PROGNOZOWANIE EFEKTYWNOŚCI HYDROFOBIZACJI CEGŁY CERAMICZNEJ W OPARCIU O ANALIZĘ STATYSTYCZNĄ

[1]Danuta Barnat-Hunek, [2]Piotr Smarzewski
Politechnika Lubelska
Wydział Budownictwa i Architektury, ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin
[1]Katedra Budownictwa Ogólnego, e-mail: d.barnat-hunek@pollub.pl
[2]Katedra Konstrukcji Budowlanych, e-mail: p.smarzewski@pollub.pl

Streszczenie:
Jednym ze sposobów ograniczania destrukcyjnego wpływu wody na obiekty budowlane jest hydrofobizacja. W pracy podjęto próbę oceny skuteczności działania preparatów hydrofobowych opartych na związkach krzemoorganicznych poprzez analizę statystyczną wyników badań. Materiał badawczy stanowiła cegła ceramiczna pełna. Doświadczenia przeprowadzono na podstawie zaleceń instrukcji ZUAT-15/VI.ll-2/2001.
Analizę statystyczną wyników badań nasiąkliwości powierzchniowej oraz wskaźnika absorpcji kropli wody przeprowadzono przy użyciu programu *Statistica*. Ze względu na dużą ilość zmiennych parametrów tj. różnorodność materiału badawczego, preparatów hydrofobowych i warunków przechowywania, przeprowadzono analizy statystyczne m.in. testy t-Studenta, Shapiro-Wilka, Levene'a, Browna-Forsythe'a, NIR oraz analizy regresji i wariancji ANOVA. Analizy pozwoliły na sformułowanie wniosków dotyczących skuteczności hydrofobizacji cegły ceramicznej.

Słowa kluczowe: hydrofobizacja, cegła ceramiczna, nasiąkliwość, wskaźnik absorpcji wody

Wstęp

Woda we wszystkich jej postaciach: pary, cieczy, lodu jest czynnikiem powodującym największe zagrożenie dla obiektów budowlanych, zwłaszcza murowanych. Jej obecność działa destrukcyjnie na materiały budowlane. Umożliwia niszczenie na drodze procesów chemicznych, biologicznych oraz fizycznych, występujących często we wzajemnym powiązaniu. Szczególnie groźnym zjawiskiem jest korozja mrozowa, przejawiająca się mechanicznym uszkodzeniem, spękaniem materiałów budowlanych, do którego dochodzi w wyniku zwiększania objętości wody podczas jej zamarzania (Rusin 2002). Wynikiem nadmiernego zawilgocenia ścian jest obniżenie wytrzymałości na ściskanie zarówno cegły, jak i zaprawy. Spadek wytrzymałości na ściskanie zachodzi przede wszystkim w wyniku rozpuszczenia się więzi między kryształkami sieci strukturalnej. Zawilgocenie przegrody powoduje podwyższenie jej przewodności cieplnej, co

skutkuje stratami ciepła oraz możliwością przemarzania (Ali i in. 2005). Oddziaływanie wód opadowych w równie dużym stopniu jak podciąganie kapilarne wody z gruntu, powoduje dezintegrację materiałów budowlanych, gdyż zwiększają one gradient wilgotności materiału. W konsekwencji powstają dodatkowe naprężenia, które obniżają trwałość obiektu. Zanieczyszczenia atmosfery mają najczęściej kwaśny charakter. Woda opadowa tworzy rozcieńczone roztwory, które trawią minerały skałotwórcze lub zwiększają ich rozpuszczalność (Łukaszewicz 2002, Wesołowska 2006). Na działanie wód opadowych szczególnie narażone są elementy konstrukcyjne, których nie można osłonić zadaszeniem oraz ściany - ze względu na zacinanie deszczu i śniegu. Trwałość konstrukcji w dużym stopniu zależy od prawidłowo wykonanej ochrony przeciwwilgociowej. W takim przypadku prawidłowym sposobem ochrony elementów przed wpływem wód opadowych jest zabieg hydrofobizacji (Domasłowski 1993). Celem jej jest nadanie powierzchniom materiałów właściwości odpychania cząsteczek wody. Wiąże się to ze zwiększeniem granicznego napięcia powierzchniowego pomiędzy wodą, a materiałem impregnowanym odpowiednim preparatem.

Hydrofobizacja stosowana jest do ochrony przed zawilgoceniem obiektów budowlanych narażonych na periodyczne oddziaływanie wody pochodzącej z opadów atmosferycznych. Nie zabezpiecza obiektów przed wodą działającą pod ciśnieniem hydrostatycznym np. napierającą wodą gruntową. Hydrofobizacja stosowana jest również jako zabezpieczenie muru przed wietrzeniem (Barnat – Hunek 2010). Ponadto impregnacja hydrofobizująca ogranicza zanieczyszczenie elewacji, powoduje wzrost odporności muru na ścieranie oraz pylenie, co podwyższa estetykę obiektu. Zaletą hydrofobizacji jest fakt, że zabezpieczaniu można poddać zarówno konstrukcję nowo wznoszoną, jak i dłuższy czas eksploatowaną oraz remontowaną. Jej skuteczność jest szacowana na kilka lat.

Preparaty hydrofobowe tworzą na powierzchni materiału budowlanego cienką, trudno zwilżalną warstwę. Powłoka pokrywa ścianki porów, nie wypełniając ich objętości. Dzięki temu materiał poddany hydrofobizacji nie traci zdolności dyfuzji gazów i pary wodnej, co umożliwia wysychanie muru oraz zachowanie dobrego mikroklimatu pomieszczenia.

Obecnie produkowane impregnaty są najczęściej pochodnymi związków krzemoorganicznych i stanowią ważną gałąź chemii budowlanej. Rynek oferuje bardzo szeroki asortyment środków hydrofobowych, różniących się składem chemicznym i skutecznością. Dlatego przed wyborem rodzaju preparatu konieczna jest analiza efektywności hydrofobizacji zabezpieczonej powierzchni.

W pracy podjęto próbę oceny skuteczności działania preparatów hydrofobowych opartych na związkach krzemoorganicznych. Jako materiał badawczy użyto cegłę ceramiczną pełną. Doświadczenia przeprowadzono na podstawie zaleceń instrukcji ZUAT-15/VI.ll-2/2001. Analizy statystyczne wykonano za pomocą programu *Statistica*.

Metodyka badawcza

Przedmiotem hydrofobizacji była cegła ceramiczna pełna o zróżnicowanych parametrach, mających wpływ na efektywność impregnacji, np.: skład chemiczny, struktura i jakość materiału. Różnice we właściwościach fizycznych i chemicznych próbek związane są ze źródłem pochodzenia poszczególnych cegieł. Każda cegła została przecięta na trzy równe części. Następnie próbki wysuszono do stałej masy w temperaturze 70 ± 5°C.

Do badań laboratoryjnych wybrano:

- Ahydrosil K - wodny roztwór żywicy metylosilikonowej w wodorotlenku potasu,
- Hydrofob - wodny roztwór na bazie siloksanów.

Analizowano wyniki badań hydrofobizacji Ahydrosilem K o stosunku preparatu do wody wynoszącym 1:5 oraz 1:8.

Dwie zostały zaimpregnowane środkiem hydrofobizującym, a trzecia – wzorcowa, pełniła funkcję porównawczą. Preparat naniesiono pędzlem w dwóch warstwach, stosując metodę „mokre na mokre". Impregnację wykonano na dwóch powierzchniach przeznaczonych odpowiednio do badania nasiąkliwości powierzchniowej i określenia wskaźnika absorpcji kropli wody.

ITB określa zalecenia udzielania aprobat technicznych środkom do hydrofobizacji materiałów ceramicznych w ZUAT-15/VI.11-2/2001 (Krzywobłocka – Laurów). Wstępną ocenę efektu hydrofobizacji przeprowadza się na podstawie zmodyfikowanego testu Nr II 86 według zaleceń RILEM polegającego na określeniu czasu absorpcji kropli wody w hydrofobizowaną powierzchnię o określonej objętości i porównaniu go z czasem wnikania kropli wody w próbkę wzorcową.

Wskaźnik absorpcji kropli wody *WA* [%] określono na podstawie zależności:

$$WA = \left[1 - \frac{t_x - t_n}{t_x}\right] \cdot 100\,\% \tag{1}$$

gdzie: t_x – czas absorpcji w powierzchnię zhydrofobizowaną [min], t_n – czas absorpcji w powierzchnię próbki wzorcowej [min].

Wskaźnik nieprzepuszczalności wody wyznaczono ze wzoru:

$$WR = 100\% - WA. \tag{2}$$

Najważniejszym parametrem ze względu na trwałość powłok hydrofobowych jest nasiąkliwość powierzchniowa n_p [kg/m^2] badana w warunkach zbliżonych do rzeczywistego kontaktu wody opadowej z murem, opisana jako:

$$n_p = \frac{m_w - m_s}{F} \tag{3}$$

gdzie: m_w – masa wilgotnej próbki [kg], m_s – masa suchej próbki [kg], F – powierzchnia próbki stykająca się z wodą [m^2].

Analiza statystyczna wyników badań

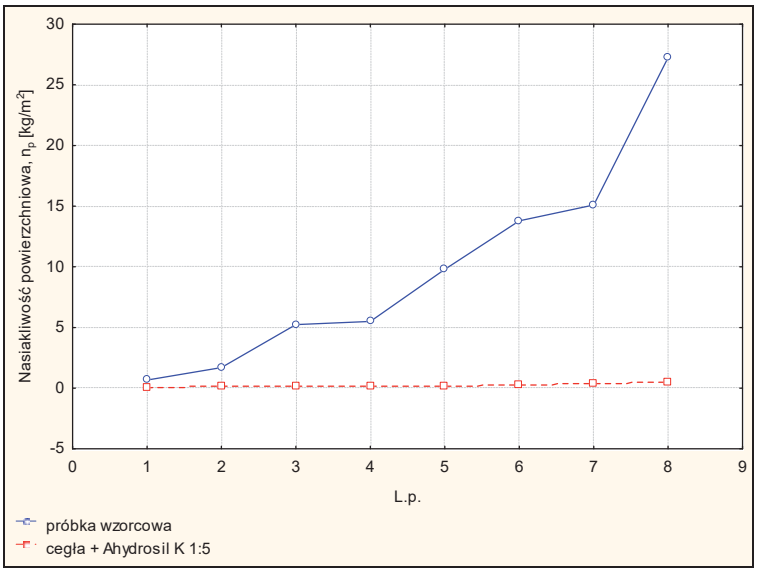
Ze względu na różnorodność materiału badawczego, preparatów i warunków przechowywania wykonano analizy statystyczne, które pozwoliły na prognozowanie skuteczności hydrofobizacji cegły ceramicznej. Wykonano następujące testy:

- t – Studenta, który ma zastosowanie w przypadku, gdy rozkład populacji jest normalny o nieznanej średniej i nieznanym odchyleniu standardowym, natomiast liczebność próby jest mała.
- Shapiro – Wilka przeznaczony do badania normalności rozkładu. Cecha ta wymagana jest przez większość testów parametrycznych.
- Levene'a sprawdza założenie o jednorodności wariancji w grupach. Może być stosowany w przypadku równolicznych grup.
- Browna – Forsythe'a, który ma zastosowanie w przypadku różnej liczebności elementów w grupach (Stanisz, 2006).
- NIR polegający na wyznaczaniu tzw. najmniejszych istotnych różnic. Test ten ujawnia które z n średnich różnią się między sobą, a które są równe. Wynikiem jest macierz wartości p, które wskazują na prawdopodobieństwo popełnienia błędu związanego z przyjęciem hipotezy o istnieniu różnic między parami średnich.
- analiza regresji – czyli dopasowanie linii prostej do zbioru punktów w taki sposób, że suma kwadratów odległości punktów na wykresie rozrzutu od linii regresji będzie minimalna. Linia prosta na płaszczyźnie zdefiniowana jest przez równanie Y = a + bX.
- analiza wariancji ANOVA, której celem jest testowanie różnic pomiędzy średnimi, która sprowadza się do porównania wariancji.

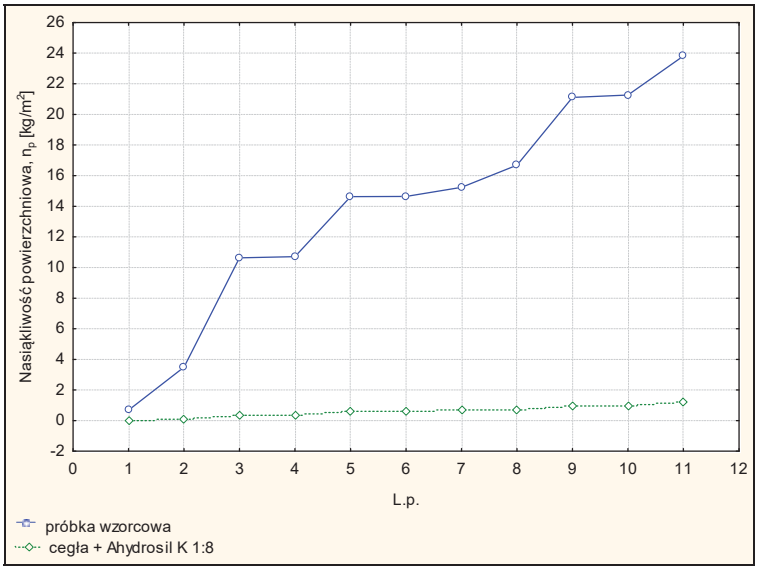
We wszystkich przeprowadzonych testach przyjęto poziom istotności $\alpha = 0.05$ co oznacza, że prawdopodobieństwo popełnienia błędu pierwszego rodzaju wynosi 5%.

Badanie nasiąkliwości powierzchniowej

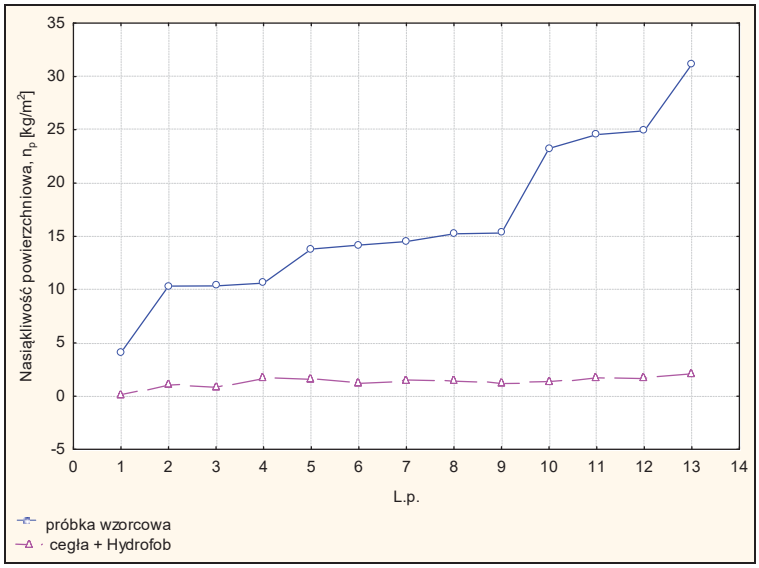
Próbki po zmierzeniu i zważeniu umieszczono w pojemniku z wodą, na dnie którego znajdowała się gąbka. Powierzchnia próbki stykała się z wodą, ale nie była w niej zanurzona. Badanie nasiąkliwości trwało 60 minut. Następnie próbki ponownie ważono określając przyrost masy. Uzyskano nierównomierny rozkład nasiąkliwości powierzchniowej cegieł, świadczący o zróżnicowanych parametrach badanych próbek. Na Rys. 1÷3 przedstawiono wyniki badania nasiąkliwości powierzchniowej.



Rys. 1. Nasiąkliwość powierzchniowa cegły wzorcowej i zabezpieczonej Ahydrosilem K (1:5)



Rys. 2. Nasiąkliwość powierzchniowa cegły wzorcowej i zabezpieczonej Ahydrosilem K (1:8)



Rys. 3. Nasiąkliwość powierzchniowa cegły wzorcowej i zabezpieczonej Hydrofobem

Stwierdzono, że skuteczność hydrofobizacji Hydrofobem oraz Ahydrosilem K o stężeniu 1:5 rośnie wraz ze wzrostem nasiąkliwości powierzchniowej cegły ceramicznej pełnej. Natomiast w przypadku hydrofobizacji Ahydrosilem K o stężeniu 1:8 występuje zależność odwrotna (Tabela 1).

Tab. 1. Efektywność hydrofobizacji

Rodzaj preparatu	Ahydrosil K (1:5)	Ahydrosil K (1:8)	Hydrofob
Efektywność [%]	89.51 – 98.15	94.99 – 98.15	84.45 – 96.65
Średnia efektywność [%]	96.21	95.88	91.49
Odchylenie standardowe [%]	2.88	0.98	3.03
Współczynnik zmienności	0.03	0.01	0.03

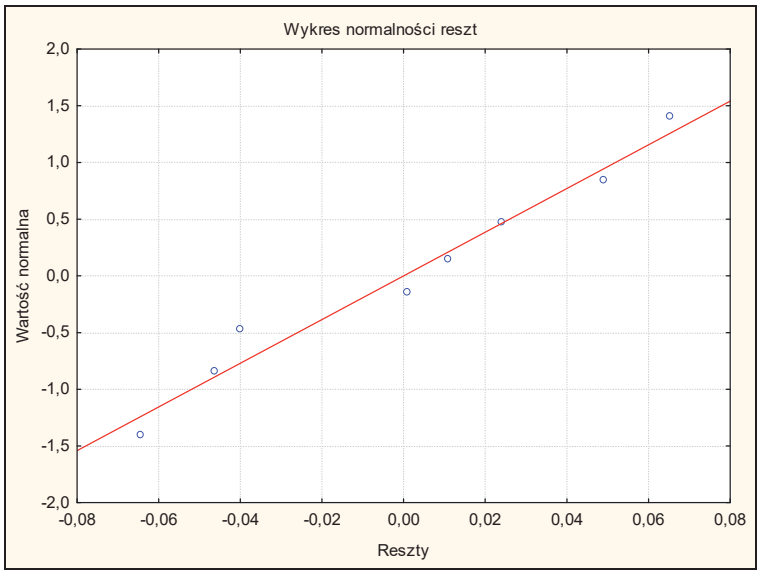
W celu oceny skuteczności hydrofobizacji, w tabeli 2 porównano empiryczne wyniki badań z wymaganiami zawartymi w ZUAT-15/VI.11-2/2001.

Tab. 2. Zestawienie wskaźnika nasiąkliwości powierzchniowej z wymaganiami ZUAT

Rodzaj preparatu	Ahydrosil K (1:5)	Ahydrosil K (1:8)	Hydrofob
Nasiąkliwość powierzchniowa n_p [%]	3.79	4.12	8.51
Wartość n_p [%] wg ZUAT	≤ 8		

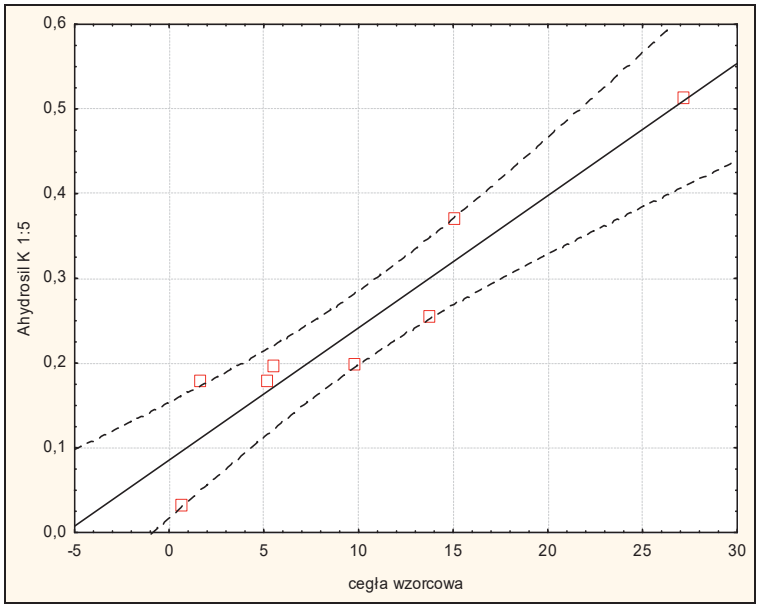
Obliczono wartości statystyki t dla poszczególnych prób i porównano je z wartością t-Studenta przy założonym przedziale ufności dla poszczególnych stopni swobody df. Ustalono, że rozkład zmiennych jest normalny.

Analizując skuteczność hydrofobizacji sprawdzono powiązanie nasiąkliwości powierzchniowej cegły zaimpregnowanej z wzorcową. Stwierdzono, że istnieje taka liniowa zależność. W celu jej określenia wykorzystano równanie regresji. Powyższe założenie weryfikowano przy pomocy wykresu normalności i testu Shapiro – Wilka. Zależność normalności reszt od wyników nasiąkliwości powierzchniowej cegły zabezpieczonej Ahydrosilem K o stężeniu 1:5 pokazano na Rys. 4.



Rys. 4. Normalność reszt a nasiąkliwość powierzchniowa cegły zabezpieczonej Ahydrosilem K (1:5)

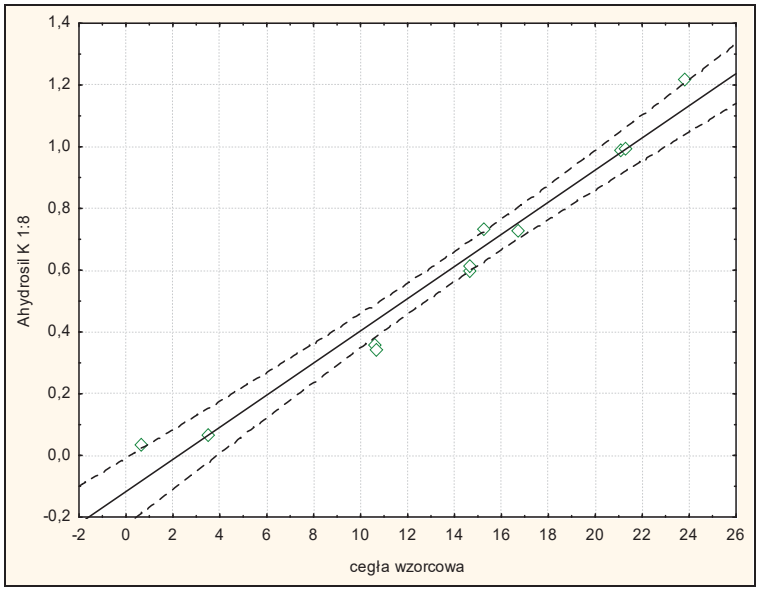
Punkty na wykresie leżą wzdłuż prostej, zatem nie ma podstaw do odrzucenia założenia o rozkładzie normalnym reszt. Test Shapiro – Wilka wykazał wartość p = 0.71, która jest znacznie większa od przyjętej wartości granicznej p = 0.05. Następnie przeprowadzono analizę regresji. Na podstawie wyników stwierdzono, że zbudowany model pozwala wyjaśnić blisko 88% zmienności oryginalnej zmiennej zależnej. Przeciętna różnica między zaobserwowanymi wartościami zmiennej objaśnianej i wartościami teoretycznymi wynosi 0.05 kg/m^2. Poniżej zamieszczono zależność opisującą dopasowany model (Rys. 5).



Rys. 5. Rozrzut i linia regresji z 95% przedziałem ufności – Ahydrosil K (1:5)

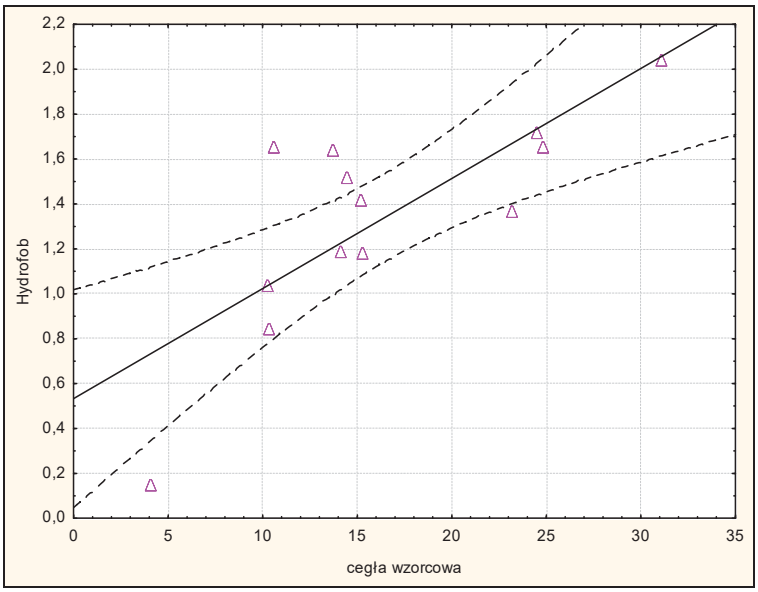
Powyższe analizy statystyczne przeprowadzono dla wyników badań cegły zabezpieczonej Ahydrosilem K o stężeniu 1:8 i Hydrofobem.

Na podstawie analizy statystycznej wyników badań Ahydrosilu K (1:8) stwierdzono, że zbudowany model pozwala wyjaśnić około 96% zmienności oryginalnej zmiennej zależnej. Przeciętna różnica między zaobserwowanymi wartościami zmiennej objaśnianej i wartościami teoretycznymi wynosi 0.07 kg/m^2. Poniżej zamieszczono wykres ilustrujący dopasowany model (Rys. 6).



Rys. 6. Rozrzut i linia regresji z 95% przedziałem ufności – Ahydrosil K (1:8)

Na podstawie wyników badań cegły zabezpieczonej Hydrofobem stwierdzono, że zbudowany model pozwala wyjaśnić około 55% zmienności oryginalnej zmiennej zależnej. Przeciętna różnica między zaobserwowanymi wartościami zmiennej objaśnianej i wartościami teoretycznymi wynosi 0.32 kg/m^2 (Rys. 7).

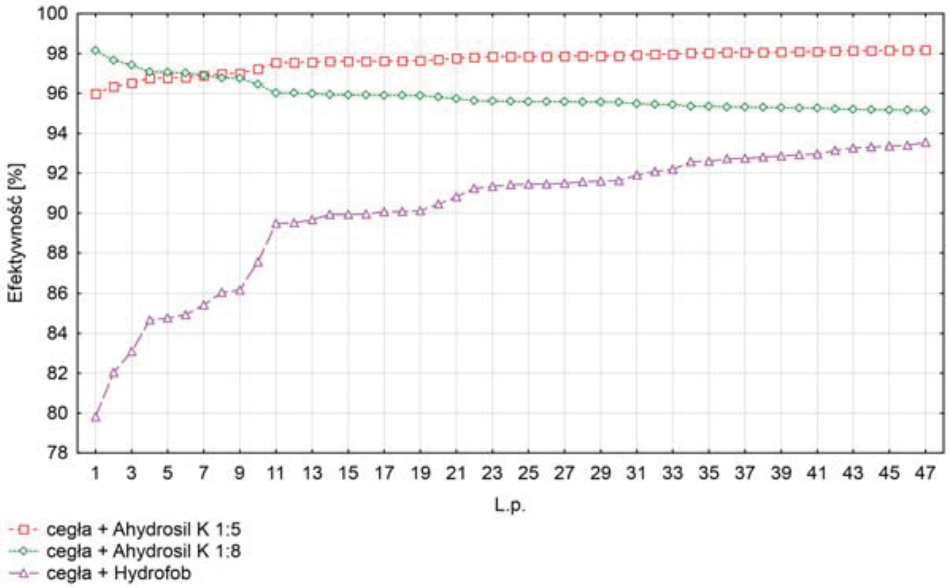


Rys. 7. Rozrzut i linia regresji z 95% przedziałem ufności – Hydrofob

W wyniku regresji otrzymujemy wartości prognozowane nasiąkliwości powierzchniowej dla cegieł zabezpieczonych Ahydrosilem K (1:5) i (1:8) oraz Hydrofobem. Otrzymujemy 3 populacje o takiej samej liczebności. W analizach odrzucono wyniki o wartości ujemnej. Ostatecznie otrzymano 47 prób dla każdego preparatu i określono prognozowaną efektywność hydrofobizacji (Tabela 3, Rys. 8).

Tab. 3. Wartości prognozowane efektywności hydrofobizacji

Rodzaj preparatu	Ahydrosil K (1:5)	Ahydrosil K (1:8)	Hydrofob
Efektywność [%]	95.99 – 98.19	95.14 – 98.14	79.82 – 93.54
Średnia efektywność [%]	97.64	95.88	90.13
Odchylenie standardowe [%]	0.54	0.73	3.34
Współczynnik zmienności	0.005	0.01	0.04



Rys. 8. Wartości prognozowane efektywności hydrofobizacji

Na podstawie analizy wyników badań hydrofobizacji stwierdzono, że najwyższą skuteczność zapewnia Ahydrosil K (1:5) przy średniej efektywności na poziomie 96.21%. W przypadku cegieł o najniższej nasiąkliwości najbardziej skuteczny okazał się Ahydrosil K (1:8). Ponadto zaobserwowano następujące prawidłowości:

- efektywność hydrofobizacji Ahydrosilem K (1:5) oraz Hydrofobem rośnie wraz ze wzrostem nasiąkliwości powierzchniowej cegieł,
- efektywność hydrofobizacji Ahydrosilem K (1:8) maleje ze wzrostem nasiąkliwości powierzchniowej cegieł,
- stężenie preparatu ma wpływ na skuteczność jego działania,
- preparat Hydrofob nie spełnił wymagań określonych w ZUAT.

Badanie wskaźnika absorpcji kropli wody

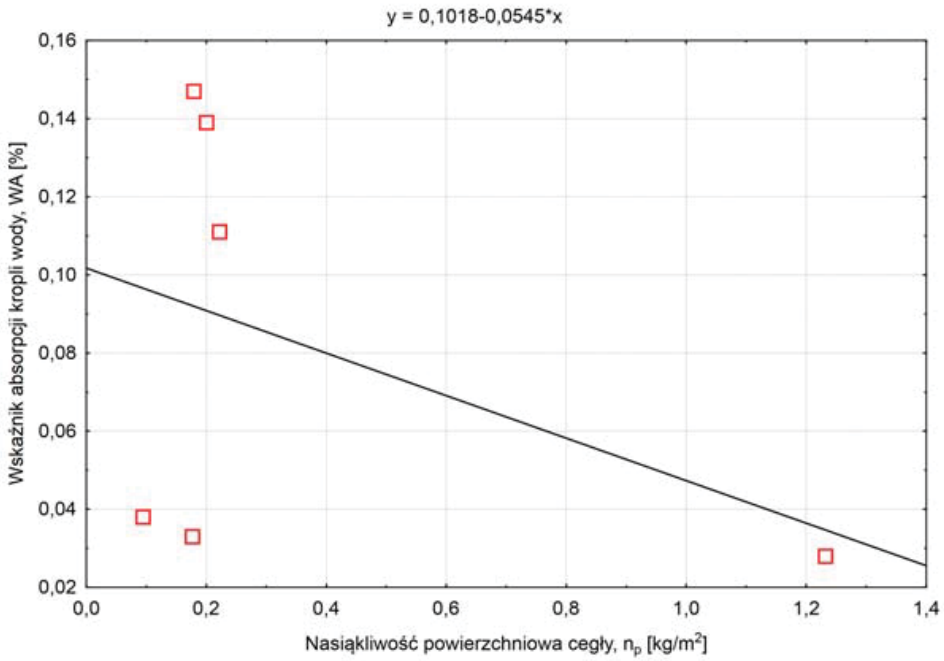
Badanie zdolności absorpcji kropli wody przeprowadzono równolegle z badaniem nasiąkliwości powierzchniowej. Na powierzchnie próbek, naniesiono za pomocą mikropipety po 5 kropel wody destylowanej z wysokości 0.5 cm o masie 0.02 g każda. Następnie zmierzono czas potrzebny na całkowitą absorpcję kropli wody przez powierzchnię zhydrofobizowaną t_x i bez hydrofobizacji t_n. Tabela 4 zawiera podstawowe wielkości statystyczne opisujące uzyskane wyniki badań.

Tab. 4. Statystyki opisowe wyników badań wskaźnika absorpcji kropli wody

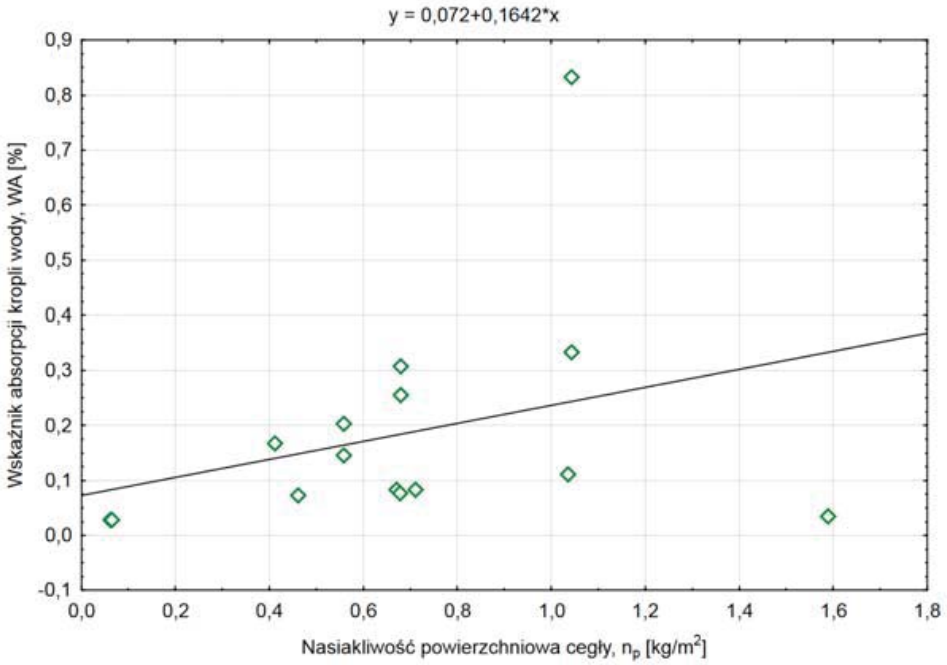
Rodzaj preparatu	Średnia	Minimum	Maksimum	Odchylenie standardowe [%]
Ahydrosil K (1:5)	0.082	0.028	0.147	0.055
Ahydrosil K (1:8)	0.184	0.028	0.833	0.205
Hydrofob	0.089	0.017	0.278	0.107

Poniżej zamieszczono wykresy rozrzutu wskaźnika absorpcji kropli wody względem nasiąkliwości powierzchniowej cegły zaimpregnowanej opisane zależnościami liniowymi (Rys. 9).

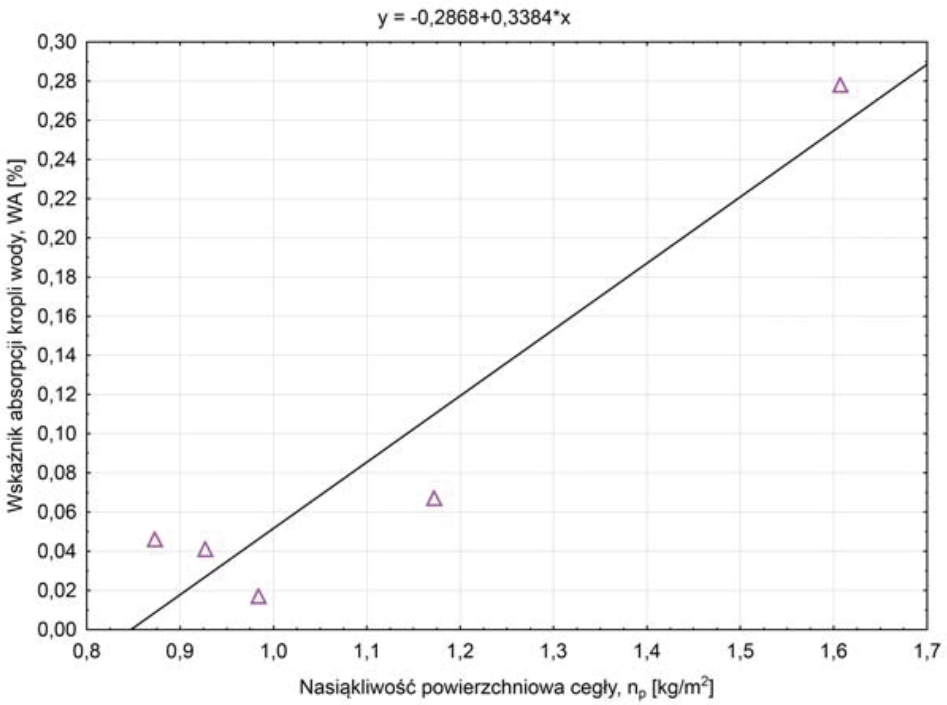
Ahydrosil K (1:5)



Ahydrosil K 1:8



Hydrofob



Rys. 9. Rozrzuty z funkcją opisującą zależności wskaźnika absorpcji kropli wody od nasiąkliwości powierzchniowej

Następnie wykonano testy jednoczynnikowej analizy wariancji ANOVA do porównywania średnich w kilku populacjach, które poprzedzono testem Browna – Forsythe'a mającym na celu sprawdzenie równości wariancji oraz normalności rozkładu.

Na podstawie analizy wyników badań testu absorpcji kropli wody stwierdzono, że najniższy wskaźnik absorpcji kropli wody o średniej wartości wynoszącej 0.083% uzyskał Ahydrosil K (1:5). Zaobserwowano następujące zależności:

- w badaniu wskaźnika absorpcji kropli wody wszystkie preparaty spełniały zalecenia ZUAT,
- wskaźnik absorpcji jest liniowo skorelowany z nasiąkliwością cegły,
- przy użyciu Hydrofobu i Ahydrosilu K (1:8) wartość wskaźnika absorpcji rośnie wraz ze wzrostem nasiąkliwości,
- przy użyciu Ahydrosilu K (1:5) wartość wskaźnika absorpcji maleje wraz ze wzrostem nasiąkliwości.

Tab. 5. Porównanie wskaźnika absorpcji kropli wody z zaleceniami ZUAT

Rodzaj preparatu	Ahydrosil K (1:5)	Ahydrosil K (1:8)	Hydrofob
Wskaźnik absorpcji kropli wody [%]	0.08	0.18	0.09
Wartość wskaźnika wg ZUAT [%]	≤ 5		

Podsumowanie

Ze względu na różnorodność materiału badawczego, preparatów i warunków przechowywania w pracy wykonano analizy statystyczne wyników badań nasiąkliwości powierzchniowej oraz wskaźnika absorpcji kropli wody mające na celu prognozowanie skuteczności preparatów hydrofobowych. Sformułowano następujące wnioski końcowe:

- Skuteczność hydrofobizacji zależy od właściwości fizycznych zabezpieczanej powierzchni (jej porowatości i struktury wewnętrznej) oraz rodzaju i stężenia impregnatu.
- Najniższy wskaźnik absorpcji kropli wody oraz najniższą nasiąkliwość osiągnął Ahydrosil K (1:5).
- W celu uzyskania pełniejszych wniosków dotyczących skuteczności hydrofobizacji cegieł ceramicznych, planowane są badania mrozoodporności, starzenia i odporności na sole rozpuszczalne w wodzie.

Podziękowania

Wyniki prac były finansowane w ramach środków statutowych Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr S/14/2014 i S/15/2014.

Bibliografia:

1. Rusin Z. (2002), *Technologia betonów mrozoodpornych*. Polski Cement. Kraków.
2. Ali A. R., Nikitsin V., Kofanov V. (2005), *Wpływ opadów atmosferycznych oraz parametrów przenoszenia wilgoci materiałów konstrukcji osłonowych na ich wilgotność*, Materiały Budowlane 12.
3. Łukaszewicz J. W. (2002), *Badania i zastosowanie związków krzemoorganicznych w konserwacji zabytków kamiennych*, UMK, Toruń.
4. Wesołowska M. (2006), *Wpływ obecności chlorku sodu na materiał ceramiczny poddany wielokrotnym cyklom kapilarnego nawilgacania*. Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych. Praca zbiorowa pod redakcją J. Jasieńki. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław.
5. Domasłowski W. (1993), *Profilaktyczna konserwacja kamiennych obiektów zabytkowych*. UMK skrypty, Toruń.
6. Barnat – Hunek D. (2010), *Hydrofobizacja opoki wapnistej w obiektach zabytkowych Kazimierza Dolnego*. Monografia Wydziału Budownictwa i Architektury. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin.
7. ITB, Zalecenia Udzielania Aprobat Technicznych ZUAT-15/VI.ll-2/2001, *Preparaty do powierzchniowej hydrofobizacji wyrobów budowlanych. Część 2. Wyroby Ceramiczne*, Warszawa.
8. Stanisz A. (2006), *Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny*, StatSoft, Kraków.
9. *Recommended test to measure the deterioration of stone and to assesses the effectiveness of treatment methods*. (1980), Material and Structure.

Liczba znaków ze spacjami: 26 577