Sánchez, A. E. Molina, and J. A. Almendros-Ibáñez, "A numerical study of external building walls containing phase change materials (PCM)," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 47, pp. 73–85, Dec. 2012
- [6] D. I. I. Sybilski, *Wymagania Techniczne Nawierzchnie Asfaltowe Drogowe i Lotniskowe, WT Nawierzchnie Asfaltowe DiL – 2007*. Warszawa, 2007
- [7] Q. Xue, L. Liu, Y. Zhao, Y.-J. Chen, and J.-S. Li, "Dynamic behavior of asphalt pavement structure under temperature-stress coupled loading," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 53, no. 1, pp. 1–7, Apr. 2013
- [8] Z. Suo and W. G. Wong, "Nonlinear properties analysis on rutting behaviour of bituminous materials with different air void contents," *Constr. Build. Mater.*, vol. 23, no. 12, pp. 3492–3498, Dec. 2009
- [9] P. Mackiewicz, "Thermal stress analysis of jointed plane in concrete pavements," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 73, no. 1, pp. 1169–1176, Dec. 2014
- [10] M. M. Farid, A. M. Khudhair, S. A. K. Razack, and S. Al-Hallaj, "A review on phase change energy storage: materials and applications," *Energy Convers. Manag.*, vol. 45, no. 9–10, pp. 1597–1615, Jun. 2004
- [11] B. Zalba, J. M. Marín, L. F. Cabeza, and H. Mehling, "Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 251–283, Feb. 2003
- [12] A. Melcer, E. Klugmann-Radziemska, and W. M. Lewandowski, "Materiały zmienno-fazowe. Właściwości, klasyfikacja, zalety i wady," *Przem. Chem.*, vol. 7, pp. 1000–1011, 2012
- [13] A. M. Kitto, M. Pirbazari, B. N. Badriyha, V. Ravindran, R. Tyner, and C. E. Synolakis, "Emissions of Volatile and Semi-Volatile Organic Compounds and Particulate Matter from Hot Asphalts," *Environ. Technol.*, vol. 18, no. 2, pp. 121–138, 1997
- [14] M. Ryms, W. M. Lewandowski, E. Klugmann-Radziemska, H. Denda, and P. Wcisło, "The use of lightweight aggregate saturated with PCM as a temperature stabilizing material for road surfaces," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 81, pp. 313–324, 2015
- [15] W. M. Lewandowski, M. Ryms, H. Denda, and E. Klugmann-Radziemska, "Possibility of thermal imaging use in studies of natural convection heat transfer on the example of an isothermal vertical plate," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 78, pp. 1232–1242, 2014
- [16] W. M. Lewandowski, M. Ryms, and H. Denda, "A new simple method for determining the heat losses from buildings. Energy Buildings (in Review) 2014," *energy Build*
- [17] W. M. Lewandowski and W. Lewandowska-Iwaniak, "The external walls of a passive building: A classification and description of their thermal and optical properties," *Energy Build.*, vol. 69, pp. 93–102, Feb. 2014
- [18] "Technical Support Emissivity in the Infrared. Optotherm. <http://www.optotherm.com/emiss-table.htm> (21.06.2014)."
- [19] "Table of emissivity of various surfaces, Mikron Instrument Company Inc. Vertretung Schweiz. www.transmetra.ch (21.06.2014)."
- [20] W. M. Lewandowski, *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, IV. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo - Techniczne, 2007
- [21] "www.pollytag.com.pl." [Online]. Available: <http://www.pollytag.com.pl>



Na Wydziale Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej organizowane są Studia Podyplomowe „Eksploracja i Utrzymanie Dróg”, których zakres tematyczny opracowany został wspólnie z Instytutem Dróg i Mostów oraz Generalną Dyrekcją Dróg Krajowych i Autostrad.

Pierwsza edycja dwusemestralnych Studiów Podyplomowych rozpocznie się w październiku 2015 r. Obecnie trwa nabór kandydatów na Studia Podyplomowe.

Celem Studiów jest dostarczenie uczestnikom aktualnej wiedzy z zakresu eksploatacji i utrzymania dróg, w szczególności dotyczącej:

- diagnostyki nawierzchni drogowej
- technologii wzmocnień i remontów nawierzchni drogowych
- utrzymania bieżącego dróg
- zarządzania ruchem drogowym
- systemów zarządzania drogami
- diagnostyki i utrzymania obiektów mostowych
- wyposażenia dróg i jego utrzymania

Obecnie po okresie budowy i przebudowy dróg na skalę niespotykaną w Europie, istnieje potrzeba aktualizacji wiedzy kadry administracyjnej, projektowej i wykonawczej zatrudnionej przy eksploatacji i utrzymaniu dróg.

Zajęcia na Studiach prowadzą wysokiej klasy specjaliści z wyższych uczelni, instytutów badawczych oraz przedstawiciele z najlepszych firm projektowych i wykonawczych:

- Politechnika Warszawska, m.in.: prof. dr hab. inż. Piotr Radziszewski
prof. dr hab. inż. Jerzy Piłat
prof. dr hab. inż. Henryk Zobel
prof. dr hab. inż. Wojciech Radomski
prof. dr hab. inż. Tadeusz Sandecki
prof. dr hab. inż. Antoni Kuchler
prof. dr hab. inż. Piotr Olszewski
- Instytut Badawczy Dróg i Mostów, m.in.: prof. dr hab. inż. Leszek Rafalski
mgr inż. Tomasz Mechowski
- Instytut Badań Technicznych TPA: dr inż. Igor Ruttmar
- Transprojekt Warszawa: dr inż. Tadeusz Suwara
- Heller Ingenieuresellschaft: dr inż. Sławomir Heller

Studia przeznaczone są dla kadry administracji drogowej, pracowników ministerstwa, Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, Zarządów Dróg Samorządowych, firm związanych z budownictwem drogowym, pracowników uczelni technicznych i szkół zawodowych.

Szczegółowe informacje o Studiach Podyplomowych „Eksploracja i Utrzymanie Dróg” znajdują się na stronie internetowej: www.speiid.pw.edu.pl.