

Na prawach rękopisu

Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Politechniki Wrocławskiej

Raport serii PRE nr 8/2024

Praca doktorska

**Wytrzymałość resztkowa
betonu po ekspozycji na
wysoką temperaturę**

mgr inż. Michał Pasztetnik

Słowa kluczowe:

wytrzymałość resztkowa betonu,
wysoka temperatura,
współczynnik zakumulowanego ciepła,
rehydratacja

Promotor: dr hab. inż. Roman Wróblewski

Wrocław, grudzień 2024

Autor:

mgr inż. Michał Pasztetnik

Politechnika Wrocławska
Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Konstrukcji Budowlanych
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław
tel. 71 320 23 45 tel./fax. 71 320 36 45

Raport został złożony w Redakcji Wydawnictw Wydziału Budownictwa Lądowego i Wodnego Politechniki Wrocławskiej 13.12.2024 r.

Lista odbiorców:

Recenzenci	3 egz.
Promotor	1 egz.
Autor	1 egz.
Archiwum W-2	1 egz.

Razem	6 egz.
-------	--------

Szczególnie dziękuję mojemu promotorowi dr hab. inż. Romanowi Wróblewskiemu za wszystkie lata spędzone razem na wspólnej pracy nad rozprawą, wyrozumiałość dla tempa postępów oraz za wszystkie porady.

Dziękuję prof. dr hab. inż. Andrzejowi Ubyszowi za pomoc formalną i merytoryczną oraz cenne wskazówki.

Dziękuję mojej żonie Agacie i Rodzinie za wsparcie.

SPIS TREŚCI:

SPIS TREŚCI:	4
WYKAZ OZNACZEŃ	6
1 WPROWADZENIE	8
2 ANALIZA STANU WIEDZY	9
2.1 WYTRZYMAŁOŚĆ RESZTKOWA BETONU NA ŚCISKANIE W BADANIACH DOŚWIADCZALNYCH.....	9
2.1.1 <i>Maksymalna temperatura</i>	10
2.1.2 <i>Czas wygrzewania</i>	15
2.1.3 <i>Prędkość nagrzewania</i>	18
2.1.4 <i>Prędkość i rodzaj ochładzania</i>	19
2.1.5 <i>Rehydratacja aktywnych składników betonu</i>	24
2.1.6 <i>Wiek betonu w czasie ekspozycji</i>	29
2.1.7 <i>Wpływ obciążenia w czasie ekspozycji</i>	29
2.1.8 <i>Porowatość betonu</i>	30
2.1.9 <i>Skład betonu</i>	34
2.2 SZACOWANIE WYTRZYMAŁOŚCI RESZTKOWEJ BETONU NA ŚCISKANIE Z UŻYCIEM UCZENIA MASZYNOWEGO.....	45
2.3 PODSUMOWANIE.....	46
3 CELE I ZAKRES ROZPRAWY	50
3.1 CELE NAUKOWE.....	50
3.2 ZAKRES ROZPRAWY.....	50
4 CZĘŚĆ BADAWCZA	51
4.1 WPROWADZENIE.....	51
4.2 STANOWISKO BADAWCZE.....	51
4.3 METODA BADAŃ WSTĘPNYCH.....	54
4.4 WYNIKI BADAŃ WSTĘPNYCH.....	59
4.5 METODA BADAŃ ZASADNICZYCH.....	61
4.5.1 <i>Próbki użyte w badaniach</i>	61
4.5.2 <i>Plan badań zasadniczych</i>	62
4.6 WYNIKI BADAŃ ZASADNICZYCH.....	66
4.7 WSPÓŁCZYNNIK ZAKUMULOWANEGO CIEPŁA.....	68
4.7.1 <i>Koncepcja współczynnika</i>	68
4.7.2 <i>Parametryzacja współczynnika zakumulowanego ciepła</i>	72
4.7.3 <i>Funkcja początkowa - H400r</i>	75

SPIS TREŚCI:

4.7.4	Modyfikacja pierwsza - Haf, 1	77
4.7.5	Modyfikacja druga - Haf, 2	81
4.7.6	Modyfikacja trzecia - Haf, 3	84
4.8	FUNKCJA SZACUJĄCA WYTRZYMAŁOŚĆ RESZTKOWĄ.....	88
4.8.1	Porównanie sparametryzowanej funkcji wytrzymałości resztkowej z wytrzymałościami w wysokiej temperaturze	94
5	SYMULACJA WYTRZYMAŁOŚCI RESZTKOWEJ PRZY POMOCY SIECI NEURONOWYCH	95
5.1	MODEL WYTRZYMAŁOŚCI RESZTKOWEJ WYKORZYSTUJĄCY SIECI NEURONOWE	95
6	WNIOSKI KOŃCOWE I PROPOZYCJE KIERUNKÓW DALSZYCH BADAŃ.....	100
6.1	PODSUMOWANIE.....	100
6.2	WNIOSKI KOŃCOWE.....	101
6.3	KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ.....	102
	SPIS RYSUNKÓW	103
	SPIS TABEL.....	107
	BIBLIOGRAFIA.....	110
	STRESZCZENIE.....	120
	ABSTRACT	121

WYKAZ OZNACZEŃ

DUŻE LITERY ŁACIŃSKIE

A, B – współczynniki dopasowania funkcji szacującej względną wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie

AC – rehydratacja w powietrzu,

BFGS – algorytm uczenia sieci neuronowych zaproponowany przez Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno

CEM I – cement portlandzki

CEM III – cement hutniczy

C-S-H – Krzemiano-wodór-wapnia

FGP – Drobnio zmielony pumeks

GEP – Programowanie ekspresji genów

GGBFS - Mielony żużel wielkopiecowy

H^{400} – Współczynnik zakumulowanego ciepła – metoda 400°C

H^{400r} – Zmodyfikowany współczynnik zakumulowanego ciepła – metoda 400°C zredukowana

H_{af} – Współczynnik zakumulowanego ciepła

HSC – beton wysokiej wytrzymałości

MC – rehydratacja mieszana

ME - Naturalne pucolany

MFA - Pył lotny o niskiej zawartości wapnia

MIP – porozymetria rtęciowa

MLP – perceptron wielowarstwowy

NSC – Beton standardowej wytrzymałości

PF – rehydratacja z folią blokującą wilgoć

PFA - Pył lotny o wysokiej zawartości wapnia

PP – włókna polipropylenowe

PS – $RSS_{i,j}$ – suma błędów oszacowania RSS dla danego zbioru przeliczony na jedną próbkę

R_{20} – Początkowa wytrzymałość betonu w temperaturze 20 stopni C

$Rars, l(H_{af})$ – Oszacowana na podstawie współczynnika zakumulowanego ciepła względna wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie – szacowanie funkcją logarytmiczną

$Rars, e(H_{af})$ – Oszacowana na podstawie współczynnika zakumulowanego ciepła względna wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie – szacowanie funkcją wykładniczą

RSS_{SANN} – Oszacowana przez sieć neuronową względna wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie RCA – Kruszywo powstałe z recyklingu betonu

RCCA - Kruszywo powstałe z recyklingu materiałów ceramicznych

$Rrs(\theta) = \frac{Rs(\theta)}{R_{20}}$ – Względna wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie

$Rrs, PP(\theta)$ - Względna wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie z włóknami PP

$Rs(\theta)$ - Wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie po wygrzaniu do temperatury θ °C

RSM - metoda analizy powierzchni odpowiedzi

WYKAZ OZNACZEŃ

RSS – wartość najmniejszej sumy kwadratów
SANN – Statistica automatyczne sieci neuronowe
SF – Pył krzemionkowy
SOS – funkcja błędu suma kwadratów (sum of squares)
 T_{max} – maksymalna temperatura ekspozycji
WC – rehydratacja w wodzie

MAŁE LITERY ŁACIŃSKIE

c – współczynnik normalizujący funkcję logarytmiczną
 $\frac{dR_{ars}}{dH_{af,l}}$ – pochodna funkcji szacowania wytrzymałości resztkowej betonu na ściskanie po
współczynniki zakumulowanego ciepła
 f_{c20} – Wytrzymałość betonu na ściskanie w temperaturze pokojowej - nie poddanego ekspozycji
 $f_{rc,\theta}$ – Wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie po wygrzaniu do θ °C i powrocie do temp.
pokojowej
 $f_{rc,AC}$ – Wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie po chłodzeniu powietrznym w
temperaturze pokojowej
 $f_{rc,WC}(t)$ – Wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie po chłodzeniu wodnym o czasie
zanurzenia (t)
 $f_{rc,WC}$ - Wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie po chłodzeniu powietrznym w wysokiej
temperaturze
 $g_{re}(H_{af}, t_{re})$ – funkcja uwzględniająca procent odzyskanej przez betonu wytrzymałości na
ściskanie w czasie rehydratacji
 $k_c(\theta)$ – współczynnik uwzględniający spadek charakterystycznej wytrzymałości betonu na
ściskanie
 p_c – Początkowa porowatość betonu
 $p_{rc}(\theta)$ – Porowatość betonu po ekspozycji na wysoką temperaturę
 t_e – czas ekspozycji
 t_{re} – czas rehydratacji
 w/c – stosunek wodno-cementowy

DUŻE LITERY GRECKIE

θ - Temperatura betonu

MAŁE LITERY GRECKIE

α_{EL} – współczynnik uwzględniający wpływ obciążenia w czasie ekspozycji na wytrzymałość
resztkową betonu na ściskanie
 $\alpha_{i,j}, \beta_{i,j}$ – współczynniki dopasowania funkcji obliczającej współczynnik zakumulowanego ciepła
 δ_{ars} – błąd względny oszacowania

1 WPROWADZENIE

Beton spośród wszystkich powszechnie używanych materiałów konstrukcyjnych cechuje się świetną odpornością na wysokie temperatury. W porównaniu ze stalą bądź drewnem, beton wykazuje niski współczynnik przewodności cieplnej, wysoką pojemność cieplną, a dodatkowo jego wytrzymałość ulega obniżeniu w wolniejszym tempie. Powyższe cechy sprawiają że, beton świetnie sprawdza się jako materiał zarówno do wydzielania stref pożarowych, ale i do konstruowania elementów o zwiększonej odporności pożarowej. Fakt ten znajduje potwierdzenie w praktyce, ponieważ większość budynków o podwyższonych wymaganiach związanych z odpornością na pożary jest budowana częściowo bądź w całości z betonu. Mając na uwadze jak dobrze takie budynki radzą sobie z pożarem, powstaje pytanie: **czy po ugaszeniu istnieje możliwość dalszego użytkowania konstrukcji w ten sam sposób?**

Prezentowana rozprawa dotyczy wytrzymałości resztkowej betonu na ściskanie, rozumianej jako wytrzymałość, którą beton zachowuje trwale po ekspozycji na działanie wysokiej temperatury i powrocie do temperatury około 20°C. W pracy przeprowadzono analizę aktualnego stanu wiedzy, porównano dotychczasowo otrzymane przez badaczy wyniki i na tej podstawie wskazano czynniki mające istotny wpływ na wytrzymałość resztkową betonu. Pozwoliło to zaplanować badania własne w ten sposób, aby ograniczyć liczbę zmiennych występujących w badaniach. Część przeglądowa, jak i część badawcza zostały podsumowane szczegółowymi wnioskami – mogącymi posłużyć jako pomoc przy rozwiązywaniu problemów zastanych w rzeczywistości. Całość rozprawy została natomiast podsumowana rozdziałem z wnioskami ogólnymi i zaproponowanymi kierunkami dalszych badań.

Poruszany w rozprawie temat jest istotny ze względów praktycznych i poznawczych. Pożary budynków są zjawiskiem rzadkim, a nawet wyjątkowym w odniesieniu do pojedynczych obiektów, ale powszechnie występującym, biorąc pod uwagę zbiorowość np. budynków. Określenie nośności resztkowej konstrukcji jest konieczne do podjęcia decyzji o przywróceniu budynku do stanu użyteczności. Aby zdecydować o działaniach do przeprowadzenia (wyburzenie, wzmocnienie) niezbędna jest znajomość stanu konstrukcji i parametrów materiałów. Dlatego też zarówno ze względów bezpieczeństwa, jak i ekonomicznych, ważne jest poznanie wytrzymałości resztkowej betonu po pożarze.

2 ANALIZA STANU WIEDZY

2.1 WYTRZYMAŁOŚĆ RESZTKOWA BETONU NA ŚCISKANIE W BADANIACH DOŚWIADCZALNYCH

Wytrzymałość betonu na ściskanie w wysokiej temperaturze i jego odporność w warunkach pożaru są zagadnieniami dobrze rozpoznanymi. Istnieją normy i wytyczne [1–3] proponujące modele matematyczne i uproszczone podejścia do obliczania konstrukcji budynków w warunkach pożaru. Znane są również związki naprężenie-odkształcenie dla betonu poddanego działaniu wysokiej temperatury [4–6]. Opisano również zachowania obiektów, elementów i przekrojów w sytuacjach pożarowych [7–9][10][11]. Bazując na obecnej wiedzy, projektanci są w stanie zaprojektować budynki o wymaganych odpornościach na działanie pożaru, które z pożarami radzą sobie czasami tak dobrze, że wydają się wychodzić z nich bez szwanku. Jednak by dopuścić taki budynek do ponownego użytkowania należy przeprowadzić analizę, która zweryfikuje jego bezpieczeństwo.

Istnieje możliwość przeprowadzenia badań wytrzymałości betonu na ściskanie na próbkach zarówno za pomocą metod niszczących, jak i nieniszczących [12–15],[16],[17]. Badania takie nie będą jednak wystarczające do określenia nośności całej konstrukcji. Podczas pożaru wewnątrz konstrukcji mamy do czynienia ze zmiennym w czasie trójwymiarowym polem temperatury, które ma wpływ na wytrzymałość resztkową. W związku z czym podejście oparte na badaniach próbek pobranych z konstrukcji może nie być wystarczająco dokładne i konieczne byłoby pobranie bardzo dużej ich liczby. Wobec dużego skomplikowania sposobem na dostarczenie wystarczającej liczby danych do obliczeń nośności resztkowej jest stworzenie modelu teoretycznego konstrukcji po ekspozycji na wysoką temperaturę. Ze względu na liczbę czynników mających potencjalny wpływ, wytrzymałość resztkowa to skomplikowane zagadnienie [18]. Już sama wytrzymałość betonu na ściskanie w wysokiej temperaturze jest trudna do dokładnego określenia, a w przypadku wytrzymałości resztkowej dochodzą takie czynniki jak czas trwania pożaru, sposób jego gaszenia (studzenie elementu) i warunki jakie panują po ekspozycji (potencjalna rehydratacja: zarówno jej czas, jak i warunki, w których przebiega).

Aby wyodrębnić czynniki mające wpływ na wytrzymałość resztkową betonu warto zacząć od jego składu, gdyż proporcje i rodzaj składników wpływają na finalne parametry betonu. Dodatkowe czynniki modyfikujące pojawiają się wraz z ekspozycją betonu na wysoką temperaturę. Zaczyn cementowy przechodzi kilkustopniową degradację w zależności od wysokości temperatury [19,20]. Kruszywo wraz ze wzrostem temperatury

rozszerza się, powodując wzrost naprężeń wewnętrznych, które mogą skutkować mikro-pęknięciami betonu. W efekcie wytrzymałość betonu na ściskanie w czasie ekspozycji spada o połowę już przy około 400°C. Dodatkowo, w wysokiej temperaturze, staje się on mniej kruchy – wydłuża się ścieżka naprężenie-odkształcenie. W przypadku wytrzymałości resztkowej, należy jeszcze uwzględniać warunki ochładzania elementu oraz warunki środowiskowe po ochłodzeniu, tj. rodzaj i czas rehydratacji. Wymienione czynniki sprawiają, że wytrzymałość resztkowa jest skorelowana z wytrzymałością w wysokiej temperaturze, ale nie mogą być one rozpatrywane jako wartości tożsame.

W oparciu o przegląd aktualnego stanu wiedzy, w dalszej części pracy przedstawione zostaną najważniejsze czynniki wpływające na wytrzymałość resztkową betonu. Dla każdego podrozdziału przedstawione zostaną wnioski i opinia odnośnie istotności opisanego czynnika przy opracowywaniu funkcji szacującej tę wytrzymałość.

Bardzo istotnym w rozważaniach będzie również sposób porównywania wytrzymałości. Ze względu na przejrzystość i dopasowanie do istniejących standardów (w zakresie opisu wytrzymałości betonu na ściskanie) do porównań i wykresów będzie używana względna wytrzymałość resztkowa, rozumiana jako stosunek wytrzymałości resztkowej do wytrzymałości przed ekspozycją, zbadane na identycznych próbkach. Wartość ta obrazuje konsekwencje ekspozycji i późniejszego ochładzania, jak również wzrostu wytrzymałości podczas rehydratacji.

O ile w dalszej części pracy jest mowa o wytrzymałości resztkowej to jest to wytrzymałość betonu na ściskanie.

2.1.1 Maksymalna temperatura

Bez wątpienia maksymalna temperatura jest najistotniejszym czynnikiem jeżeli chodzi o wytrzymałość w wysokiej temperaturze, [21] przedstawia jej zależność do temperatury w postaci wykresu. Potwierdzają to mnogie badania na ten temat (tab. 1). Niestety porównanie wyników uzyskanych w badaniach opisanych w tab. 1 w celu wyodrębnienia wpływu samej maksymalnej temperatury jest bardzo trudne, z powodu znacznych różnic w pozostałych czynnikach i warunkach badania. W publikacjach [22–24] próbki ogrzewane były do temperatur w przedziale od 100°C do 700°C, następnie pozostawiano je we wnętrzu wyłączanego pieca do czasu obniżenia temperatury do poziomu 20°C. Tak przygotowane próbki zostały przebadane, a wyniki wytrzymałości na ściskanie przedstawione zostały na rys. 1 oraz rys. 2. W [25] badania zostały przeprowadzone dla bardzo szerokiego zakresu temperatury: od 200°C do 1000°C. Próbki o kształcie beleczki o wymiarach 40x40x160mm po 28 dniach od uformowania, zostały wstawione do pieca

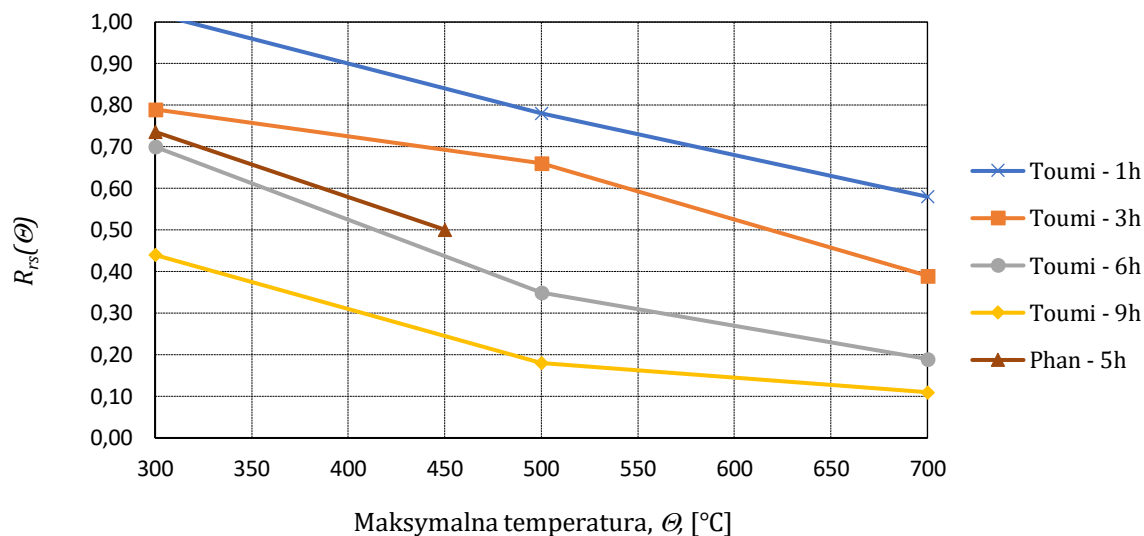
na 1,5h w docelowej temperaturze, a później wyjęte i pozostawione do ostudzenia w temperaturze pokojowej.

Tab. 1. Zestawienie badań na temat wpływu maksymalnej temperatury na wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie

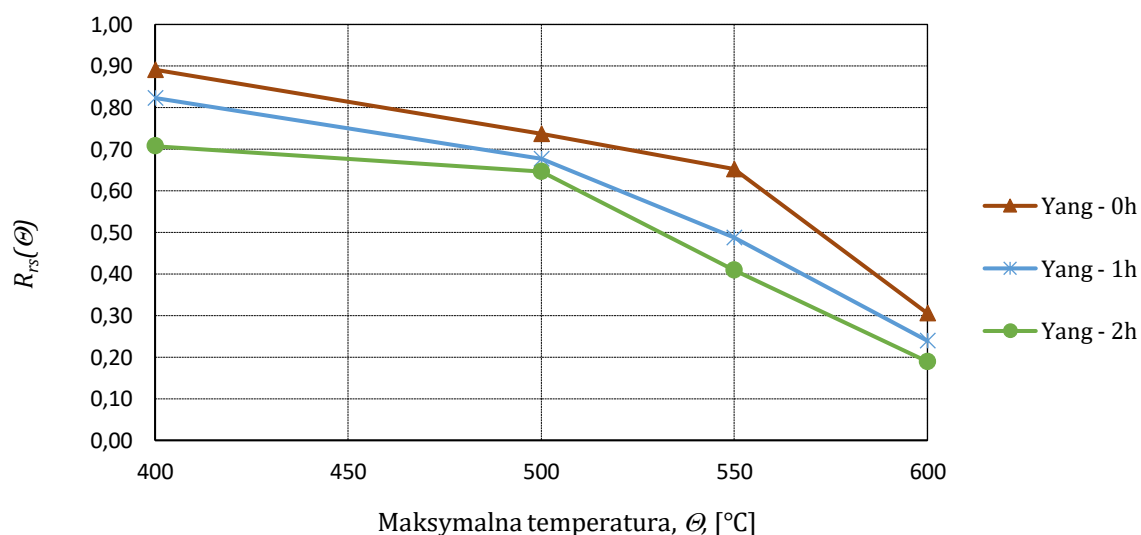
Autor	Próbka	Rozmiary próbki	Rodzaj betonu	Zakres temp.	Czas wygrzewania*	Prędkość nagrzewania**	Wiek betonu
Toumi [22]	Sześcienna	100mm	NSC, HSC	300-700°C	3-9 h	10 °C/min	28 dni
Yang [23]	Walcowa	D 100mm, H 200mm	NSC	400-600°C	0-2h	2,5 °C/min	90 dni
Phan [24]	Walcowa	D 100mm, H 200mm	NSC, HSC	100-450°C	5h 30min	5 °C/min	200+ dni
Netinger [25]	Beleczka	40x40x160mm	NSC	200-1000°C	1h 30min	-	28 dni
Hager [26]	Sześcienna Walcowa	Sześcienna 150mm Wal. D 100mm, H 200mm	HSC	200-1000°C	3h	0,5 °C/min	90 dni
Krzemień [27]	Sześcienna	150mm	NSC	200-1000°C	3h	0,5 °C/min	120 dni
Xiao [28]	Sześcienna	100mm	HSC	100-900°C	3h	ISO-834	NA
Chan [29]	Sześcienna	100mm	NSC, HSC	400-1200°C	1h	BS476:Part20 :1987	90 dni
Tolentino [30]	Walcowa	D 100mm, H 200mm	NSC, HSC	600°C	2h	0,5 °C/min	NA
Xiao [31]	Sześcienna	100mm	HSC	200-800°C	2-3h	25 °C/min	150 dni

* Czas wygrzewania – czas, w którym próbka była poddana działaniu maksymalnej temperatury

** Prędkość nagrzewania – szybkość przyrostu temperatury od temperatury pokojowej do maksymalnej



Rys. 1. Względna wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie jako funkcja maksymalnej temperatury dla różnych czasów wygrzewania wg Toumi [22], Phan [24]



Rys. 2. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja maksymalnej temperatury dla różnych czasów wygrzewania wg Yang [23]

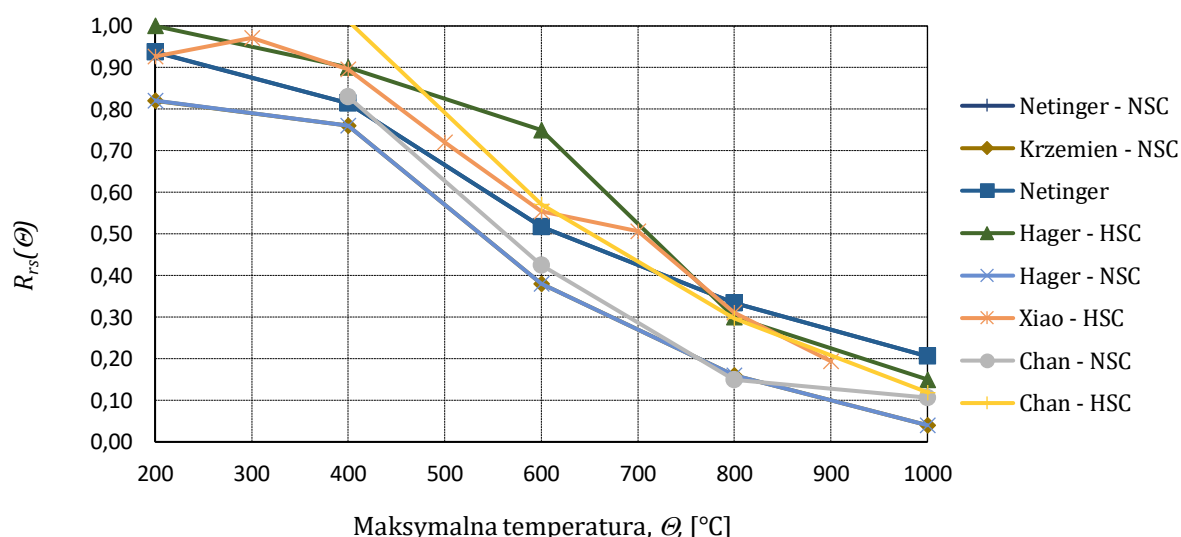
Kolejne badania obejmowały próbki z betonu o wysokiej wytrzymałości (HSC) [26] i betonu standardowej wytrzymałości (NSC) [27]. Zostały one umieszczone w zimnym piecu, którego wnętrze było nagrzewane w tempie $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, a później wygrzewane w docelowych temperaturach (w przedziale od 200°C do 1000°C) przez 3 godziny. Następnie zostały one ochłodzone w wyłączonym piecu i przebadane pod względem wytrzymałości na ściskanie (rys. 3). W [28] próbki przebadane były dla 10 wartości temperatury maksymalnej (od 100°C do 900°C , skok co 100°C), wzrost temperatury wewnątrz pieca był odwzorowaniem krzywej dla pożaru standardowego (rys. 4),

temperatura maksymalna była później utrzymywana przez 3 godziny. Kolejnym krokiem było otwarcie drzwi pieca i ochłodzenie próbek przed badaniem wytrzymałości na ściskanie (rys. 3). Badania [29] obejmowały próbki z HSC i NSC, zaplanowane maksymalne temperatury znajdowały się w zakresie od 400°C do 1200°C. Podobne badania zostały wykonane w [30], różny był jednak zakres temperatur (od 200°C do 600°C). Wyniki obu publikacji przedstawione zostały na rys. 3. Dodatkowo zauważono, że próbki z HSC notowały większe spadki wytrzymałości względnej niż te z NSC. Obserwację tę potwierdzają [31,32].

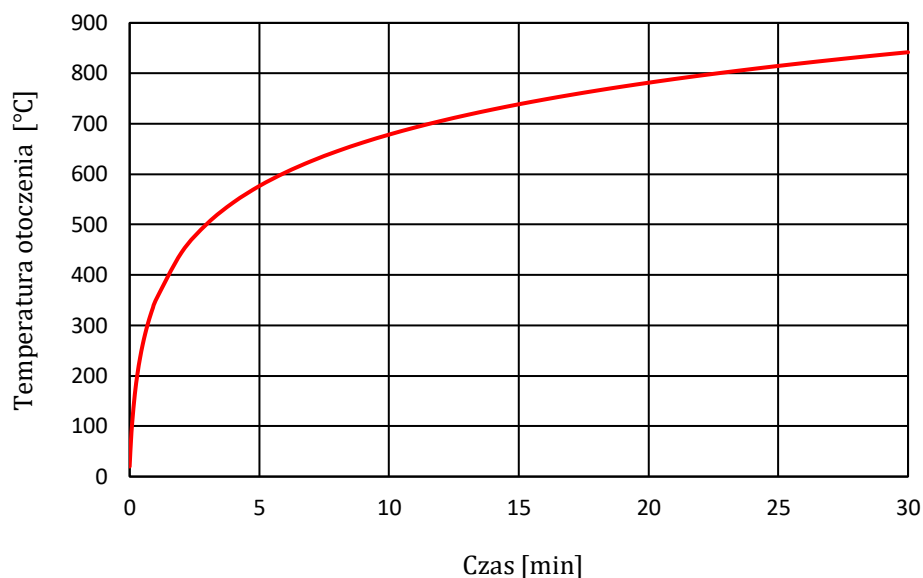
Zbiorcza analiza statystyczna danych potwierdza kluczowy wpływ maksymalnej temperatury na wytrzymałość resztkową. Tab. 2 przedstawia współczynniki korelacji pomiędzy maksymalną temperaturą, a względną wytrzymałością resztkową. Współczynniki Pearson'a i Spearman'a sugerują silną liniową ujemną zależność, a współczynnik Kendal'a potwierdza tę tezę dodatkowo mówiąc o jej monotoniczności.

Tab. 2. Współczynniki korelacji pomiędzy maksymalną temperaturą a względną wytrzymałością resztkową dla dwóch różnych czasów nagrzewania w maksymalnej temperaturze

Współczynnik korelacji	Czas nagrzewania – 1h	Czas nagrzewania – 3h
Pearson	-0,90	-0,95
Spearman	-0,94	-0,96
Kendall	-0,82	-0,87



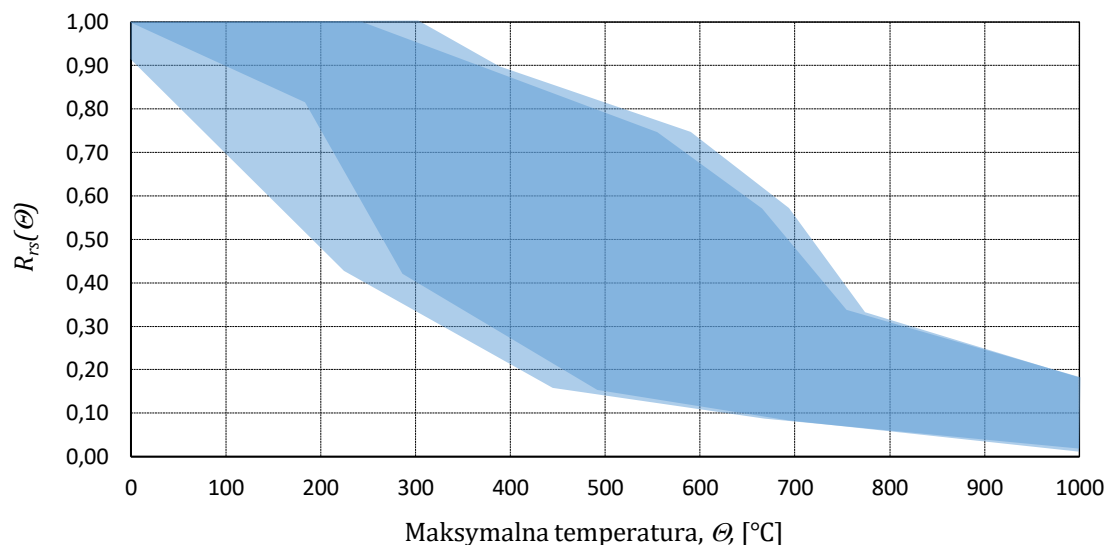
Rys. 3. Względna wytrzymałość resztkowa dla różnych typów betonu: NSC i HSC jako funkcja maksymalnej temperatury wg Netinger [25], Hager [26], Krzemień [27], Xiao [28], Chan [29]



Rys. 4. Wzrost temperatury otoczenia jako funkcja czasu dla pożaru standardowego wg [1]

Graficzne podsumowanie wyników przedstawione zostało na rys. 5. Widoczne jest podobieństwo do wykresu zmian wytrzymałości betonu w wysokiej temperaturze zaproponowanego przez [21]. Po analizie danych można wyodrębnić trzy obszary:

- Obszar I - Od 20°C do 300°C - beton poddany ekspozycji na taką temperaturę prawie w ogóle nie odnotowuje spadku wytrzymałości resztkowej. Zniszczenia są na tyle małe, że proces rehydratacji umożliwia powrót do wytrzymałości początkowej. Z tych względów zakres jest mało istotny badawczo.
- Obszar II - Od 300°C do 800°C - wyniki w tym zakresie mają największy rozrzut, co pozwala wnioskować o dużym wpływie pozostałych czynników na wytrzymałość resztkową betonu. Z tego powodu, zakres ten jest szczególnie istotny ze względów badawczych.
- Obszar III - Powyżej 800°C - wytrzymałość resztkowa jest niemal równa wytrzymałości betonu w wysokiej temperaturze. Beton w tym zakresie temperatur ulega tak znaczącym uszkodzeniom, że pomimo rehydratacji wytrzymałość jest dalece mniejsza od pierwotnej (przed podgrzaniem). Małe rozbieżności pomiędzy wynikami sugerują, że przy tak poważnych uszkodzeniach pozostałe czynniki mają znikome znaczenie. Biorąc pod uwagę niski poziom wytrzymałości resztkowej i możliwość dobrego jej oszacowania przy wykorzystaniu istniejących funkcji (np. wg. [1]) przedział ten został określony jako mało istotny ze względów badawczych.



Rys. 5. Zakres wyników względnej wytrzymałości betonu jako funkcji maksymalnej temperatury, różni autorzy przywołani w tej części pracy

Dla Obszarów I i III, wytrzymałość resztkowa może być szacowana jako funkcja samej maksymalnej temperatury i wyliczana z wykorzystaniem istniejących wzorów (np. wg. [1]). Dla Obszaru II konieczne jest przeprowadzenie szerszej analizy i uwzględnienie większej liczby czynników, sama maksymalna temperatura jest niewystarczająca do oszacowania wytrzymałości resztkowej. W [33] podano propozycję funkcji, ale należy go traktować jako zgrubną estymację ponieważ wykazuje się ona sporym błędem.

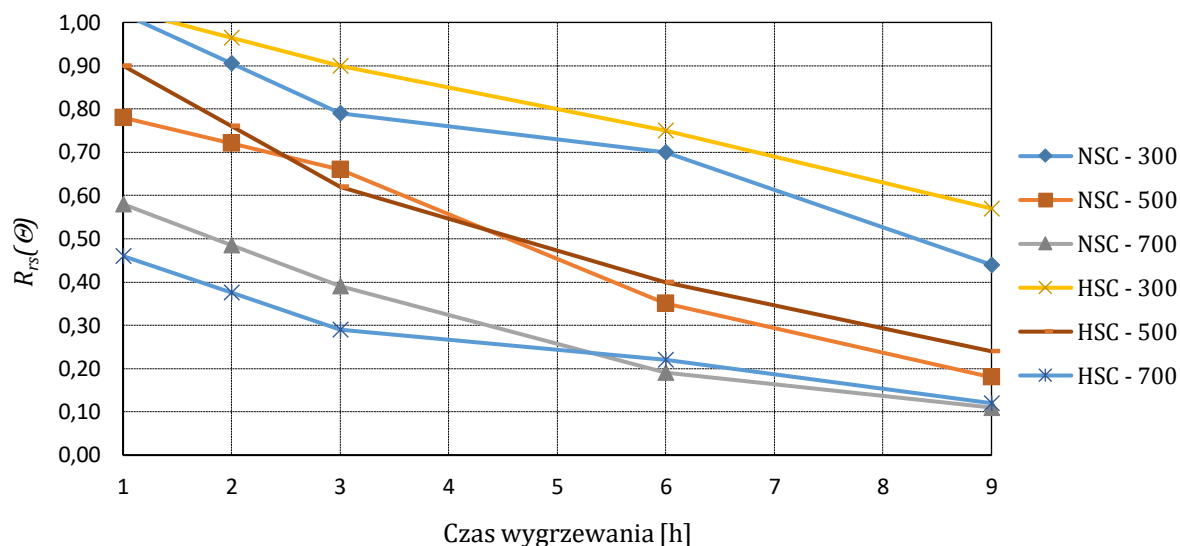
2.1.2 Czas wygrzewania

Czas wygrzewania w rozumieniu czasu, przez który na próbkę oddziałuje maksymalna temperatura to bardzo istotny czynnik, co potwierdza wiele badań przywołanych w tab. 3.

Tab. 3. Zestawienie badań na temat wpływu czasu wygrzewania na wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie

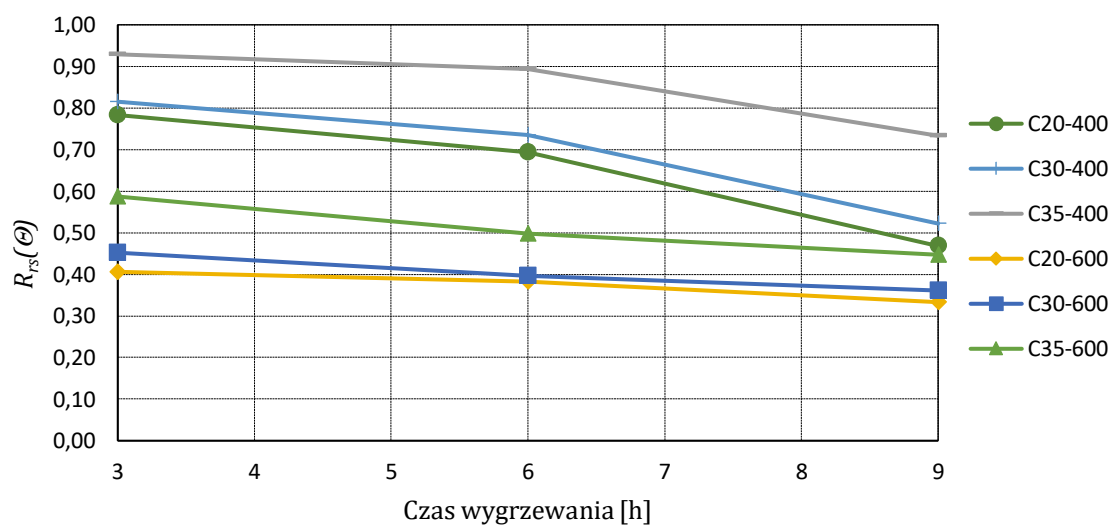
Autor	Próbka	Wielość próbki	Rodzaj betonu	Zakres temp.	Czas wygrzew.	Prędkość nagrzew.	Wiek betonu
Toumi [22]	Sześcienna	100mm	NSC, HSC	300-700°C	1-9 h	10 °C/min	28 dni
Yang [23]	Walcowa	D 100mm, H 200mm	NSC	400-600°C	0-2h	2,5 °C/min	90 dni
Pertiwi [34]	Sześcienna	150mm	NSC	400-600°C	3-9h	NA	28 dni
Wu [35]	Walcowa	D 100mm, H 200mm	NSC	100-600°C	1-6h	5 °C/min	28 dni
Mohamedbhai [36]	Sześcienna	100mm	NSC	200-800°C	1-4h	-	84 dni

W [22] przebadane zostały próbki zarówno HSC, jak i NSC, dla zakresu maksymalnych temperatur od 300°C do 700°C i czasów wygrzewania: 1, 3, 6 i 9 godzin. Wyniki zostały przedstawione na rys. 6.



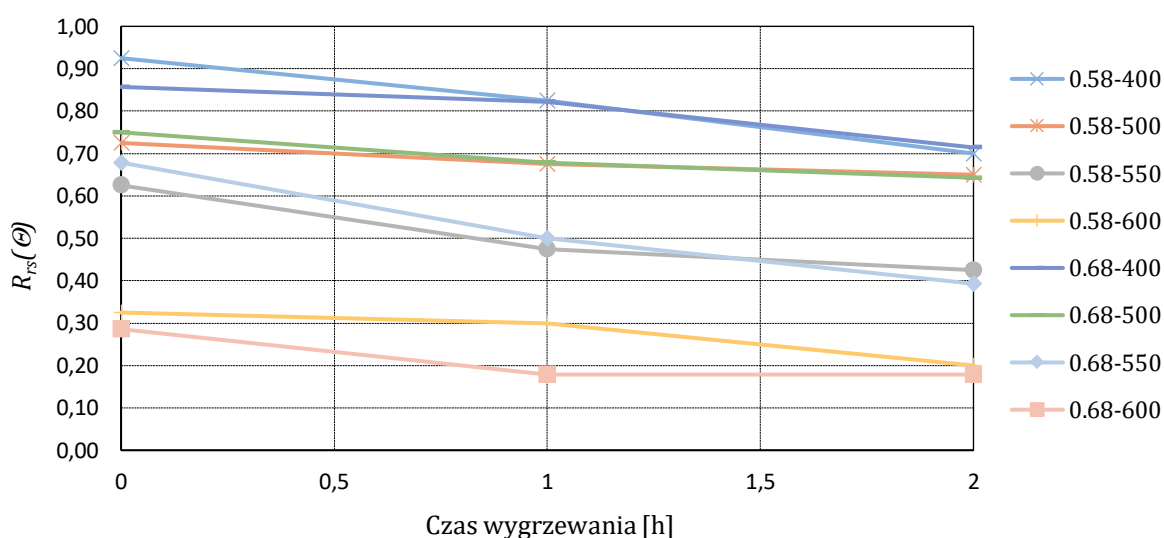
Rys. 6. Względna wytrzymałość resztkowa dla NSC i HSC i różnych temperatur maksymalnych: 300°C, 500°C, 700°C jako funkcja czasu wygrzewania wg Toumi [22]

Badania przedstawione w [34] zostały przeprowadzone dla trzech mieszanek o różnych wytrzymałościach betonu na ściskanie: 20MPa, 30MPa i 35MPa. Różnicowano próbki na podstawie: temperatury maksymalnej: 400°C i 600°C oraz trzech czasów wygrzewania: 3h, 6h i 9h. Ściskanie próbek nastąpiło po wygrzaniu i ostudzeniu próbek, a wyniki przedstawia rys. 7.



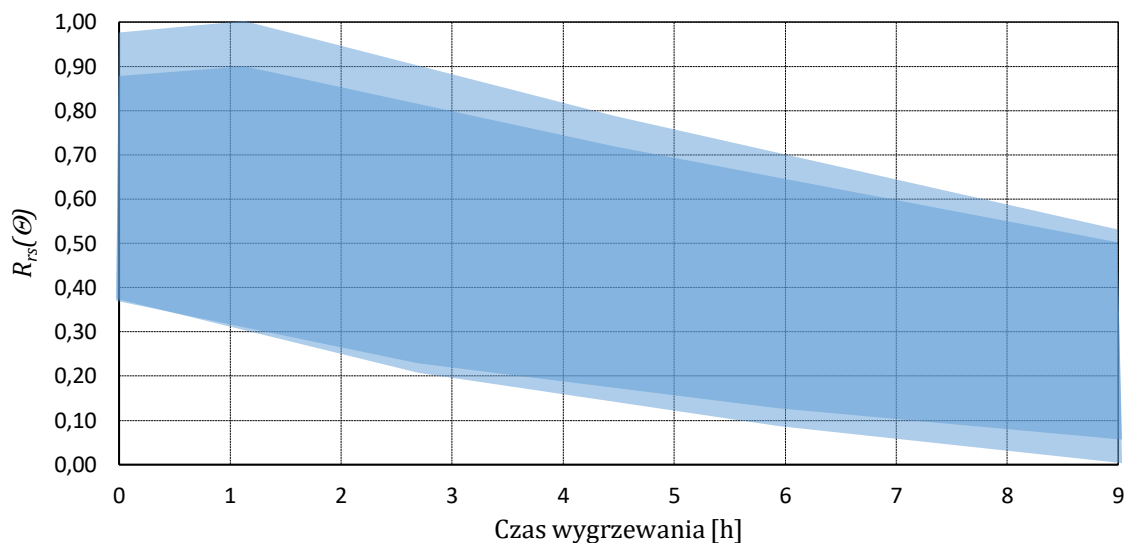
Rys. 7. Względna wytrzymałość resztkowa różnych klas betonu: C20, C30, C35 oraz różnych temperatur maksymalnych: 400°C, 600°C jako funkcja czasu wygrzewania wg Pertiwi [34]

W badaniach opisanych w [23] próbki cylindryczne o wysokości 100mm i średnicy 200mm zostały wygrzane 90 dni po rozformowaniu. Użyto dwóch rodzajów betonu różniących się współczynnikiem w/c, odpowiednio 0,58 i 0,68. Badania przeprowadzono dla czterech różnych temperatur i 5 różnych czasów wygrzewania. Wyniki przedstawia rys. 8. Podobne warunki eksperymentu zostały użyte w [35]. Natomiast w [36] próbki sześciennie o boku 100mm wygrzewane zostały do temperatur w zakresie 200-800°C, używając przy tym różnych szybkości i czasów nagrzewania. Badania wytrzymałościowe zostały wykonane 14 dni po zakończeniu wygrzewania.



Rys. 8. Względna wytrzymałość resztkowa różnych typów betonu: w/c = 0,58, w/c = 0,68 i różnych temperatur maksymalnych: 400°C, 500°C, 550°C, 600°C jako funkcja czasu wygrzewania, na podstawie [23]

Analizując zestawienie wyników przedstawione na zbiorczym wykresie zamieszczonym na rys. 9, widoczna jest istotna zależność względnej wytrzymałości resztkowej od czasu wygrzewania – im dłużej próbka jest wygrzewana, tym następują większe zniszczenia w strukturze betonu, za czym idzie obniżenie wytrzymałości. Obliczone współczynniki korelacji potwierdzają to stwierdzenie (tab. 4). Dodatkowo można zauważyć bardzo dużą rozpiętość w wartościach względnej wytrzymałości resztkowej dla poszczególnych czasów nagrzewania. Powodem takiego zróżnicowania jest przeważające znaczenie innych czynników, a w szczególności maksymalnej temperatury. Szerokie spektrum na wykresie jest wynikiem różnic w punkcie początkowym wykresu, tj. względnej wytrzymałości resztkowej dla danej temperatury maksymalnej przy czasie wygrzewania równym 0. Jednak pomimo rozrzutu wyników zebranych badań, tempo w jakim spada wytrzymałość – rozumiane jako pochodna funkcji wytrzymałości od czasu wygrzewania – jest podobne i zależne od maksymalnej temperatury. Dla wyższych temperatur maksymalnych tempo spadku jest mniejsze, co można argumentować większymi zniszczeniami w strukturze betonu powstałymi w fazie początkowej (nagrzewania).



Rys. 9. Zakres wyników względnej wytrzymałości resztkowej betonu jako funkcji czasu wygrzewania, różne temperatury maksymalne, różni autorzy przywołani w tej części pracy

Tab. 4. Współczynniki korelacji pomiędzy czasem wygrzewania a względną wytrzymałością resztkową betonu $R_{rs}(\theta)$ dla temperatury maksymalnej równej 500°C

Współczynnik korelacji	Wartość współczynnika
Pearson	-0,98
Spearman	-0,86
Kendall	-0,75

2.1.3 Prędkość nagrzewania

W przypadku pożaru temperatura otoczenia rośnie bardzo szybko (rys. 4), nawet do $100^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Jednak temperatura elementu betonowego znajdującego się w pomieszczeniu objętym pożarem rośnie zdecydowanie wolniej. Wysokie ciepło właściwe (które dodatkowo rośnie wraz ze wzrostem temperatury i podwaja swoją wartość przy 100°C [21]), przewodność cieplna na poziomie 1 W/mK (która dodatkowo spada wraz ze wzrostem temperatury) i rozmiary oraz masa elementu powodują, że transfer ciepła wewnątrz elementu z betonu przebiega znacznie wolniej. Powoduje to, że jedynie zewnętrzne warstwy faktycznie osiągają wysokie temperatury, a beton wewnątrz pozostaje znacznie chłodniejszy.

Wpływ prędkości nagrzewania na wytrzymałość resztkową został przebadany w [37]. Dwie prędkości o wartościach $3,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ i $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ zastosowane przy wygrzewaniu próbek nie wykazały dużych różnic w wartościach wytrzymałości resztkowej. Natomiast Mohamedbhai w [36] wskazuje na istnienie zależności pomiędzy tempem nagrzewania, a wytrzymałością resztkową. Badania te nie dają jednak możliwości wyznaczenia

jednolitego trendu. Dodatkowo dla temperatur maksymalnych powyżej 600°C nie obserwuje się wpływu szybkości nagrzewania. W dwóch badaniach o podobnej metodzie zastosowane zostały dwa różne tempa: 2,5°C/min w [23] oraz 10°C/min w [22]. Wyniki wskazują na większą degradację betonu dla niższego tempa nagrzewania. Powodem wydaje się być czas ekspozycji, który jest znacznie dłuższy w przypadku niższego tempa, gdyż założeniem eksperymentu było dojście do temperatury maksymalnej.

Współczynniki korelacji pomiędzy wytrzymałością resztkową, a prędkością nagrzewania dla badań przedstawionych w tej części zostały obliczone dla temperatury maksymalnej 500°C i przedstawione w tab. 5. Bardzo niskie wartości wszystkich współczynników wskazują na minimalną zależność dodatnią, a co ważniejsze wskazują na niewielki wpływ prędkości nagrzewania na względną wytrzymałość resztkową betonu

Tab. 5. Współczynniki korelacji pomiędzy prędkością nagrzewania, a względną wytrzymałością resztkową $R_{rs}(\vartheta)$ dla temperatury maksymalnej równej 500°C

Współczynnik korelacji	Wartość współczynnika
Pearson	0,21
Spearman	0,21
Kendall	0,17

2.1.4 Prędkość i rodzaj ochładzania

Gdy w badaniu ekspozycja na wysoką temperaturę dobiegnie końca, następuje ochłodzenie nagrzanego elementu. Warunki w jakich odbywa się spadek temperatury definiują trzy podstawowe rodzaje ochładzania:

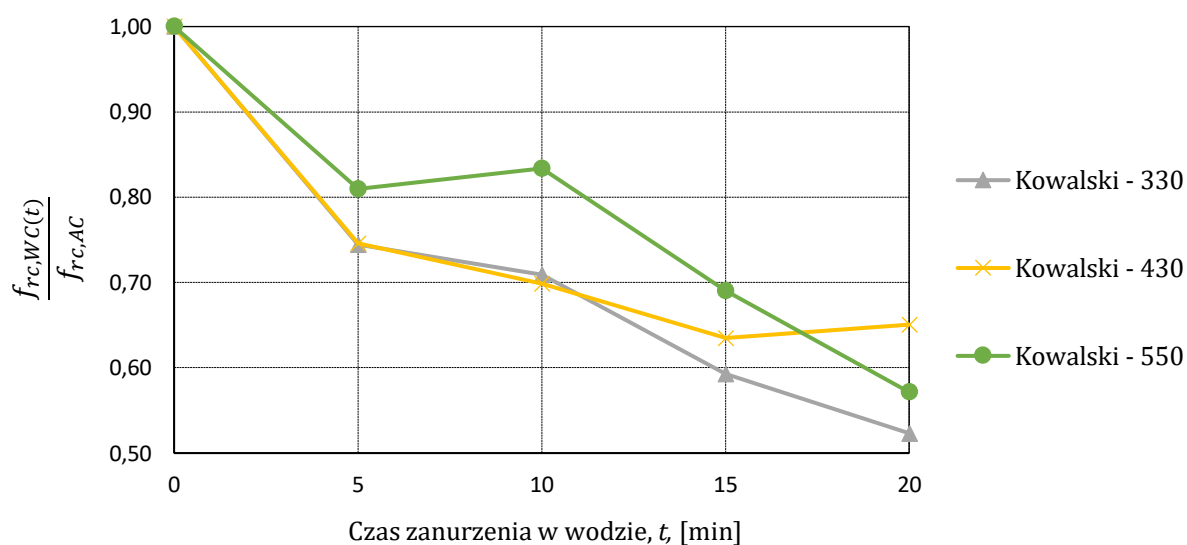
- Chłodzenie w powietrzu o wysokiej temperaturze – powolne obniżanie temperatury próbki zachodzi poprzez utrzymanie temperatury otoczenia na wysokim poziomie i stopniowe jej obniżanie. Jest to sposób oddający warunki panujące wewnątrz elementów – powolne obniżanie temperatury spowodowane wysokim ciepłem właściwym betonu.
- Chłodzenie w powietrzu o temperaturze pokojowej – szybkie obniżanie temperatury próbki poprzez umieszczeniu jej w powietrzu o temperaturze pokojowej. Jest to odwzorowanie zmiany temperatury w zewnętrznych częściach elementu – szybka zmiana temperatury po zniknięciu źródła ciepła.
- Chłodzenie w wodzie – bardzo szybkie obniżanie temperatury próbki poprzez umieszczenie jej w wodzie o temperaturze pokojowej. Jest to odwzorowanie zmian temperatury na powierzchni elementu poddanego działaniu wody podczas gaszenia pożaru.

Tab. 6 przedstawia listę publikacji zajmujących się wpływem rodzaju i/lub szybkości chłodzenia na spadek wytrzymałości resztkowej betonu. W [38] porównano chłodzenie w powietrzu i w wodzie dla różnych wartości temperatury maksymalnej. Chłodzenie wodne realizowane było poprzez zanurzanie próbek w wodzie na określony czas (od 5 do 20 min), a później kontynuowanie chłodzenia w powietrzu. Kolejnego dnia przeprowadzone zostały badania wytrzymałości, które pokazały znaczenie czasu zanurzenia. Z kolei rys. 10 przedstawia porównanie względnej wytrzymałości resztkowej zanurzanych w wodzie próbek w stosunku do próbek niezanurzanych. Okazuje się, że im dłuższy czas zanurzenia tym niższa względna wytrzymałość resztkowa. Fakt ten można przypisać dodatkowym zniszczeniom spowodowanym poprzez szok termiczny. Dodatkowo im niższa temperatura maksymalna, tym większy wpływ szoku na wytrzymałość resztkową.

Tab. 6. Zestawienie badań na temat wpływu rodzaju i prędkości ochładzania na wytrzymałość resztkową betonu

Autor	Próbka	Wielość próbki	Rodzaj betonu	Zakres temperatury	Rodzaj ochładzania	Wiek betonu
Kowalski [38]	Walcowa	D 100mm, H 200mm	NSC	330-550°C	Chł. w powietrzu Chł. w wodzie	130 dni
Peng [39]	Sześcienna	100mm	HSC	200-800°C	Chł. w powietrzu Chł. w wodzie	56 dni
Yang [40]	Sześcienna	100mm	NSC	200-800°C	Chł. w powietrzu Chł. w wodzie	90 dni 120 dni
Husem [41]	Beleczka	40x40 x160mm	NSC, HSC	200-1000°C	Chł. w powietrzu Chł. w wodzie	28 dni
Mendes [42]	Walcowa	D 100mm, H 200mm	NSC	400-800°C	Chł. w powietrzu Chł. w wodzie	90 dni
Bingol [43]	Walcowa	D 100mm, H 200mm	NSC	100-700°C	Chł. w powietrzu Chł. w wodzie	28 dni
Li [44]	Sześcienna	100mm	HSC	100-800°C	Chł. w powietrzu	90 dni
Luo [45]	Sześcienna	100mm	NSC, HSC	800-1100°C	Chł. w powietrzu Chł. w wodzie	90 dni
Shaikh [46]	Walcowa	D 100mm, H 200mm	NSC	200-800°C	Chł. w powietrzu Chł. w wodzie	56 dni

Wang [47]	Sześcienna	100mm	NSC	200-800°C	Chł. w powietrzu Chł. w wodzie	130-142 dni
Li [48]	Walcowa	D 100mm, H 200mm	NSC	150-750°C	Chł. w powietrzu Chł. w wodzie	90 dni
Karakoç [49]	Walcowa	D 100mm, H 200mm	NSC	700°C	Chł. w powietrzu Chł. w wodzie	1 rok



Rys. 10. Względna wytrzymałość resztkowa betonu zanurzonego w wodzie i później przechowywanego w powietrzu w porównaniu do wytrzymałości resztkowej betonu chłodzonego w powietrzu jako funkcja czasu zanurzenia dla różnych temperatur wygrzewania: 330°C, 430°C i 550°C, na podstawie [38]

Podobne badania zostały przedstawione w [39–41], a ich wyniki potwierdzają wcześniej przedstawione wnioski. W [42] badano wpływ szybkiego chłodzenia w wodzie na wytrzymałość resztkową betonu z dodatkiem żużla. Wyniki ponownie potwierdziły większą utratę wytrzymałości w przypadku chłodzenia wodą – wytrzymałość spadła dodatkowo o około 20% w porównaniu do chłodzenia w powietrzu. Dodatkowo zauważono, że próbki wykonane przy użyciu CEM I wykazują znacznie niższą wytrzymałość resztkową niż próbki, dla których część wagi cementu została zastąpiona żużlem. Może to być spowodowane rehydratacją CaO w Ca(OH)_2 , za czym idzie powiększenie objętości i dalsza degradacja struktury betonu.

Przedstawione w [43] badania potwierdziły wyższą wytrzymałość resztkową dla chłodzenia powietrzem, wskazując największą różnicę dla zakresu temperatur maksymalnych od 400°C do 500°C. W [44] badania zostały przeprowadzone tylko dla chłodzenia w powietrzu ale zaproponowano dwa rodzaje takiego chłodzenia. Chłodzenie

w piecu (powolny spadek temperatury wraz ze spadkiem temperatury we wnętrzu wyłączonego pieca) i chłodzenie w powietrzu o temperaturze pokojowej.

Badania zostały też poszerzone o dodatkową zmienną, tj. część chłodzonych próbek została przebadana bezpośrednio po ochłodzeniu, a reszta 30 dni po powrocie do temperatury pokojowej. Po testach wytrzymałościowych autorzy postawili następujące wnioski: chłodzenie w wysokiej temperaturze powoduje większe straty wytrzymałości bezpośrednio po ochłodzeniu (spowodowane dodatkową ekspozycją w czasie studzenia), jednak ta degradacja betonu jest łatwiejsza w odwróceniu niż spękania struktury spowodowane szokiem termicznym w przypadku chłodzenia w powietrzu. Co potwierdzono badając wytrzymałość po 30 dniach rehydratacji. Początkowa duża różnica w wytrzymałości (12 pkt. procentowych) na korzyść chłodzenia w temperaturze pokojowej zmienia się w niewielką różnicę na korzyść chłodzenia w wysokiej temperaturze (5 pkt. procentowych wg tab. 7).

Tab. 7. Porównanie wartości względnej wytrzymałości betonu $Rrs(\Theta)$ w zależności od rodzaju chłodzenia i czasu rehydratacji, na podstawie [44]

	Bezpośrednio po ochłodzeniu	Po 30 dniach rehydratacji
$Rrs = \frac{f_{rc,AC}}{f_{c,20}}$	0,77	0,82
$Rrs = \frac{f_{rc,WC}}{f_{c,20}}$	0,65	0,87

W [45] porównywano wpływ chłodzenia w wodzie i w powietrzu o wysokiej temperaturze (w wyłączonym piecu) po wygrzaniu próbek do temperatury 800°C. Autor użył dwóch rodzajów próbek: NSC i HSC. Wyniki przedstawiono w tab. 8. Zauważalny jest tu negatywny wpływ chłodzenia w wodzie – większy dla NSC. Tę obserwację potwierdzono również w [46].

Tab. 8. Porównanie wyników względnej wytrzymałości resztkowej betonu $Rrs(\Theta)$ w zależności od rodzaju chłodzenia i od rodzaju betonu, na podstawie [45]

	NSC	HSC
Chłodzenie w powietrzu	0,45	0,26
Chłodzenie w wodzie	0,32	0,21

Publikacja [47] również podejmuje problem wpływu rodzaju chłodzenia na wytrzymałość resztkową. Próbkę były chłodzone na dwa sposoby: chłodzenie w powietrzu o wysokiej temperaturze i poprzez spryskiwanie próbki zimną wodą przez

30min bezpośrednio po wyjęciu z pieca. Dokładnie taki sam schemat chłodzenia został zastosowany w [48], a próbki zostały później przebadane po różnych czasach rehydracji (0, 30, 60 i 90 dni). Zestawienie wyników obu badań przedstawiono w tab. 9.

Wyniki te potwierdzają mniejszą wytrzymałość resztkową próbek studzonych wodą bezpośrednio po ostudzeniu. Dodatkowo zauważono zanik wpływu rodzaju chłodzenia po rehydracji – im dłuższa ona była tym mniejszy wpływ był zauważalny.

Tab. 9. Porównanie wyników względnej wytrzymałości resztkowej betonu w zależności od rodzaju chłodzenia i czasu rehydracji, na podstawie [47,48]

		$\frac{(f_{rc,AC} - f_{rc,AC})}{f_{c,20}} \cdot 100\%$							
Autor	Temp.								
	Rehyd.	150°C	200°C	300°C	400°C	450°C	600°C	750°C	800°C
Li [48]	0 dni	1,5%	-	2,5%	-	5,8%	14,0%	13,6%	-
	30 dni	0,0%	-	-0,2%	-	2,9%	4,5%	1,5%	-
	60 dni	0,1%	-	2,9%	-	3,7%	-6,3%	-3,0%	-
	90 dni	-1,1%	-	0,5%	-	1,7%	-6,5%	-2,5%	-
Wang [47]	30 dni	-	5,5%	-	6,7%	-	-3,6%	-	-1,5%

W [49] zastosowano trzy metody chłodzenia: chłodzenie w wodzie, chłodzenie w powietrzu o wysokiej temperaturze i w temperaturze pokojowej. Próbki zostały wygrzane do temperatury 700°C i przebadane bezpośrednio po ostygnięciu. W przeciwieństwie do poprzednich badań największą wytrzymałość resztkową zaobserwowano dla próbek chłodzonych w wodzie, podczas gdy dla próbek chłodzonych w powietrzu wytrzymałość ta była mniejsza. Temperatura powietrza chłodzącego próbkę nie wykazała wpływu, osiągnęte były podobne wytrzymałości dla obu rodzajów chłodzenia w powietrzu.

Podsumowując przegląd badań dotyczący szybkości i rodzaju ochładzania. Stwierdza się, że rodzaj chłodzenia wpływa na względną wytrzymałość resztkową betonu [50]. Według [51] szybkie chłodzenie powoduje więcej wewnętrznych uszkodzeń struktury betonu, co jest spowodowanych gradientem temperatury w materiale [52,53], jednocześnie zatrzymuje ono proces dehydratacji i powoduje mniejszą utratę masy [54]. Wolne chłodzenie skutkuje natomiast dłuższą ekspozycją na wysoką temperaturę i większym zakresem dehydratacji. Większość publikacji potwierdza fakt negatywnego wpływu chłodzenia wodnego na wytrzymałość resztkową bezpośrednio po ochłodzeniu. Niemniej, efekt ten zanika po procesie rehydratacji i po około 60-90 dniach przestaje być istotny.

2.1.5 Rehydratacja aktywnych składników betonu

Po ekspozycji betonu na wysoką temperaturę, w czasie której zachodzi dehydratacja zaczynu cementowego, następuje ochłodzenie, a po nim – już w temperaturze pokojowej – ponowna hydratacja (rehydratacja) [55]. Zaczyn cementowy, który stracił część cząsteczek wody, ponownie wchłania je w swoją strukturę krystaliczną. Wiele prac potwierdza jej korzystny wpływ na wytrzymałość resztkową betonu (tab. 10) jako przyczynę podając podobieństwo do wstępnej hydratacji, odbywającej się w świeżym betonie. Kluczową rolę dla tego zjawiska pełni oczywiście woda. Prawdą jest, że odzyskanie pełnej wytrzymałości jest niemożliwe, niemniej stopień w jakim beton potrafi się odbudować jest zaskakujący. Dodatkowo niektóre składniki betonu – jak wapienie czy krzemiany wapnia – w wysokiej temperaturze rozkładają się na czynniki aktywne, które pod wpływem wody i dwutlenku węgla podnoszą trwałe właściwości betonu [56].

Tab. 10. Zestawienie badań na temat wpływu rehydratacji betonu na wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie

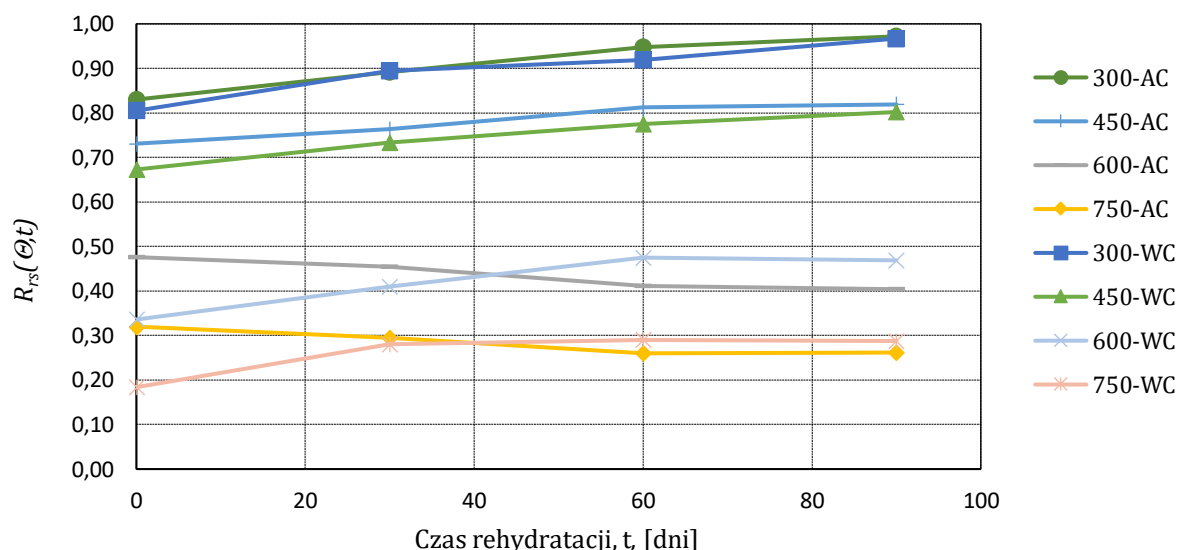
Autor	Zakres temp.	Czas wygrzew.	Rodzaj ochładzania	Typ rehydratacji	Czas rehydratacji	Wiek betonu*
Li [48]	150-750°C	2h 30min	Chłodzenie w powietrzu Chłodzenie w wodzie	Rehydratacja w powietrzu	30-90 dni	90 dni
Papayianni [57]	200-800°C	3h	Chłodzenie w powietrzu	NA	1-90 dni	180 dni
Poon [58]	600-800°C	1h	Chłodzenie w powietrzu	Rehydratacja w powietrzu Rehydratacja w wodzie	7-56 dni	60 dni
Souza [59]	300-600°C	2h 2h 40min	Chłodzenie w powietrzu	Rehydratacja w powietrzu Rehydratacja w wodzie	28-112 dni	100 dni
Lin [60]	400-1000°C	2h	NA	Rehydratacja w powietrzu Rehydratacja w wodzie	7-180 dni	90 dni
Mirmomeni [61]	300-600°C	15min 2h	Chłodzenie w powietrzu Chłodzenie w wodzie	Rehydratacja w wodzie	2-28 dni	28 dni
Horiguchi [62]	200-400°C	2h	NA	Rehydratacja w powietrzu Rehydratacja w wodzie	90-180 dni	NA
Park [63]	300-700°C	1h	Chłodzenie w wodzie	Rehydratacja w powietrzu Rehydratacja w wodzie	7-30 dni	28 dni

* Wiek betonu w czasie wygrzewania

Rehydratacja po ekspozycji na wysoką temperaturę może zostać przyporządkowana do trzech kategorii:

- Rehydratacja w wodzie (WC) – materiał jest w pełni zanurzony w wodzie przez cały czas rehydratacji.
- Rehydratacja w powietrzu (AC) – materiał cały czas rehydratacji przebywa w powietrzu.
- Rehydratacja mieszana (MC) – materiał jest zanurzony w wodzie jedynie przez pewien okres, reszta rehydratacji przebiega w powietrzu.

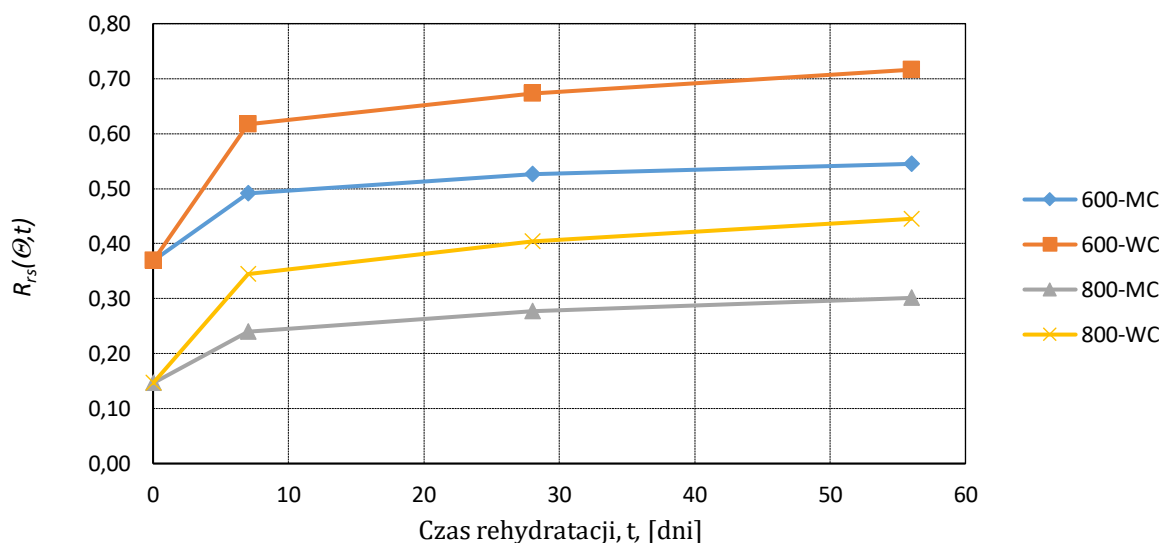
W [48] opisane zostały szeroko zakrojone badania nad zależnością wytrzymałości resztkowej od czasu rehydratacji. Próbki po wygrzaniu zostały poddane rehydratacji w czasie 0, 30, 60 i 90 dni. Analizując wyniki (rys. 11) można stwierdzić, że największy wpływ rodzaju rehydratacji widoczny jest na początku procesu, dodatkowo wyższa temperatura wygrzewania pogłębia ten efekt.



Rys. 11. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja czasu rehydratacji dla różnych temperatur wygrzewania $\theta=300^{\circ}\text{C}$, 450°C , 600°C i 750°C , i dla różnych typów chłodzenia (AC – chłodzenie w powietrzu, WC – chłodzenie w wodzie) wg Li [48]

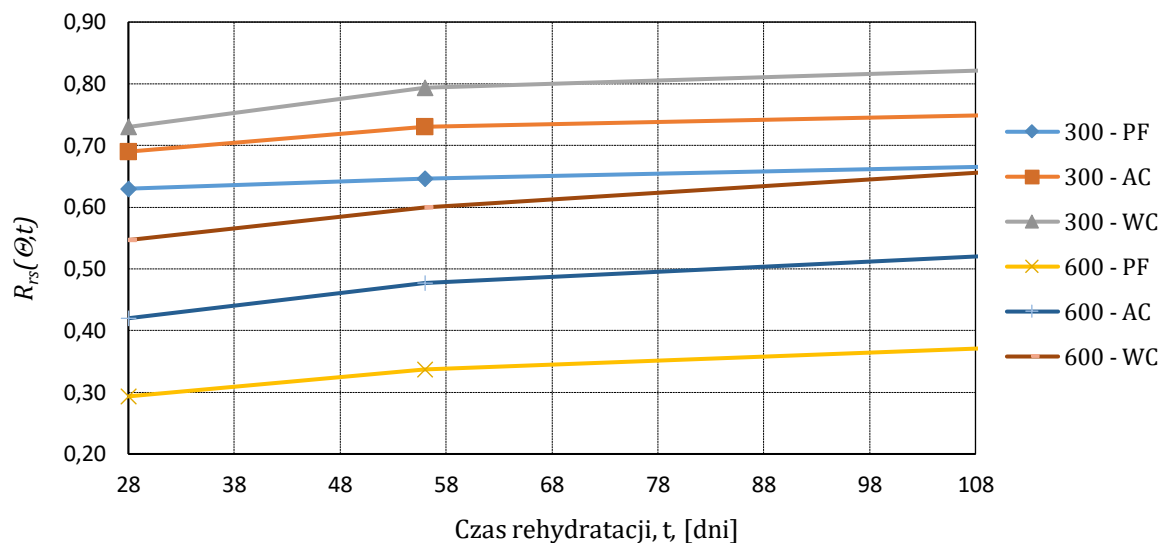
W [58] opisane zostały badania gdzie próbki zostały poddane wygrzewaniu w temperaturze 600°C i 800°C . W eksperymencie zastosowano cztery różne czasy rehydratacji: 0 (badania bezpośrednio po ochłodzeniu próbki), 7, 28 i 56 dni. Dodatkowo zastosowano dwa rodzaje rehydratacji: rehydratacja w wodzie i rehydratacja mieszana, gdzie okres zanurzenia w wodzie trwał dwie godziny. Wyniki badania pokazują jak ogromny wpływ na wytrzymałość resztkową betonu ma rehydratacja (rys. 12). Próbki wygrzane do 800°C i poddane rehydratacji w wodzie zwiększyły swoją wytrzymałość trzykrotnie. Można zauważyć powtarzający się schemat, gdzie wytrzymałość rośnie

bardzo gwałtownie przez pierwsze 7 dni (średni przyrost 75%). Później przyrost nie jest już tak intensywny i 28 dni daje przyrost w wysokości 100%, a 56 dni około 115%.



Rys. 12. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja czasu rehydracji dla różnych temperatur wygrzewania $\theta=600^{\circ}\text{C}$ i 800°C i dla różnych typów rehydracji: MC – rehydracja mieszana, WC – rehydracja w wodzie wg Poon [58]

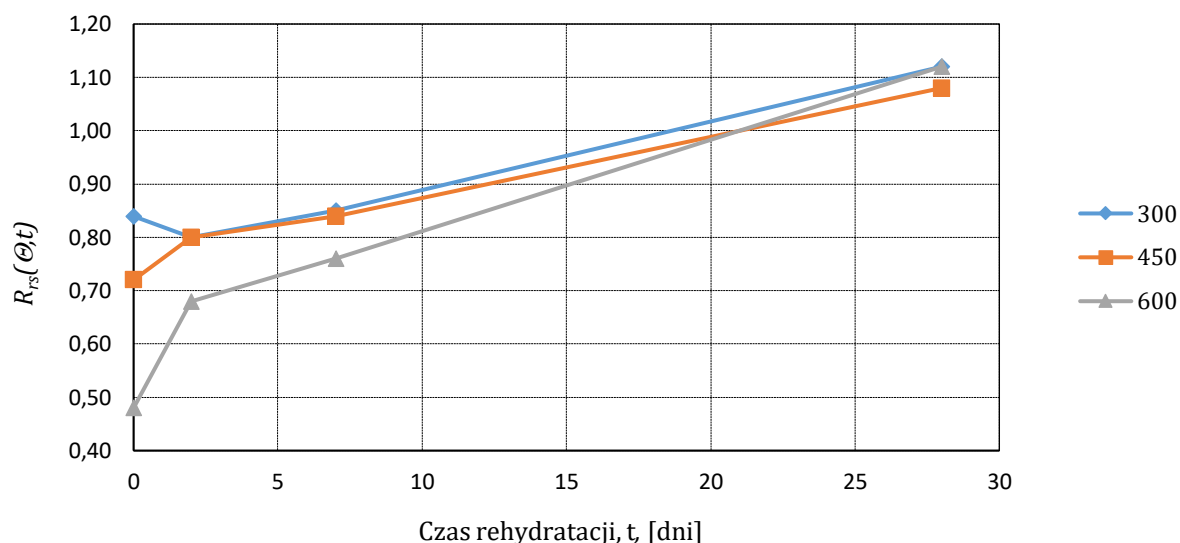
Opisywane w [59] próbki zostały wygrzane do temperatury 300°C i 600°C , aby później poddać je rehydracji w czasie 28, 56 bądź 112 dni. Zastosowane zostały trzy różne typy rehydracji: w wodzie, powietrznej i dodatkowej, gdzie próbki zostały po wygrzaniu i ostudzeniu owinięte folią, tak aby nie docierała do nich jakakolwiek woda. Wyniki wskazują, na istotny wpływ wody na wytrzymałość resztkową (rys. 13). Dodatkowo stwierdzono, że wzrost wytrzymałości jest znacznie wyraźniejszy na początku procesu rehydracji.



Rys. 13. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja czasu rehydracji dla różnych temperatur wygrzewania $\theta=300^{\circ}\text{C}$ i 600°C , i dla różnych typów rehydracji: WC – rehydracja w wodzie, AC – rehydracja powietrzna, PF – rehydracja z folią blokującą wilgoć wg Souza [59]

W [60] przedstawiono podobne badania, jednak dla większego zakresu temperatur – od 400°C do 1000°C . Wyniki również potwierdzały, że większa wilgotność środowiska skutkuje zwiększoną efektywnością rehydracji i tym samym wyższą wytrzymałością resztkową.

Ciekawe badania nad wytrzymałością resztkową betonu samozagęszczającego zostały opisane w [61], dla temperatur wygrzewania $300\text{--}600^{\circ}\text{C}$ i czasów rehydracji w wodzie wynoszących 0, 2, 7 i 28 dni. Wyniki wskazują na olbrzymi potencjał betonu do odzyskiwania wytrzymałości przez rehydrację (rys. 14). Niektóre próbki wykazały nawet wytrzymałość resztkową, większą niż początkową. W [62] opisano badania nad wytrzymałością resztkową betonu wysokiej wytrzymałości wzbogaconego o włókna hybrydowe. Próbki wygrzane były do temperatur 200°C i 400°C , a rehydracja przebiegała przez 90 i 180 dni, zastosowano zarówno rehydrację w wodzie jak i powietrzną. Wyniki pokazały, że rehydracja w wodzie praktycznie przywróciła wytrzymałość do poziomu sprzed wygrzewania (powietrzna była dalece mniej efektywna). Dodatkowo stwierdzono, że rehydracja przynosi wymierne efekty jedynie podczas pierwszych 90 dni, później przyrost jest już minimalny.



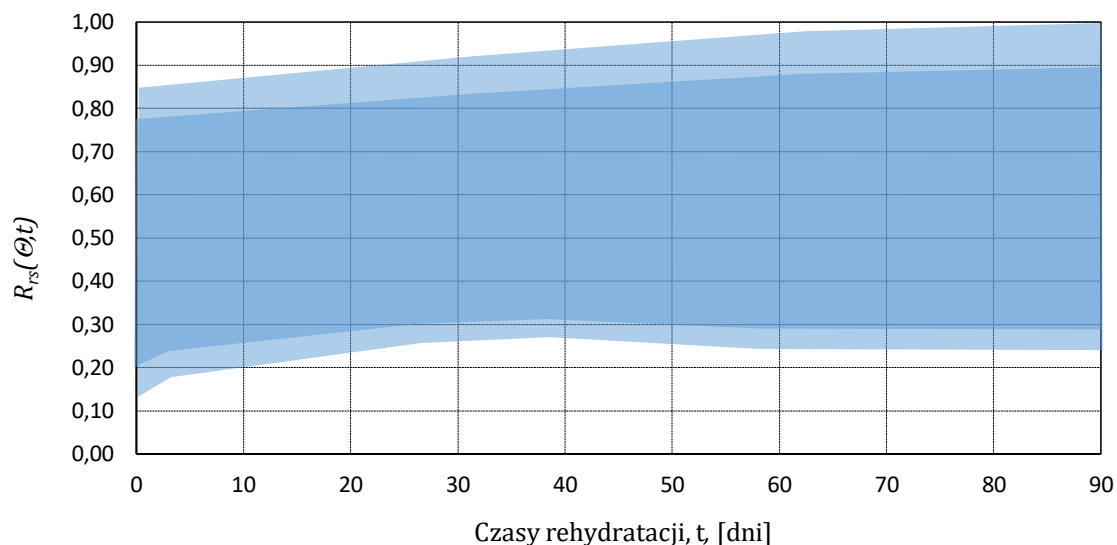
Rys. 14. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja czasu rehydracji dla różnych temperatur wygrzewania $\theta=300^{\circ}\text{C}$, 450°C i 600°C wg Mirmomeni [61]

Współczynniki korelacji dla zależności pomiędzy czasem rehydracji, a względną wytrzymałością resztkową wskazują na umiarkowanie silną zależność dodatnią (tab. 11) i sugerują istnienie monolitycznej zależności, ale niekoniecznie liniowej.

Tab. 11. Współczynniki korelacji pomiędzy czasem rehydracji a względną wytrzymałością resztkową $R_{rs}(\theta)$

Współczynnik korelacji	Wartość współczynnika
Pearson	0,62
Spearman	0,78
Kendall	0,66

Po zestawieniu wszystkich do tej pory przywołanych wyników na jednym wykresie i zaznaczeniu strefy szczególnie gęstego występowania wyników (rys. 15) można przedstawić wpływ rehydracji jako funkcję logarytmiczną. Funkcja ta opisuje również dobrze wnioski przedstawione przez badaczy – znaczący wzrost wytrzymałości notuje się w pierwszych kilkudziesięciu dniach, a później wykres powinien się „wypłaszczyć”. Wzrost wytrzymałości resztkowej jest związany z rehydracją cementu, co powoduje, że ilość dostarczanej wody (wilgotność) odgrywa kluczową rolę. Potwierdzają to także badania, gdzie metody rehydracji w których wykorzystywana jest woda dają lepsze wyniki niż metody z użyciem wyłącznie powietrza [63]. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że w betonie nagrzanym do temperatur niższych niż 300°C , obserwuje się postępujące w dłuższym czasie niszczenie struktury betonu z powodu rozszerzania się spoiwa wywołanego poprzez siarkę [64]. Efekt ten może zniwelować wzrost wytrzymałości spowodowany rehydracją.



Rys. 15. Zakres wyników względnej wytrzymałości resztkowej betonu jako funkcji czasu rehydracji, różne temperatury maksymalne, różni autorzy przywołani w tej części pracy

2.1.6 Wiek betonu w czasie ekspozycji

Pożar budynku to najczęściej zdarzenie losowe, które może dotknąć zarówno budynku bardzo starego, jak i takiego, którego budowa nie została jeszcze ukończona. Można podejrzewać, że wiek betonu w czasie ekspozycji będzie wpływał na wytrzymałość resztkową. Badania opisane w [65,66] zostały przeprowadzone szybko po rozformowaniu próbek, które miały od 1 do 28 dni. Okazało się, że im młodszy był beton, tym większy był potencjał rehydracji i odzyskania wyższego procentu początkowej wytrzymałości (wyjątek stanowiła próbka jednodniowa, która nie była w stanie przetrwać ekspozycji i uległa zniszczeniu). Wnioski te potwierdzone są w [67], gdzie podobne badania zostały przeprowadzone na kompozytach cementowych. Spójne rezultaty wymienionych wcześniej w tym punkcie badań każą sądzić, że młodszy beton lepiej radzi sobie z ekspozycją na wysoką temperaturę i przy takich samych warunkach ekspozycji powinien cechować się wyższą względną wytrzymałością resztkową. Należy jednocześnie przypuszczać, że znaczenie tego czynnika maleje z wiekiem betonu.

2.1.7 Wpływ obciążenia w czasie ekspozycji

Elementy nośne konstrukcji są poddane działaniu obciążeń. Nie inaczej jest w czasie pożaru, a co za tym idzie – ekspozycji na wysoką temperaturę. Wpływ obciążenia na wytrzymałość w wysokiej temperaturze został opisany w [68–70]. Wszystkie prace wskazują na pozytywny wpływ obciążenia wywołującego ściskanie, zmniejszało ono utratę wytrzymałości. Problem wpływu obciążenia na wytrzymałość resztkową został poruszony także w [71], próbki badano przy trzech poziomach obciążenia (0, 20% i 40% wytrzymałości początkowej). Po ekspozycji na wysoką temperaturę i ochłodzeniu w

stanie obciążenia, przeprowadzone zostały badania wytrzymałości. Stwierdzono bardzo istotny pozytywny wpływ obciążenia ściskającego beton (dla obciążenia na poziomie 20% wytrzymałości początkowej, wytrzymałość resztkowa była większa o około 15% niż próbek nieobciążonych). Powodem może być ograniczenie odkształceń termicznych przez obciążenie, a co za tym idzie zminimalizowanie uszkodzeń betonu. W pracy [45] z kolei omówiono odkształcenia spowodowane nieskrępowanym rozszerzaniem betonu poddanego wysokiej temperaturze. Stwierdzono, że rozszerzanie betonu w wysokiej temperaturze zachodzi liniowo i nie zależy od tempa nagrzewania. Można zatem z pewnością powiedzieć, że ograniczenie odkształceń poprzez obciążenie ma pozytywny wpływ na wytrzymałość resztkową, gdyż skrępowany materiał jest mniej podatny na uszkodzenia spowodowane rozszerzaniem.

2.1.8 Porowatość betonu

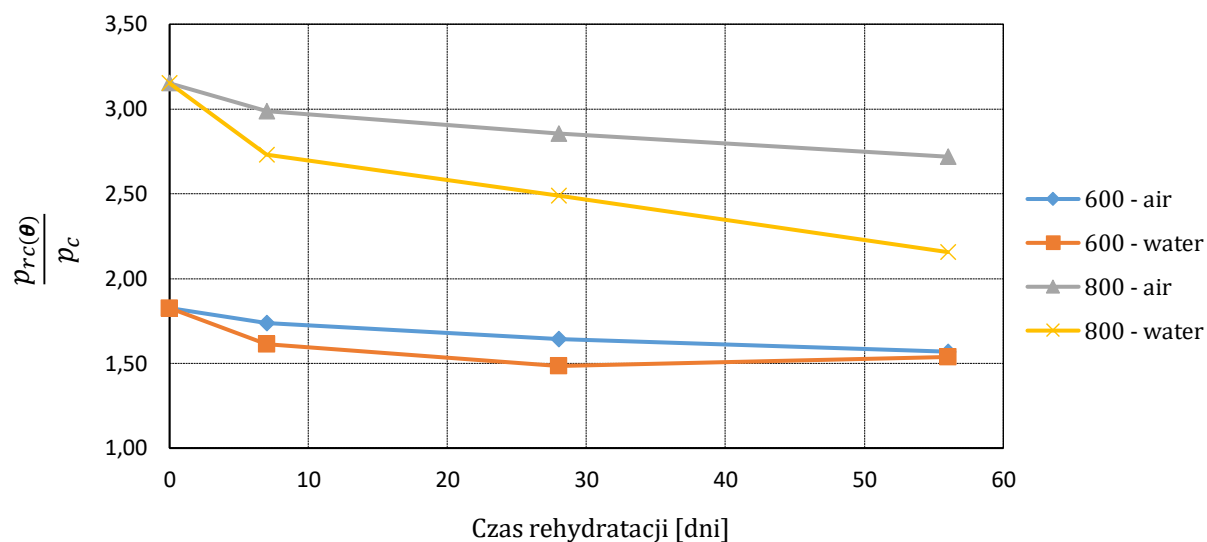
Porowatość, wielkość porów i ich rozmieszczenie są kluczowymi czynnikami wpływającymi na wytrzymałość i odporność betonu na wysoką temperaturę. Można zatem sądzić, że istnieje związek między porowatością a wytrzymałością resztkową betonu. Opublikowane badania na ten temat zostały zebrane w tab. 12.

Tab. 12. Zestawienie badań na temat wpływu porowatości na wytrzymałość resztkową betonu

Autor	Rodzaj betonu	Zakres temp.	Czas wygrzewania	Porowatość	Wiek betonu
Hager [26]	HSC	200-1000°C	3h	1,4-2%	90 dni
Poon [58]	NSC, HSC	600-800°C	1h	6,69-9,52%	60 dni
Chroma [72]	NSC	200-1200°C	2h	15%	28 dni
Chan [73]	NSC, HSC	800-1100°C	1h	NA	90 dni

Ekspozycja na wysoką temperaturę powoduje zwiększenie porowatości, ale również powoduje zmianę struktury porów w betonie [74]. Proces dehydratacji zaczynu C-S-H powoduje zmniejszenie jej objętości, co staje się głównym powodem zwiększania się objętości porów i powstawania nowych. Prawdą jest, że przy ogrzewaniu zaczyn początkowo się rozszerza, ale po przekroczeniu temperatury 200°C gwałtownie się kurczy, co powoduje opisaną wcześniej zmianę w porowatości. W artykule [58] przedstawiono badania przeprowadzone przy użyciu aparatu do porozymetrii rtęciowej (MIP), w celu poznania rozkładu i wielkości porów. Porównano wartości początkowe z wartościami po wygrzaniu i rehydratacji. Próbkę wygrzaną w 600°C wykazały

bezpośrednio po ochłodzeniu 2-krotnie większą porowatość, a wygrzane w 800°C 3-krotnie większą. Jednak wraz z upływającym czasem rehydratacji zauważono znaczący spadek objętości porów. Wyniki zostały przedstawione na rys. 16, gdzie można zauważyć, że niższa porowatość początkowa oznacza nieznacznie wyższą wytrzymałość resztkową.



Rys. 16. Względna porowatość jako funkcja czasu rehydratacji dla różnych warunków rehydratacji: air – rehydratacja powietrzna, water – rehydratacja w wodzie i dla różnych temperatur wygrzewania $\theta=600^{\circ}\text{C}$ i 800°C wg Poon [58]

Analizując dane pod względem zmian zachodzących w czasie rehydratacji, szczególnie istotne jest tempo odzyskiwania wytrzymałości. Okazuje się, że wzrosty względnej wytrzymałości są bardzo podobne, niezależnie od wartości porowatości (tab. 13). W [26] użyto MIP do zbadania zmian w sieci porów betonu. Badania zostały przeprowadzone po ochłodzeniu wygrzanych próbek. Wyniki są spójne z pozostałymi pracami o tej tematyce (tab. 14), obserwuje się podobny stopień wzrostu porowatości i korespondujący spadek względnej wytrzymałości resztkowej.

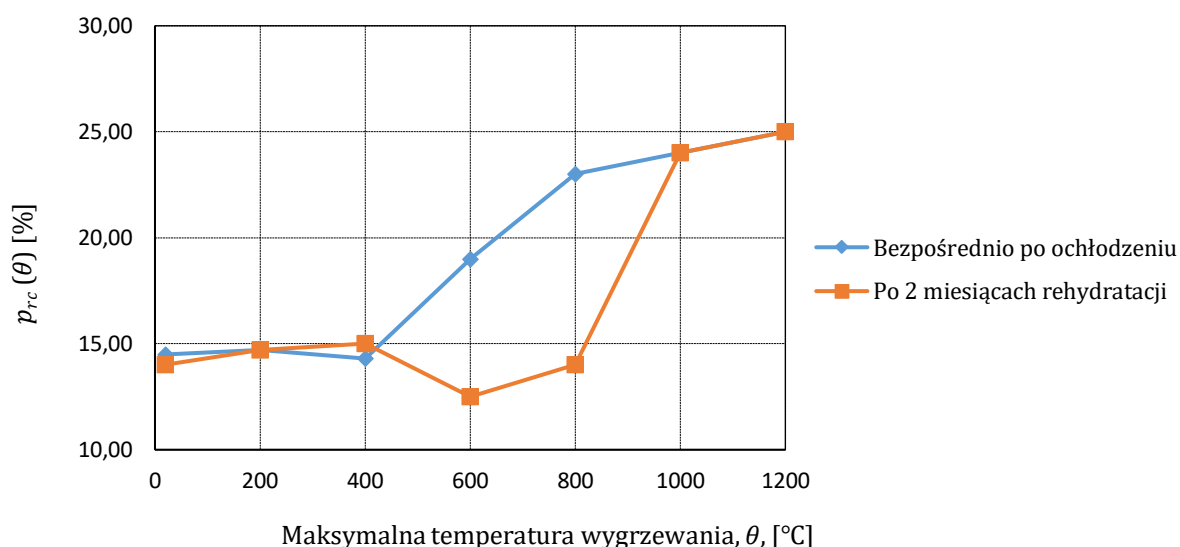
Tab. 13. Porowatość, względna wytrzymałość resztkowa i względna porowatość jako funkcja temperatury nagrzewania i czasu rehydratacji dla różnych mieszanek (HS-CC – próbka kontrolna, HS-FA30 – 30% cementu zastąpione popiołem lotnym), na podstawie [58]

		Bezpośrednio po ochłodzeniu				Rehydratacja w powietrzu - 28 dni				Rehydratacji w wodzie - 56 dni			
Próbka	Temp. (θ)	600°C	600°C	800°C	800°C	600°C	600°C	800°C	800°C	600°C	600°C	800°C	800°C
	p_c	$p_{rc}(\theta)$	$Rrs(\theta)$	$p_{rc}(\theta)$	$Rrs(\theta)$	$p_{rc}(\theta)$	$Rrs(\theta)$	$p_{rc}(\theta)$	$Rrs(\theta)$	$p_{rc}(\theta)$	$Rrs(\theta)$	$p_{rc}(\theta)$	$Rrs(\theta)$
HS-CC	9,52	18,32	0,58	17,71	0,24	16,56	0,67	26,66	0,37	16,96	0,69	23,04	0,52
HS-FA30	6,69	11,28	0,67	10,44	0,32	10,1	0,77	19,6	0,47	7,96	0,93	11,91	0,79
Próbka		Procentowy zmiana wartości względem badań bezpośrednio po ochłodzeniu											
HS-CC		-	-	-	-	- 10%	+ 16%	+ 51%	+ 54%	- 7%	+ 19%	+ 30%	+ 117%
HS-FA30		-	-	-	-	- 10%	+ 15%	+ 88%	+ 47%	- 29%	+ 39%	+ 14%	+ 147%

Tab. 14. Względna porowatość i względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja temperatury wygrzewania, na podstawie [26]

	Temperatura wygrzewania				
	20°C	200°C	400°C	600°C	800°C
$\frac{p_{rc}(\theta)}{p_c}$	1,00	1,65	1,85	2,46	2,74
$Rrs(\theta)$	1,00	1,00	0,90	0,80	0,25

Bardzo interesujące wnioski zostały przedstawione w [72]. W badaniu, dla bardzo szerokiego spektrum temperatur, porównywano porowatości materiału bezpośrednio po ostudzeniu i po dwóch miesiącach rehydratacji wodnej. Wyniki wskazują, że w zakresie do 400°C porowatość jest prawie stała. Przy ekspozycji powyżej 400°C porowatość w betonie gwałtownie rośnie powodując uszkodzenia i obniżając wytrzymałość. Dla zakresu 400°C-800°C porowatość rośnie znacząco, ale rehydratacja jest w stanie odwrócić zmiany (porowatość wraca do poziomu początkowego). Powyżej 800°C uszkodzenia są na tyle poważne, że typ rehydratacji przestaje mieć znaczenie. Wyniki zostały przedstawione na wykresie zamieszczonym na rys. 17.



Rys. 17. Porowatość całkowita jako funkcja maksymalnej temperatury i rehydratacji wg Chroma [72]

Współczynniki korelacji obliczone na podstawie wyników badań przedstawionych w tej części pracy, dla zależności pomiędzy względną wytrzymałością resztkową i porowatością wskazują umiarkowanie silną zależność ujemną (tab. 15). Dodatkowo zauważono większy wpływ porowatości w HSC [73]. Pomimo uszkodzeń istniejących bezpośrednio po ochłodzeniu, dzięki rehydratacji możliwe jest przywrócenie

porowatości do sytuacji sprzed nagrzewania. Warunkiem takiego powrotu jest ekspozycja na temperaturę mniejszą niż 800°C. Przy wyższych temperaturach, pozytywny wpływ rehydratacji zaczyna być coraz mniejszy. Tempo i stopień w jakim beton jest w stanie odzyskać wytrzymałość jest bardzo podobny dla różnych wartości porowatości początkowej, każe to sądzić, że porowatość początkowa nie jest istotnym czynnikiem wpływającym na względną wytrzymałość resztkową.

Tab. 15. Współczynniki korelacji między porowatością po ekspozycji, a względną wytrzymałością resztkową $R_{rs}(\Theta)$

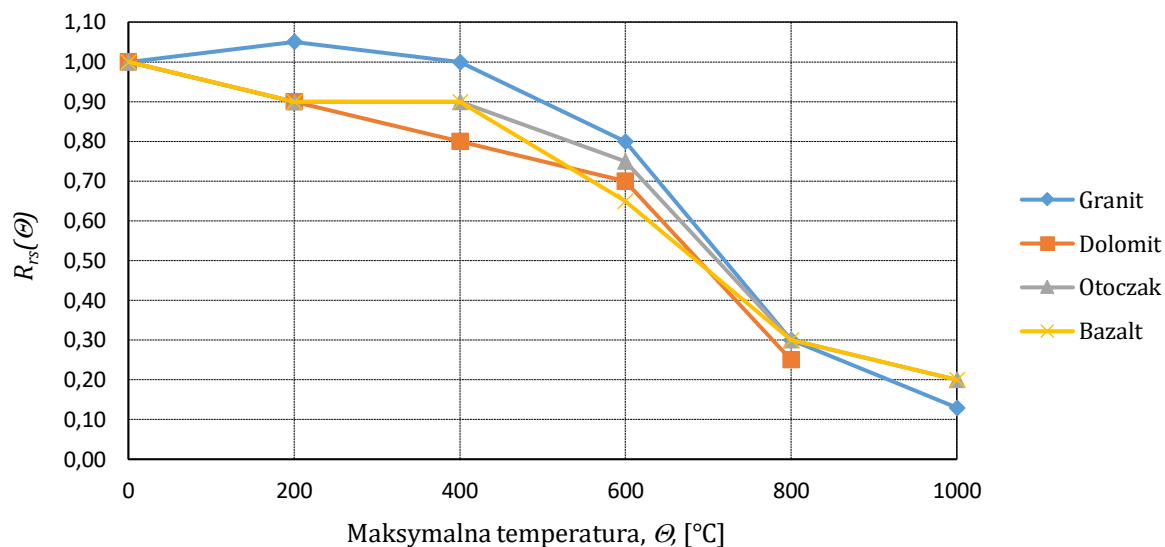
Współczynnik korelacji	Wartość współczynnika
Pearson	- 0,70
Spearman	- 0,76
Kendall	- 0,59

2.1.9 Skład betonu

Rodzaj składników betonu i ich proporcje wpływają na jego właściwości. Naturalnym jest poszukiwanie odpowiedzi na pytanie: jaki wpływ ma skład betonu na wytrzymałość resztkową? Na to pytanie próbowało odpowiedzieć wielu autorów, których prace przywołano w pkt. 2.1.9. Powstała również praca przeglądowa [75]. Dodatkowo w [76] poruszono kwestię materiału z recyklingu. Wpływ poszczególnych składników betonu został przeanalizowany w podpunktach od 2.1.9.1 do 2.1.9.3.

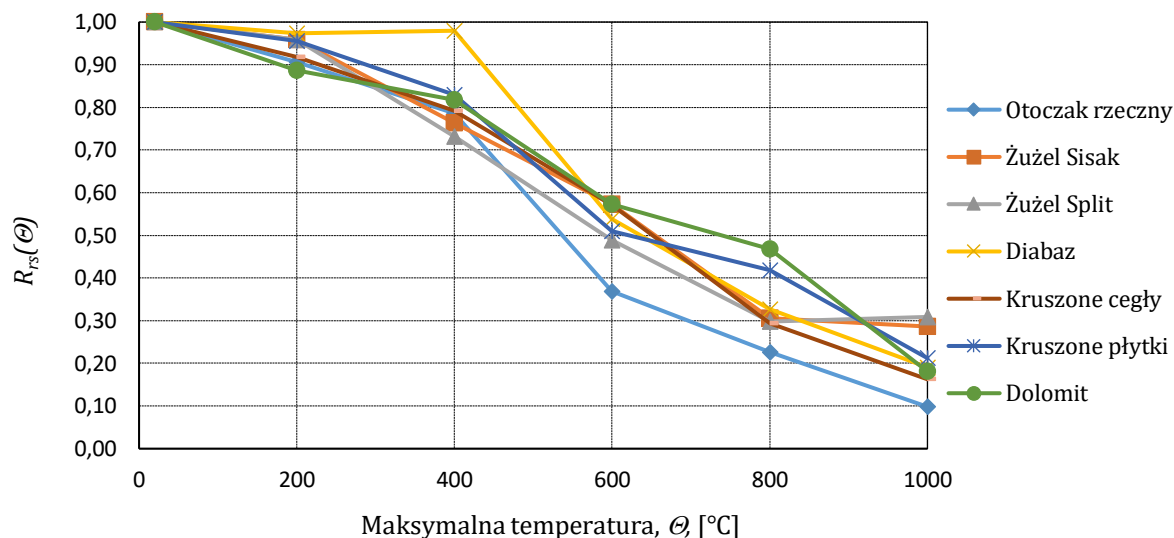
2.1.9.1 Rodzaj kruszywa

Kruszywo jest składnikiem o największym udziale w betonie (około 70% objętości). Naturalnym jest przypuszczenie, że ma ono wpływ na właściwości betonu po wygrzaniu do wysokiej temperatury. W [77] zaprezentowano bardzo szczegółowe badania nad zachowaniem się kruszywa, które dały wgląd w zjawiska zachodzące wewnątrz betonu. Najważniejszym wnioskiem pracy było stwierdzenie, że podział na kruszywo wapienne i krzemianowe występujący w [1] jest niewystarczający. Materiały znajdujące się w jednej grupie wykazywały duże zróżnicowanie w skutkach ekspozycji na wysoką temperaturę. W badaniach opisanych w [78] sprawdzano różnice we właściwościach mechanicznych betonu przy użyciu dwóch typów kruszyw: krzemianowych i wapiennych, w przypadku poddania owego betonu wysokiej temperaturze. Wnioski tej pracy sugerują wpływ rodzaju kruszywa na względną wytrzymałość resztkową betonu, ale wskazują również, że sam podział krzemianowe/wapienne jest niewystarczający.



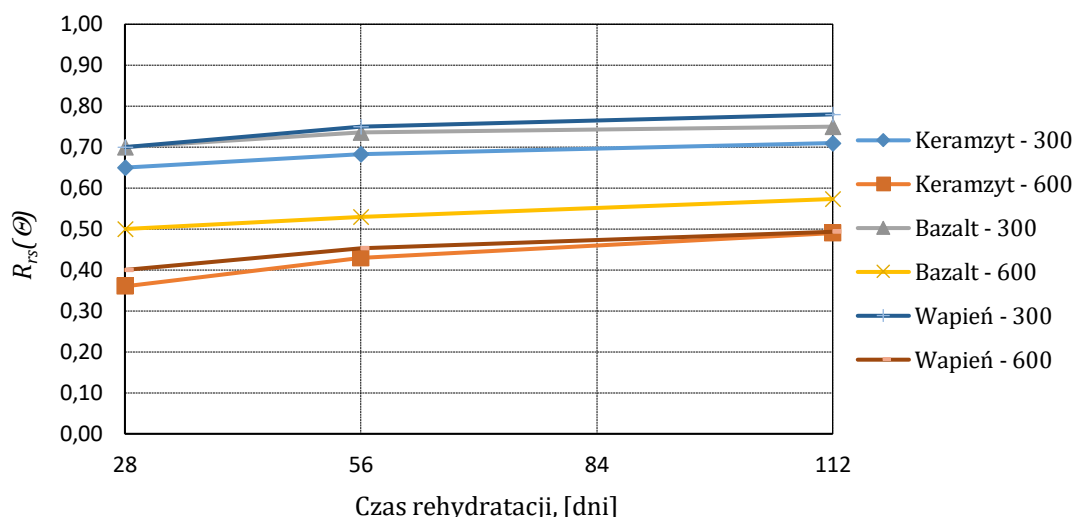
Rys. 18. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja maksymalnej temperatury dla różnych kruszyw wg Hager [26]

Badania nad wpływem kruszywa na właściwości resztkowe betonu zostały przedstawione w [26]. Cztery rodzaje HSC zostały przygotowane w ten sposób, że różniły się jedynie kruszywem. Po wygrzaniu i ochłodzeniu próbek zostały one przebadane, a wyniki przedstawia wykres na rys. 18. Okazuje się, że względna wytrzymałość resztkowa jest zbliżona dla wszystkich rodzajów kruszywa. Różnice, które można uznać za istotne są zauważalne dla temperatur do 400°C. Granit wykazuje wtedy największą wytrzymałość, a dolomit najmniejszą. Efekt ten jednak przestaje być zauważalny przy wygrzewaniu do 600°C. Powyżej tej temperatury wszystkie kruszywa zachowują się niemal identycznie. W [79] autorzy sugerują podobne wnioski na podstawie swoich badań: w zakresie temperatur od 300°C do 600°C beton z kruszywem granitowym wykazuje nieznacznie większą wytrzymałość resztkową niż z kruszywem wapiennym. Poza tym zakresem, względna wytrzymałość resztkowa betonu była bardzo zbliżona, niezależnie od rodzaju zastosowanego kruszywa. Badania opisane w [25] zostały przeprowadzone przy użyciu 7 różnych kruszyw. Próbki zostały uformowane ponownie w taki sposób, że jedyną różnicą był rodzaj kruszywa. Później zostały wygrzane, pozostawione do ochłodzenia i przebadane pod kątem wytrzymałości na ściskanie. Wykres na rys. 19 przedstawia wyniki tych badań. Niezależnie od rodzaju kruszywa, krzywe wyglądają bardzo podobnie. Wyjątek stanowi wytrzymałość betonu z diabazem dla zakresu temperatury do 400°C (jest ona znacznie większa niż dla pozostałych kruszyw) i wytrzymałość otoczaka rzeczno dla temperatur 600°C i większych (jest ona mniejsza). Analizując wyniki można więc dojść do wniosku, że nie można wskazać jednoznacznej zależności pomiędzy wytrzymałością resztkową, a rodzajem użytego kruszywa.



Rys. 19. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja maksymalnej temperatury dla różnych kruszyw wg Netinger [25]

W [59] opisano z kolei badania betonów z trzema różnymi typami kruszywa: keramzytowym, bazaltowym i wapiennym. Próbkę były wygrzewane, chłodzone i poddane rehydratacji o różnej długości. Wszystkie trzy typy betonu wykazywały podobną względną wytrzymałość resztkową, a dodatkowo odzyskiwanie wytrzymałości w czasie rehydratacji przebiegało w podobnym tempie (rys. 20). Badania opisane w [80] porównywały betony utworzone z użyciem dwóch innych rodzajów kruszywa: otoczków rzecznych i kruszywa kruszonego. Oba miały bardzo podobny skład mineralogiczny (otoczki posiadały nieznacznie więcej SiO_2 w składzie). Po wygrzaniu próbek do bardzo szerokiego zakresu temperatur maksymalnych (od 200°C do 1000°C) wykonano badania. Okazało się, że beton na kruszywie kruszonym wykazywał wyższą względną wytrzymałość resztkową. W [81] opisano zastosowanie kruszywa barytowego. Wyniki badań wskazują na zachowanie bardzo podobne jak w przypadku standardowych betonów. W [82] zamieszczono wyniki testów, w których kruszywo dolomitowe było zastępowane w różnym stopniu przez kruszone płytki ceramiczne (50% i 100% zastępowania). Wyniki wykazały pozytywny wpływ takiej zamiany na wytrzymałość resztkową, co można przypisać mniejszej zawartości CaO .



Rys. 20. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja czasu rehydracji dla różnych kruszyw i różnych temperatur maksymalnych $\theta=300^{\circ}\text{C}$ i 600°C wg Souza [59]

W przeciwieństwie do wniosków z wcześniej przedstawionych prac, autorzy artykułu [83] wskazują na istotną różnicę w przypadku użycia ciężkiego kruszywa. Beton zawierający kruszywo ilmenitowe wykazywał znacznie wyższą względną wytrzymałość resztkową, w porównaniu do betonów na standardowych kruszywach.

Badania opisane w [47] zostały przeprowadzone na betonie z kruszywem powstałym w wyniku recyklingu betonu. Różne wielkości ziarna kruszywa wykonanego z tego samego materiału zostały wykorzystane do stworzenia mieszanki betonowej. Testy, które nastąpiły po wygrzaniu i ochłodzeniu próbek, wskazują na brak zależności pomiędzy wielkością kruszywa, a względną wytrzymałością resztkową. W [84] przebadano wpływ trzech rodzajów kruszywa: otoczaki rzeczne, kruszony wapień i RCA (kruszywo powstałe z recyklingu betonu) na wytrzymałość resztkową. Wyniki badań wytrzymałości po nagraniu (do 250°C , 500°C , 700°C) i ochłodzeniu próbek wskazują na nieznacznie większą względną wytrzymałość resztkową próbek z wapieniem i RCA – różnicę tę można wyjaśnić podobieństwem, ponieważ zarówno kruszywo z wapienia, jak i RCA powstały w wyniku kruszenia. Autorzy podsumowali badania wskazując na brak wpływu samego kruszenia, a różnica polegała na składzie kruszywa. Praca [40] analizowała wpływ RCA jako zamiennika standardowego kruszywa, poprzez zastąpienia pewnej jego części (od 0 do 100%) na RCA. Po zapoznaniu się z wynikami można przedstawić wniosek, że dla temperatur maksymalnych od 200°C do 800°C nie istnieje widoczna różnica we względnej wytrzymałości resztkowej betonów o różnej zawartości RCA. Bardzo podobne badania i wnioski przedstawiono w [84–87], z uwagą o nieznacznej różnicy w wytrzymałości na korzyść betonu ze standardowym kruszywem. Niemal identyczne badania zostały również opisane w [88], gdzie RCA zastąpiło zarówno grubą jak i drobną frakcję

kruszywa. Ich wyniki są o tyle ciekawe, że wskazują na większą wytrzymałość resztkową betonu z RCA, co potwierdza dodatkowo praca [89].

W opozycji do tych wyników staje praca [90], która przy bardzo podobnym badaniu wskazuje wynik odwrotny: dla każdego 1% zastępstwa standardowego kruszywa przez RCA, względna wytrzymałość resztkowa spada o 0,2%. Przyczyną tak różnych wyników może być skład betonu poddanego recyklingowi, jak również sposób jego uzyskania. W [91] i [92] opisano pozytywny wpływ gruboziarnistego kruszywa powstałego z recyklingu materiałów ceramicznych (RCCA) na wytrzymałość resztkową betonu. Podobne badania przedstawiono w [93] i [94], testowany był wpływ kruszywa na bazie kruszonych cegieł i betonu poddanych w ten sposób recyklingowi. Utworzono dwie grupy mieszanek: mieszanek kontrolną i z udziałem 30% badanego kruszywa. Wyniki pokazały, że oba betony wystawione na działanie wysokiej temperatury zachowują bardzo podobną wytrzymałość resztkową. Kompleksowe badania nad wpływem kruszywa z recyklingu zaprezentowane zostały w [95], gdzie do badania użyto mieszanki z różną zawartością kruszywa z recyklingu (25% do 100%). Wyniki wskazują na istotny wpływ takiej zmiany i wskazują jej pozytywny wpływ na wytrzymałość resztkową – im większy stopień zastąpienia standardowego kruszywa – tym wyższa wytrzymałość resztkowa.

Możliwość użycia żużla stalowniczego jako potencjalnego zastępstwa dla kruszywa została sprawdzona w [96]. Próbkę została przygotowane w seriach różniących się jedynie zawartością żużla, który zastępował kruszywo w zakresie od 10% do 50%. Po wygrzaniu próbek do 800°C i ich ochłodzeniu, przeprowadzone zostały badania wytrzymałościowe. Przeanalizowanie wyników pozwoliło wyciągnąć jednoznaczny wniosek, że ilość użytego zamiennika kruszywa (żużla) nie wpływa na względną wytrzymałość resztkową betonu. Podobne badanie zostało opisane w [97] (różnicą była zawartość żużla od 25% do 100% i temperatury od 400°C do 1000°C) i w [98] (od 20% do 60% żużla). Wyniki badań prowadziły do takich samych wniosków – brak istotnego wpływu na wytrzymałość resztkową. W [99] autor zastosował trzy rodzaje kruszyw przy tworzeniu próbek: otoczaki rzeczne, kruszone cegły i szkło ekspandowane. Otrzymane wyniki wskazują na bardzo podobne zachowanie standardowych kruszyw, a jedynie użycie ekspandowanego szkła powoduje utratę wytrzymałości dużo szybciej niż w przypadku pozostałych dwóch typów kruszywa.

Analizą wpływu odpadów powęglowych jako zastępstwa kruszywa w betonie zajęto się w [100]. Wyniki są bardzo ciekawe, gdyż wskazują na pozytywny wpływ takiego kruszywa na wytrzymałość resztkową.

Podsumowując badania nad wpływem kruszywa można stwierdzić, że niemożliwe jest jednoznaczne określenie jaki wpływ na wytrzymałość resztkową betonu ma rodzaj kruszywa. Wiele prac dostarcza wyniki, które wskazują na istotność zagadnienia, lecz wnioski te nie są spójne i powtarzalne pośród autorów. Pozwala to zatem stwierdzić, że nawet jeżeli wpływ istnieje to nie jest on istotny. Dodatkowo, największe różnice występują w zakresie temperatury do 400°C, czyli w zakresie kiedy beton zachowuje bardzo dużą część ze swojej pierwotnej wytrzymałości. Dla temperatur powyżej 600°C konsensus wydaje się być jednoznaczny – brak istotnego wpływu kruszywa na wytrzymałość resztkową.

Wpływ kruszywa z recyklingu nie daje się również jednoznacznie zdefiniować mimo bardzo dużej liczby badań [101], co każe sądzić o znikomym znaczeniu dla wytrzymałości resztkowej. Podczas ekspozycji na wysoką temperaturę fundamentalną kwestią jest dehydratacja i późniejsza rehydratacja zaczynu cementowego. Zmiany następujące w kruszywie [102], poza oczywistymi uszkodzeniami wynikającymi z rozszerzania termicznego, wpływają na wytrzymałość resztkową w sposób minimalny. Przy szacowaniu tej wytrzymałości można, więc tę kwestię pominąć. Niemniej należy wspomnieć o fakcie, że typ kruszywa wpływa znacząco na kwestie odpryskiwania. Różnica odkształceń pomiędzy zaczynem cementowym, a kruszywem powoduje niestabilność termiczną [103] i jest zależna od typu kruszywa [104].

2.1.9.2 Rodzaj cementu i jego dawkowanie

Wytrzymałość betonu jest zależna, między innymi, od stosunku wodno-cementowego (w/c), więc naturalnym byłoby przypuszczenie, że ma on wpływ na wytrzymałość resztkową. W [44] przedstawiono badania próbek o trzech różnych dawkach cementu, zachowując przy tym taką samą wartość współczynnika w/c. Użyty cement zawierał dodatek pyłu lotnego, więc można go sklasyfikować jako CEM II/B-V. Próbki zostały wygrzane, ochłodzone i poddane rehydratacji w powietrzu przez 30 dni. Wyniki wskazują na brak wpływu ilości cementu, wszystkie próbki wykazywały bardzo podobną wytrzymałość resztkową. Badania nad wpływem w/c zostały opisane w [23]. Przygotowano dwa zestawy próbek, różniących się jedynie w/c, oba przy użyciu CEM I. Po 7 dniach rehydratacji w powietrzu wykonano testy wytrzymałościowe. Brak znaczących różnic we względnej wytrzymałości resztkowej pomiędzy próbkami, pomimo znaczącej różnicy w w/c (17%), każe sądzić, że w/c nie jest istotnym czynnikiem w przypadku względnej wytrzymałości resztkowej. W [48] przebadane zostały 3 betony o 3 różnych wartościach w/c: 0,35, 0,5, 0,55. Badania przeprowadzone po wygrzaniu próbek i ich ochłodzeniu wskazują na istotnie niższą względną czy bezwzględną wytrzymałość

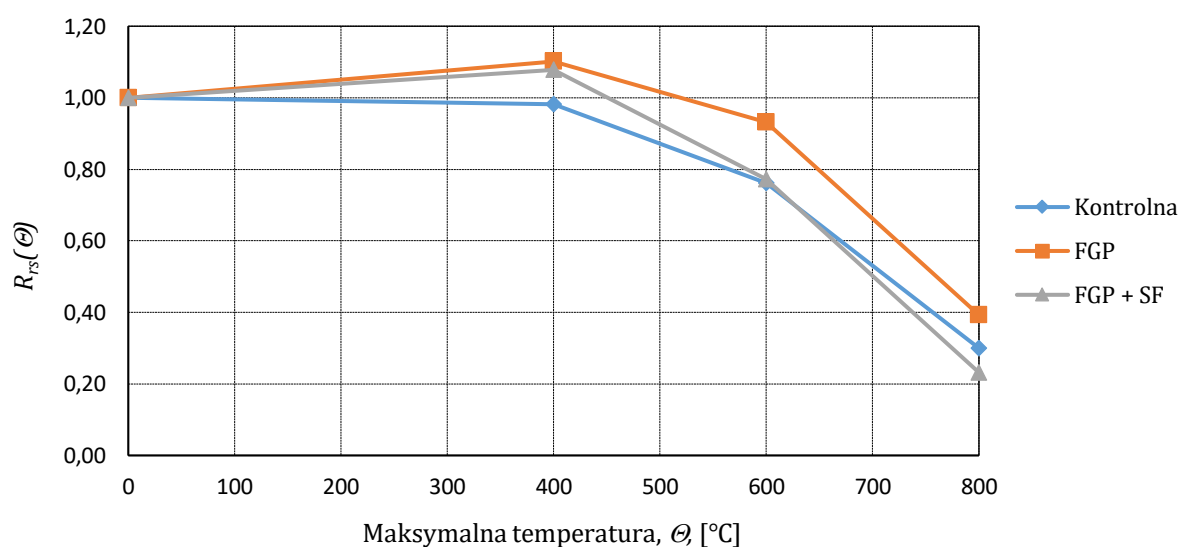
dla próbki o $w/c=0,35$, mimo to stopień odzyskiwania wytrzymałości przez rehydratację jest taki sam dla wszystkich przetestowanych w/c . Kolejną pracą poruszającą temat współczynnika w/c jest [40]. Przygotowano próbki o dwóch wartościach w/c : 0,58 i 0,68, które zostały wygrzane, ochłodzone i przebadane. Po przeanalizowaniu wyników zamieszczonych w tab. 16 okazuje się, że w/c nie ma istotnego znaczenia dla wytrzymałości resztkowej.

Tab. 16. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja maksymalnej temperatury i współczynnika w/c , na podstawie [40]

	$w/c = 0,58$	Maksymalna temperatura			
	Czas wygrzewania [h]	400°C	500°C	550°C	600°C
$Rrs_{0,58}(\Theta)$	0	0,93	0,73	0,63	0,33
	1	0,83	0,68	0,48	0,30
	2	0,70	0,65	0,43	0,20
	$w/c = 0,68$	Maksymalna temperatura			
	Czas wygrzewania [h]	400°C	500°C	550°C	600°C
$Rrs_{0,68}(\Theta)$	0	0,86	0,75	0,68	0,29
	1	0,82	0,68	0,50	0,18
	2	0,71	0,64	0,39	0,18
		Maksymalna temperatura			
	Czas wygrzewania [h]	400°C	500°C	550°C	600°C
$Rrs_{0,58}(\Theta) - Rrs_{0,68}(\Theta)$	0	0,07	-0,03	-0,05	0,04
	1	0,00	0,00	-0,03	0,12
	2	-0,01	0,01	0,03	0,02

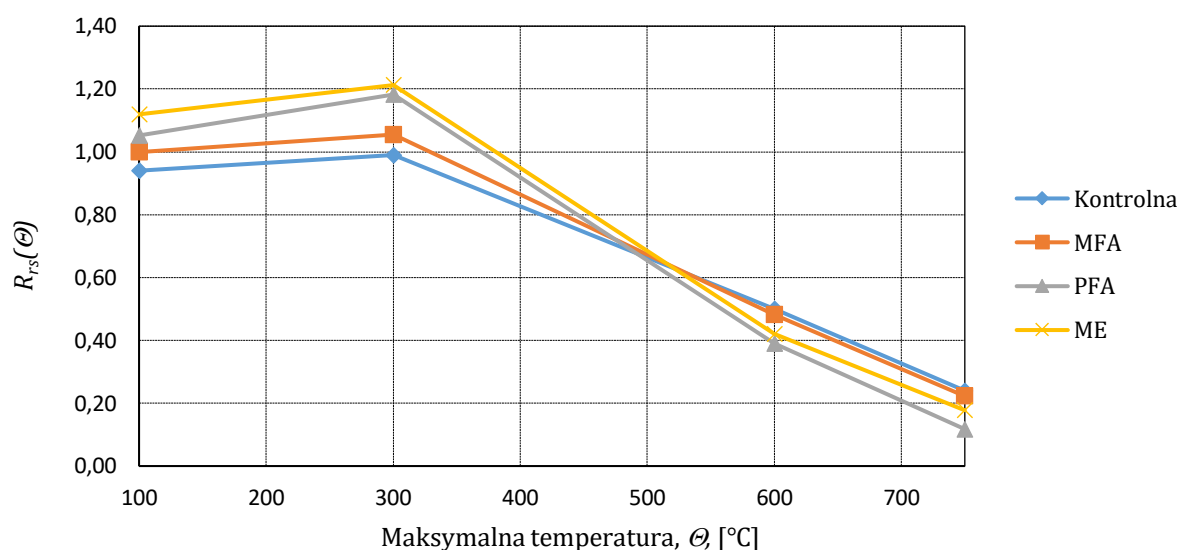
W [105] do badań przyjęte zostały 3 wartości współczynnika w/c : 0,22, 0,33, 0,57. Próbkę wygrzano do temperatur sięgających jedynie 450°C, a po ostudzeniu przeprowadzono testy wytrzymałościowe. Wyniki pokazują niższą utratę wytrzymałości przez próbkę o $w/c=0,22$ (około 20% wytrzymałości), dla próbek $w/c=0,33$ i 0,57 spadek ten był równy około 30%. Widać więc wyraźną różnicę w wytrzymałościach resztkowych. W [93] opisano badania 3 różne mieszanki betonowe o w/c równych: 0,6, 0,42 i 0,27. Utworzone z nich próbki poddano ekspozycji na wysoką temperaturę. Wnioski z badań wytrzymałości wskazują na niewielką przewagę niskiego w/c – uzyskuje się w ten sposób beton o wyższej względnej wytrzymałości resztkowej. Bardzo podobne badania pokazano w [80], użyto tam dwóch wartości w/c : 0,5 i 0,7. Testy wytrzymałości przeprowadzono po 28 dniach rehydratacji w powietrzu. Wnioski po analizie wyników wskazują na istotny efekt w/c dopiero w wyższych zakresach temperatur (powyżej 600°C) i tutaj również niższe w/c skutkowało wyższą wytrzymałością resztkową. Badania przedstawione w [106,107] zostały zaprojektowane w bardzo podobny sposób, z tym że próbki wygrzewano do 500°C, a czas wygrzewania wynosił 1h i 4h. W obu pracach postawiono bardzo podobne wnioski, próbki o niższym w/c mają większą względną wytrzymałość resztkową, szczególnie jeżeli użyte było kruszywo RCA.

Kolejne badania poruszają temat składu cementu. W [57] opisano badania właściwości betonu w składzie, którego zastępowano pewną część czystego cementu portlandzkiego dodatkami w postaci naturalnego pumeksu i pyłu z węgla brunatnego. Po serii testów wyciągnięty został wniosek, że dodatek pumeksu powodował obniżenie wytrzymałości resztkowej betonu, czego wyjaśnieniem może być większa zawartość uwodnionych glinianów wapnia, które rozkładają się przy 105°C powodując utratę właściwości mechanicznych. Dodatkowo próbki z dodatkiem pumeksu wolniej odzyskiwały wytrzymałość w trakcie rehydratacji. Badania opisane w pracy [46] sprawdzały wpływ pyłów lotnych jako częściowego zastępstwa cementu portlandzkiego w betonie na wytrzymałość resztkową. Zaproponowane zostały różne stopnie zastąpienia (od 10% do 40%). Wyniki wskazują na brak wpływu pyłów lotnych na względną wytrzymałość resztkową. W [108] podjęty został temat dodatku pyłu lotnego i metakaolinu jako częściowego zamiennika cementu. Rezultaty nie wskazywały istotnych różnic we względnej wytrzymałości resztkowej dla mieszanek. Kolejną pracą, w której skoncentrowano się na wpływie pyłu lotnego jako częściowego zamiennika cementu na wytrzymałość resztkową jest [109], po analizie poziomu istotności metodą Anova okazało się, że wpływ pyłu lotnego jest znikomy. W [110] opisano badanie betonu samozagęszczającego pod kątem wpływu pyłu lotnego na wytrzymałość resztkową. Dodatek ten okazał się nie mieć wpływu. Wpływ drobno zmielonego pumeksu (FGP) i pyłu krzemionkowego (SF) sprawdzano w [111]. Wyniki przedstawione na rys. 21 prezentują pozytywny wpływ FGP na względną wytrzymałość resztkową betonu. Mieszanka zawierająca zarówno FGP i SF wykazuje takie samo zachowanie jak mieszanka kontrolna. Bardzo podobne wnioski zostały postawione w pracy [112].



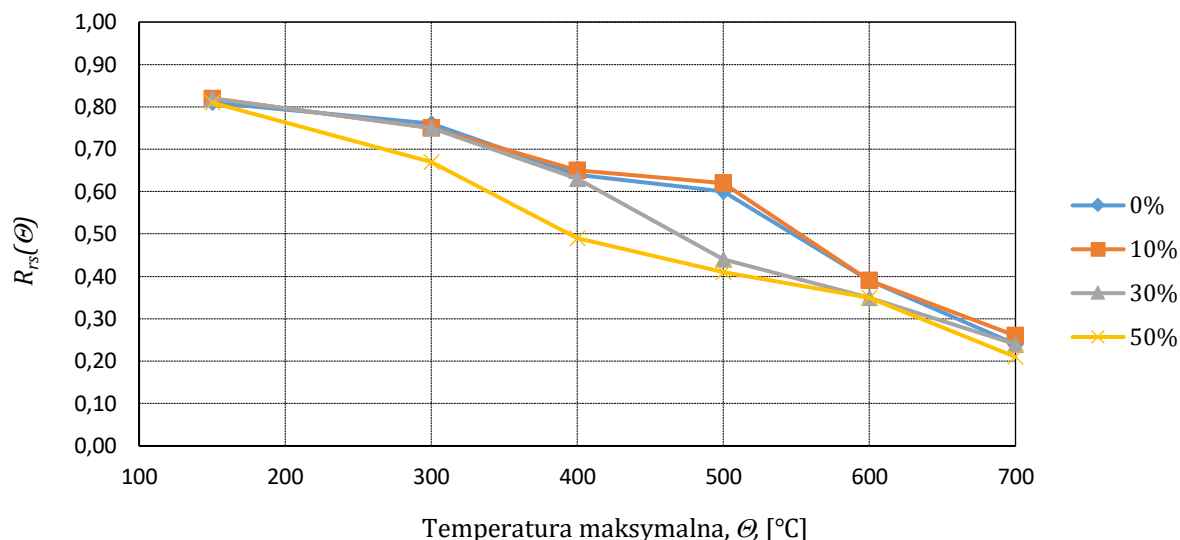
Rys. 21. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja maksymalnej temperatury dla różnych dodatków: FGP i SF wg Demirel [111]

W [79] opisano wpływ użycia pucelanów jako częściowego zamiennika cementu. Użyto trzech rodzajów pucelanów: ME (naturalne pucelany), PFA (pył lotny o wysokiej zawartości wapnia), MFA (pył lotny o niskiej zawartości wapnia). Cement był zastępowany w zakresie od 10% do 30%. Pierwszym wnioskiem było stwierdzenie, że stopień użytego pucelanu nie ma znaczenia dla względnej wytrzymałości resztkowej. Drugi wniosek dotyczył rodzaju materiału i tutaj pojawiła się pozytywna zależność: mieszanki z dodatkami miały większą wytrzymałość resztkową, ale występuje ona tylko do temperatury maksymalnej równej 300°C. Wyniki przedstawiono na wykresie zamieszczonym na rys. 22.



Rys. 22. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja maksymalnej temperatury dla różnych dodatków: MFA, PFA i ME wg Savva [79]

W pracy [113] analizowany jest wpływ kolejnego częściowego zamiennika cementu, tj. mielonego żużla wielkopiecowego (GGBFS). Zaproponowano trzy poziomy zastąpienia: 10%, 30% i 50%. Wyniki pokazuje wykres zamieszczony na rys. 23, a ich analiza wskazuje na niższe wytrzymałości resztkowe dla betonów z dodatkiem GGBFS. Im więcej dodatku było użyte, tym większy był spadek wytrzymałości.



Rys. 23. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja maksymalnej temperatury dla różnych poziomów zastąpienia cementu przez GGBFS: od 0% do 50% wg Li [113]

Podsumowując badania zajmujące się sprawą wpływu zawartości cementu i jego rodzaju na wytrzymałość resztkową betonu można stwierdzić, że współczynnik w/c w większości nie ma istotnego znaczenia na wytrzymałość resztkową betonu. Wyjątek stanowią tutaj poziomy bardzo odbiegające od standardów. Wtedy niższe w/c okazuje się mieć pozytywny wpływ na wytrzymałość resztkową. Analizując z kolei przedstawione wyniki badań nad wpływem zamienników cementu stwierdza się ponownie, że ich wpływ jest znikomy. Dopiero przy bardzo dużym stopniu użycia zamiennika, widoczna jest niewielka różnica względem próbek kontrolnych. Dodatkowo różnica ta zależy od rodzaju użytego materiału.

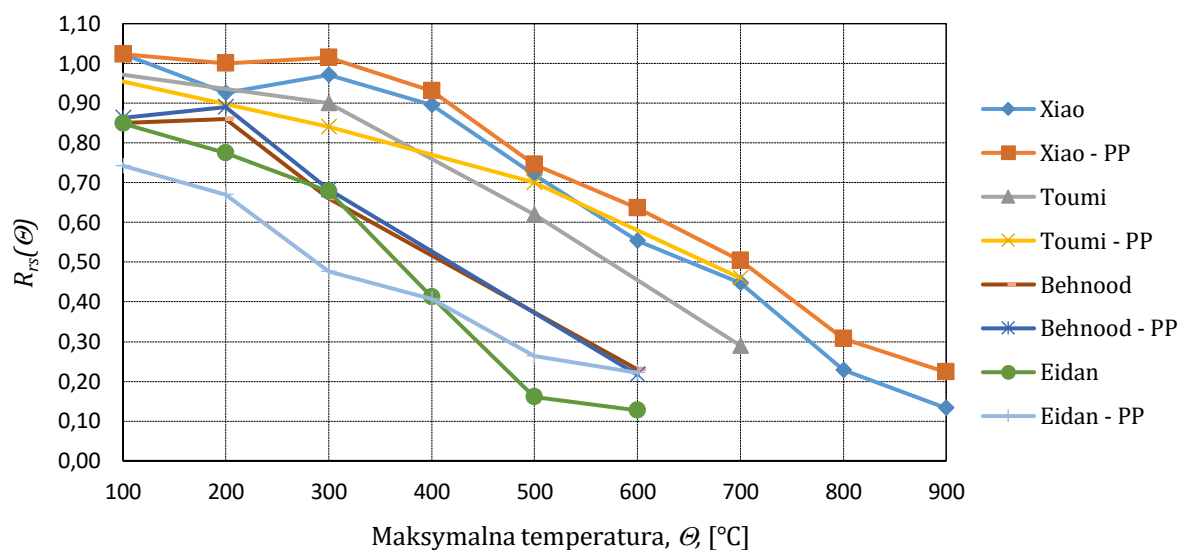
2.1.9.3 Dodatki i włókna

W produkcji betonu stosuje się wiele dodatków mających na celu polepszenie wybranych jego właściwości. Używane są zarówno dodatki w skali makro jak włókna polipropylenowe (PP) i włókna stalowe [114], jak i mikro dodatki jak proszki reaktywne [115] i pył powstający przy spalaniu oleju palmowego [54]. Szeroko zakrojone badania opisane w [116] na temat wpływu superplastyfikatora, przyspieszacza wiązania, opóźniacza wiązania i napowietrzacza wykazały, że wpływ tych dodatków na względną wytrzymałość resztkową jest minimalny. Podobne wnioski zostały osiągnięte w [117]. W przypadku makro dodatków, wyróżniającym się materiałem są włókna polipropylenowe. Włókna te topią się w wysokiej temperaturze (powyżej 160°C) tworząc kanaliki, które pomagają w uregulowaniu wewnętrznego ciśnienia wody, zapobiegając zniszczeniom betonu. Istnieje wiele prac potwierdzających ich pozytywny wpływ na wytrzymałość betonu w wysokiej temperaturze, lecz ich wpływ na wytrzymałość resztkową jest już

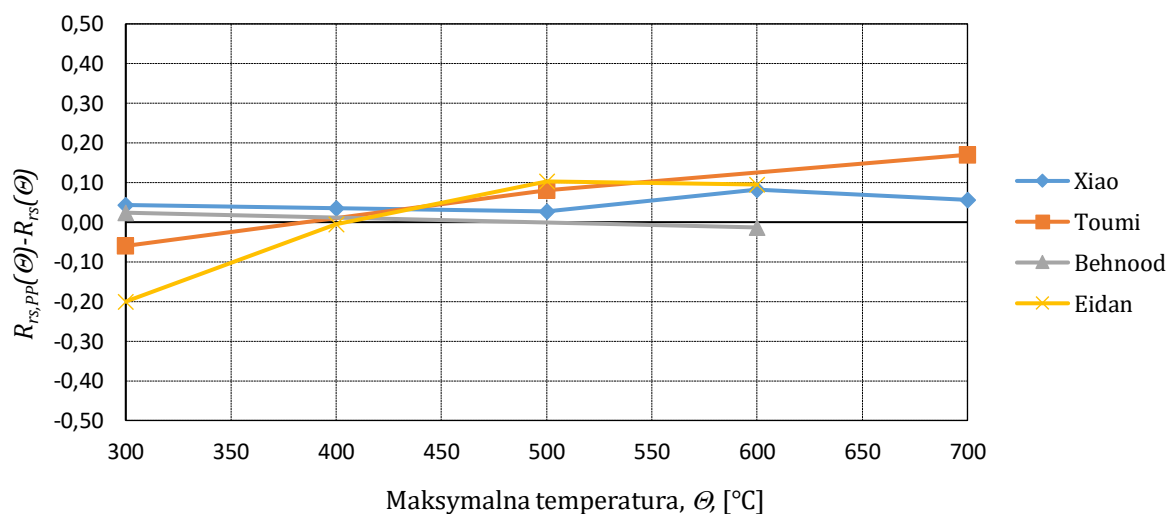
mniej oczywisty [118,119]. W pracach [22,28] opisano badania nad wpływem włókien PP na wytrzymałość resztkową. Testy wytrzymałościowe przeprowadzone zostały bezpośrednio po ochłodzeniu. W przypadku obu eksperymentów sformułowane zostały takie same wnioski – dodatek włókien polipropylenowe minimalnie zwiększa wytrzymałość resztkową. Wpływ ilości użytych włókien PP na wytrzymałość resztkową betonu wysokiej wytrzymałości został opisany w pracach [120,121]. Wyniki nie wykazują istotnej różnicy pomiędzy poszczególnymi dawkami. W [122] rozszerzono badania i przedstawiono zarówno wpływ włókien PP, jak i włókien stalowych. Wnioski tej pracy również wskazują na brak istotnego wpływu na względną wytrzymałość resztkową w przypadku obu typów włókien. Wyniki opisanych badań zostały zebrane na wykresie (rys. 24), a dodatkowo wykres (rys. 25) przedstawia różnicę pomiędzy próbkami z włóknami PP i bez nich.

Inną kwestią jest zdolność betonu z dodatkami włókien do rehydratacji. Struktura porów w betonach bez włókien PP potrafi, przy odpowiednich warunkach rehydratacji, powrócić do stanu sprzed ekspozycji na wysoką temperaturę. Pozostawione jednak przez polipropylen kanaliki są za duże, żeby się zasklepiły. Właściwość ta może mieć wpływ na możliwości odzyskiwania wytrzymałości przez beton. Praca [123] sugeruje, że utworzone przez topienie się PP mikro kanaliki mogą mieć korzystny wpływ na rehydratację, gdyż przyspieszają dyfuzję wody. W [124] przedstawiono kompleksowe badania zarówno dla włókien stalowych jak i polipropylenowych, użyto również betonów NSC i HSC. Wyniki pokazały niewielki wpływ włókien stalowych, nieznacznie zwiększając temperaturę, w której wierzchnia warstwa betonu zaczynała odpryskiwać. Dodatkowo zależność ta była zauważalna jedynie dla NSC. W przypadku włókien PP wszystkie próbki wykazywały większą odporność na odpryskiwanie, ale zauważono również zmniejszenie wytrzymałości resztkowej takich próbek, względem próbek kontrolnych (tj. bez dodatków). Badania nad wpływem włókien stalowych na wytrzymałość resztkową po ekspozycji na ekstremalnie wysokie temperatury (900-1200°C) zostały opisane w [125]. Wyniki nie wykazują istotnego wpływu tych włókien. W [126] zaprezentowano także wpływ włókien stalowych i PP. Analiza wyników wskazuje, że włókna stalowe nieznacznie zwiększają wytrzymałość resztkową, z kolei włókna PP nieznacznie ją zmniejszają. W [127] opisano badania nad wpływem włókien stalowych i szklanych na wytrzymałość resztkową. Wyniki wskazały wyraźnie większe wytrzymałości resztkowe dla próbek z oboma typami włókien (o 20-30%). Jest to wynik znacząco odbiegający od pozostałych prac, które są zgodne co do braku istotnego wpływu włókien. Praca [128] porusza jeszcze kwestie stabilności betonu i jego zachowania w wysokiej temperaturze w

przypadku dodatku włókien PP. Wnioski wskazują po raz kolejny na brak istotnego wpływu.



Rys. 24. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja maksymalnej temperatury dla próbek z i bez włókien PP, różni autorzy



Rys. 25. Różnica pomiędzy względną wytrzymałością resztkową betonu z i bez włókien PP jako funkcja maksymalnej temperatury, różni autorzy

2.2 SZACOWANIE WYTRZYMAŁOŚCI RESZTKOWEJ BETONU NA ŚCISKANIE Z UŻYCIEM UCZENIA MASZYNOWEGO

Wraz z rozwojem nowych technologii i coraz większym wykorzystaniem uczenia maszynowego przy rozwiązywaniu problemów technicznych zasadne jest przyjrzenie się sposobom szacowania wytrzymałości przy ich użyciu. W ostatnich latach wielu autorów próbowało używać tych relatywnie nowych narzędzi przy szacowaniu wytrzymałości resztkowej betonu. W artykule [129] podjęto próbę oszacowania i zoptymalizowania

wytrzymałości resztkowej betonu powstałego z kruszywa z recyklingu. Danymi wejściowymi były w/c, zawartości kruszywa z recyklingu i zawartości żużla wielkopiecowego. Przy pomocy programowania ekspresji genów (GEP) stworzono algorytm do szacowania wytrzymałości resztkowej. W pracy [130] do szacowania użyta została metoda analizy powierzchni odpowiedzi (RSM), a dane zostały zebrane z dużego zbioru wyników prac doświadczalnych innych autorów. Jako zmienne wejściowe przyjęte zostały temperatura maksymalna i czas wygrzewania. Bardzo podobny schemat został zastosowany i opisany w [131], a polegał on na szacowaniu wytrzymałości resztkowej na bazie wyników prac eksperymentalnych przy użyciu modelu drzewa decyzyjnego M5P. Z kolei w [132] zastosowane zostało aż pięć różnych modeli uczenia maszynowego: losowy las decyzyjny, wzmacnianie adaptacyjne i wzmacnianie gradientowe w trzech odsłonach. Najlepszą okazała się metoda ekstremalnego wzmacniania gradientowego. W pracy [133] podobnie jak we wcześniej wymienionych publikacjach, model używający sieci neuronowej został wytrenowany na zbiorze danych pochodzących z przeglądu literatury dotyczącego wytrzymałości resztkowej, a szczególnie wpływu zawartości włókien (stalowych i polipropylenowych). Kolejna próba wykorzystania sieci neuronowej do szacowania została opisana w [134]. Autorzy przygotowali ogromny (jak na dostępną liczbę badań) zestaw danych wejściowych (ponad 1000 wyników) i na tej podstawie opracowali modele szacujące wytrzymałość resztkową bazujące na różnych czynnikach.

Opisane powyżej próby użycia uczenia maszynowego pokazują, że jest to metoda mająca duży potencjał. Uzyskane wyniki, szczególnie w pracy [134], wykazują bardzo dobrą dokładność dzięki dużej liczbie danych wejściowych. Problemem, który da się zauważyć w dotychczasowych próbach jest podejście do danych. Wszystkie one są dostarczane algorytmowi jako równie istotne – w nadziei, że to algorytm tworząc funkcję szacowania sam dostosuje ich istotność. Takie podejście ma sens, sieci neuronowe są wyjątkowo sprawnym narzędziem do tego typu klasyfikacji. Jednakże duża liczba danych wejściowych powoduje dodatkowe i niepotrzebne komplikacje, a także utrudnia otrzymanie optymalnego rozwiązania.

2.3 PODSUMOWANIE

Wiele badań zostało poświęconych zagadnieniu wytrzymałości resztkowej betonu po ekspozycji na wysoką temperaturę. Badania te pozwoliły zidentyfikować główne czynniki wpływające na jej wartość, jak również czynniki, które pomimo początkowych przypuszczeń nie wpływają na nią w sposób istotny. W tab. 17 zebrane i podsumowane zostały czynniki, które zostały przeanalizowane w przedstawionym przeglądzie literatury i podzielone na istotne i nieistotne między innymi na podstawie współczynników korelacji.

Tab. 17. Zbiorcze podsumowanie czynników i ich istotności w szacowaniu wytrzymałości resztkowej betonu po ekspozycji na wysoką temperaturę

Czynnik	Współczynnik korelacji*	Komentarz	Istotność
Maksymalna temperatura	- 0,91	Maksymalna temperatura jest czynnikiem bardzo istotnym, lecz bazując tylko na niej, nie da się dokładnie oszacować wytrzymałości resztkowej.	ISTOTNY
Czas wygrzewania	- 0,86	Czas wygrzewania jest czynnikiem istotnym, gdyż przedłużająca się ekspozycja powoduje dodatkowe zniszczenia w strukturze betonu.	ISTOTNY
Tempo nagrzewania	0,20	Tempo nagrzewania nie jest istotnym czynnikiem.	NIEISTOTNY
Tempo i rodzaj ochładzania	ND**	Tempo ochładzania nie jest istotnym czynnikiem. Rodzaj ochładzania ma wpływ na wytrzymałość resztkową bezpośrednio po ochłodzeniu, ale po odpowiednim czasie rehydratacji ten wpływ zanika.	NIEISTOTNY
Rehydratacja	0,69	Niezależnie od rodzaju, rehydratacja jest bardzo istotna przy szacowaniu wytrzymałości resztkowej.	ISTOTNY
Wiek betonu w czasie ekspozycji	ND**	Jedynie bardzo młody beton wykazuje większą retencję wytrzymałości. Ze względów na zastosowanie praktyczne czynnik ten nie zostanie uwzględnionych.	NIEISTOTNY
Obciążenie w czasie ekspozycji	ND**	Obciążenie w czasie ekspozycji ogranicza uszkodzenia w betonie i przyczynia się do większej wytrzymałości resztkowej.	ISTOTNY
Porowatość betonu	- 0,68	Wysoki współczynniki korelacji dla porowatości i wytrzymałości resztkowej bezpośrednio po ochłodzeniu, sugerują istotność tego czynnika. Rehydratacja niweluje jednak ten wpływ, prawie całkowicie przywracając strukturę porów do tej sprzed pożaru. Sprawiając, że wartość początkowa przestaje być istotna.	NIEISTOTNY
Skład betonu	ND**	Zarówno rodzaj kruszywa, typ/dawkowanie cementu i dodatki okazały się nie mieć istotnego i jednoznacznego do zdefiniowania wpływu na względną wytrzymałość resztkową betonu.	NIEISTOTNY

* Średnia współczynników korelacji (Pearsona, Spearmana i Kendala) pomiędzy czynnikiem a wytrzymałością resztkową

** Niewystarczająca liczba danych do obliczenia współczynników

Kwestia maksymalnej temperatury ekspozycji jest dobrze rozpoznana - jest to najistotniejszy czynnik wpływający zarówno na wytrzymałość w wysokiej temperaturze, jak i wytrzymałość resztkową. Wspomniane w 2.1.1 obszary temperatur są dobrym punktem wyjścia dla funkcji aproksymacji względnej wytrzymałości resztkowej betonu. Jednak zauważona rozpiętość wyników jest podstawą do stwierdzenia, że nie da się takiej funkcji oprzeć jedynie na temperaturze maksymalnej – muszą istnieć inne istotne wpływy. Czynniki te muszą zostać wzięte pod uwagę przy formułowaniu funkcji. Aproksymacja wytrzymałości resztkowej jedynie przy pomocy temperatury maksymalnej przedstawiona w [135], zdaniem autora niniejszej dysertacji nie jest wystarczająco dokładną metodą.

Czas wygrzewania jest kolejnym istotnym i dobrze przebadanym czynnikiem, a jego korelacja z wytrzymałością resztkową jest bardzo duża. Nie ma on aż tak istotnego wpływu jak maksymalna temperatura, ale w czasie przedłużającej się ekspozycji wytrzymałość spada. Czynniki te zostaną wzięte pod uwagę przy formułowaniu funkcji aproksymacji.

Tempo nagrzewania nie ma istotnego wpływu na wytrzymałość resztkową. Badania zestawiające ze sobą różne tempa, nie wykazują znacznych różnic w wynikach. Czynniki te nie będą brane pod uwagę w funkcji aproksymacji.

Tempo i rodzaj ochładzania wpływają na wytrzymałość resztkową bezpośrednio po ochłodzeniu, lecz wpływ ten zanika wraz z upływającym czasem rehydratacji. Dodatkowo gwałtowne chłodzenie, nawet wodą, w przypadku całego elementu zachodzi jedynie na zewnętrznej jego części. Wnętrze elementu, ochładza się w sposób powolny, oddając ciepło na zewnątrz. Mając również na uwadze, że zewnętrzna część elementu w większości przypadków jest bardzo uszkodzona (wchodzi w Obszar III wg 2.1.1), różnice wynikające z tempa i rodzaju ochładzania nie są kluczowe. Czynniki te nie będą brane pod uwagę w funkcji aproksymacji.

Rehydratacja jest zjawiskiem potwierdzonym i istotnym dla wytrzymałości betonu po ekspozycji na wysoką temperaturę. Pozytywny efekt jest niezaprzeczalny, lecz jego wielkość nie jest łatwa do określenia. Pomimo dużej liczby badań brakuje zestawienia ich wyników i próby opisu tej zależności w sposób matematyczny. Zauważyć można jednak, że poziom zniszczeń w betonie i warunki rehydratacji wpływają na stopień w jakim wytrzymałość jest odzyskiwana. Niewątpliwie jednak rehydratacja, a konkretnie jej długość i rodzaj jest czynnikiem istotnym i potwierdzają to współczynniki korelacji (tab. 11). Czynniki te powinny zostać uwzględnione w finalnej funkcji aproksymacji.

Wiek betonu w czasie ekspozycji ma istotny wpływ na wytrzymałość resztkową betonu jedynie w przypadku bardzo młodych betonów. Po czasie w którym beton osiąga projektowaną wytrzymałość, wpływ jego wieku jest pomijalny. Biorąc pod uwagę aspekt praktyczny, czas dojrzewania jest bardzo krótki, w porównaniu do całego cyklu „życia” elementu. Czynniki te nie będą uwzględnione w funkcji aproksymacji.

Obciążenie w czasie ekspozycji jest bardzo słabo przebadaną kwestią, ale dotychczasowe wyniki wykazują jego kluczowe znaczenie dla wytrzymałości resztkowej betonu. Obciążenia ściskające, którym podlegają elementy betonowe ograniczają rozszerzanie spowodowane podwyższoną temperaturą, a zatem ograniczają uszkodzenia struktury betonu. To sprawia, że elementy obciążone w ten sposób wykazywały znacznie większą wytrzymałość resztkową w porównaniu do próbek nieobciążonych. Mała dostępność wyników badań spowodowana jest trudnościami w stworzeniu odpowiedniego stanowiska badawczego. Jednak czynnik ten powinien zostać uwzględniony w finalnej funkcji aproksymacji.

Porowatość betonu ulega bardzo dużemu zwiększeniu podczas ekspozycji na wysoką temperaturę. Powstające nowe przestrzenie niejako ilustrują zniszczenia pojawiające się w betonie. Ciekawym jest jednak zjawisko przywrócenia porowatości do wcześniejszych poziomów po stosunkowo niedługim czasie rehydratacji (około 2 miesiące). Odbudowa ta ma jednak swoje ograniczenia, gdyż powyżej 800°C zmiany zaczynają być nieodwracalne. Pomimo faktu silnej korelacji pomiędzy porowatością, a wytrzymałością resztkową bezpośrednio po ekspozycji czynnik ten nie zostanie uwzględniony w funkcji opisującej wytrzymałość resztkową betonu, ponieważ nie ma charakteru trwałego.

Skład betonu i jego wpływ na wytrzymałość resztkową jest zagadnieniem wyczerpująco przebadanym. Dodatkowo zdecydowana większość autorów zgadza się, że skład betonu i zmiany w ilości poszczególnych składników nie wpływają istotnie na względną wytrzymałość resztkową. Spadek wytrzymałości betonu po ekspozycji na wysoką temperaturę i jego późniejsza rehydratacja, jest zjawiskiem spowodowanym zmianami w betonie na poziomie fundamentalnym. Tak więc zmiana składu, która nie powoduje jednak fundamentalnych zmian w strukturze i zachowaniu betonu, nie wpływa istotnie na względną wytrzymałość resztkową betonu. W związku z tym skład betonu nie zostanie uwzględniony w funkcji aproksymującej tę wytrzymałość.

3 CELE I ZAKRES ROZPRAWY

3.1 CELE NAUKOWE

Na podstawie krytycznej analizy obecnego stanu wiedzy w zakresie wytrzymałości resztkowej betonu na ściskanie w rozprawie sformułowano następujące cele naukowe:

1. Wyodrębnienie w oparciu o metody statystyczne najistotniejszych czynników wpływających na wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie bazując na danych pochodzących z istniejących badań.
2. Sformułowanie, parametryzacja i kalibracja współczynnika zakumulowanego ciepła jako metody określania stopnia uszkodzenia betonu łączącej wpływ maksymalnej temperatury ekspozycji i czasu wygrzewania.
3. Sformułowanie i kalibracja funkcji aproksymującej względną wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie na podstawie współczynnika zakumulowanego ciepła.
4. Sformułowanie i kalibracja modelu sieci neuronowej aproksymującej względną wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie na podstawie danych uzyskanych z badań własnych i badań innych autorów.
5. Weryfikacja przydatności metody analitycznej wyznaczania wytrzymałości betonu w wysokiej temperaturze do szacowania wytrzymałości resztkowej betonu na podstawie wyników uzyskanych z własnej funkcji aproksymującej.

Cele te zostaną zrealizowane dzięki danym pozyskanym z dwuetapowych badań własnych, badań innych autorów oraz analizom ich wyników, których przebieg opisany zostanie w kolejnych rozdziałach.

3.2 ZAKRES ROZPRAWY

Rozprawę podzielono na następujące zasadnicze części:

- A. KRYTYCZNA ANALIZA STANU WIEDZY
- B. PRZEDSTAWIENIE CELÓW NAUKOWYCH
- C. PRZEPROWADZENIE WŁASNYCH DWUETAPOWYCH BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH WYKORZYSTANYCH DO PARAMETRYZACJI MODELI OBLICZENIOWYCH
- D. SFORMUŁOWANIE, PARAMETRYZACJA I KALIBRACJA WŁASNEJ MODYFIKACJI WSPÓŁCZYNNIKA ZAKUMULOWANEGO CIEPŁA ORAZ FUNKCJI APROKSYMUJĄCEJ WZGLĘDNĄ WYTRZYMAŁOŚĆ RESZTKOWĄ BETONU NA ŚCISKANIE NA PODSTAWIE WSPÓŁCZYNNIKA ZAKUMULOWANEGO CIEPŁA
- E. ANALIZA WYNIKÓW WŁASNYCH BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH
- F. SYMULACJE WYTRZYMAŁOŚCI RESZTKOWEJ BETONU PRZY UŻYCIU SIECI NEURONOWYCH
- G. WNIOSKI KOŃCOWE I PROPOZYCJE KIERUNKÓW DALSZYCH BADAŃ

4 CZĘŚĆ BADAWCZA

4.1 WPROWADZENIE

Badania własne przeprowadzone na potrzeby niniejszej dysertacji były niezbędne do uzyskania zbioru danych o takich samych parametrach eksperymentu. Tylko dzięki takiemu zbiorowi, gdzie warunki dla każdej próbki są powtarzalne i ściśle kontrolowane, możliwa będzie poprawna kalibracja funkcji aproksymujących.

Podstawowym i najczęściej stosowanym sposobem wyznaczenia wytrzymałości betonu na ściskanie jest przeprowadzenie badań wg [136]. Popularność i powszechność tej metody, również w badaniach naukowych – sprawia, że porównanie wyników jest łatwiejsze i bardziej rzetelne. W związku z tym wszelkie badania zostaną przeprowadzone na próbkach sześciennych 150x150x150mm, które są najczęściej spotykane w laboratoriach na całym świecie.

Sporą trudnością w badaniach wpływu wysokiej temperatury jest stworzenie stanowiska, które umożliwi dokładną, mierzalną i powtarzalną ekspozycję na wysoką temperaturę. Z tego powodu wykluczone jest użycie żywego ognia, bądź podobnych środków. Jedyną metodą gwarantującą bezpieczne zastosowanie, które umożliwi przeprowadzenie badań jest użycie pieca o wysokim zakresie temperatur. Piec taki musi mieć możliwość kontroli nad tempem nagrzewania. Rekomendacje wydane przez [137] sugerują zastosowanie powolnego przyrostu temperatury wewnątrz pieca, pozwalając w ten sposób zminimalizować gradient temperatury wewnątrz próbki. We wszystkich badaniach tempo nagrzewania zostało przyjęte na poziomie 1°C/min. Dzięki temu można założyć, że temperatura próbki była niemal jednakowa w całej jej objętości i zbliżona do temperatury panującej w piecu.

Szczególny nacisk zostanie położony na czynniki istotne wykazane w przeglądzie literatury. Opierając się również na wniosku o braku istotności składu betonu na względną wytrzymałość resztkową, badania właściwe zostaną przeprowadzone na jednym typie mieszanki betonowej o szeroko stosowanej klasie wytrzymałości (C30/37), maksymalizując w ten sposób możliwość dokładnego zbadania wpływu istotnych czynników.

4.2 STANOWISKO BADAWCZE

Do przeprowadzenia badania przygotowano stanowisko badawcze, którego podstawowym elementem był piec Naber N50 (rys. 26, rys. 27, rys. 28), o zakresie temperatury do 1200°C. Nie posiada on programatora tempa nagrzewania – tempo było

ustawiane ręcznie poprzez zmianę mocy grzewczej. Do zapewnienia dokładnego pomiaru temperatury wewnątrz pieca użyty został termometr Center CE309 (rys. 29) wraz z odpowiednią termoparą. Termopara umieszczona była w przestrzeni pomiędzy próbką, a górą komory grzewczej. Zapewniały one dokładny pomiar w czasie rzeczywistym umożliwiając kontrolę nad tempem nagrzewania i odpowiednim poziomem temperatury w czasie fazy wygrzewania. Wielkość komory pieca pozwalała na wygrzewanie do dwóch próbek w jednym cyklu działania. Próbki zostały ustawione na odpowiednich dystansach, zapewniając cyrkulację powietrza (rys. 30, rys. 31), a za czym idzie jednakową ekspozycję na temperaturę na wszystkich powierzchniach zewnętrznych.



Rys. 26. Piec Naber 50



Rys. 27. Naber 50 – panel kontrolny



Rys. 28. Naber 50 – tabliczka znamionowa



Rys. 29. Termometr Center CE309



Rys. 30. Próbką w piecu



Rys. 31. Próbką i dystanse w piecu

4.3 METODA BADAŃ WSTĘPNYCH

Badania wstępne miały na celu przetestowanie stanowiska badawczego, jak również określenie podstawowych parametrów niezbędnych do planowania badań zasadniczych. Ich celem pobocznym była również własna weryfikacja tezy o braku istotnego wpływu składu betonu na względną wytrzymałość resztkową. Liczba próbek wytypowanych do badań wstępnych wynosiła 11 sztuk o 4 rodzajach mieszanki. Mieszanki użyte w badaniach wstępnych wraz z liczbami próbek zostały przedstawione w tab. 18. Wszystkie próbki (rys. 32) zostały przygotowane w laboratorium wg [136].

Tab. 18. Zestawienie podstawowych informacji o mieszankach betonowych użytych w badaniach wstępnych

Mieszanka	Projektowana klasa	Cement	Kruszywo grube	Dodatek	Liczba próbek
A	C30/37	CEM I	Żwir rzeczny	Popiół lotny	2
B	C30/37	CEM III	Żwir rzeczny	Popiół lotny	3
C	C25/30	CEM III	Żwir rzeczny	Popiół lotny	3
D	C30/37	CEM II	Żwir rzeczny	Popiół lotny	3

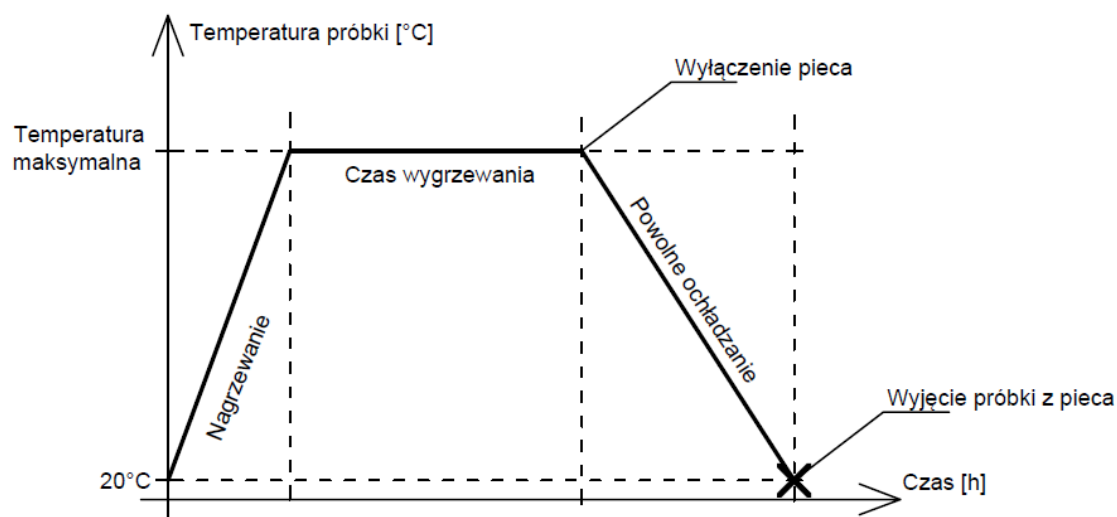


Rys. 32 Zestaw próbek wytypowanych do badań wstępnych

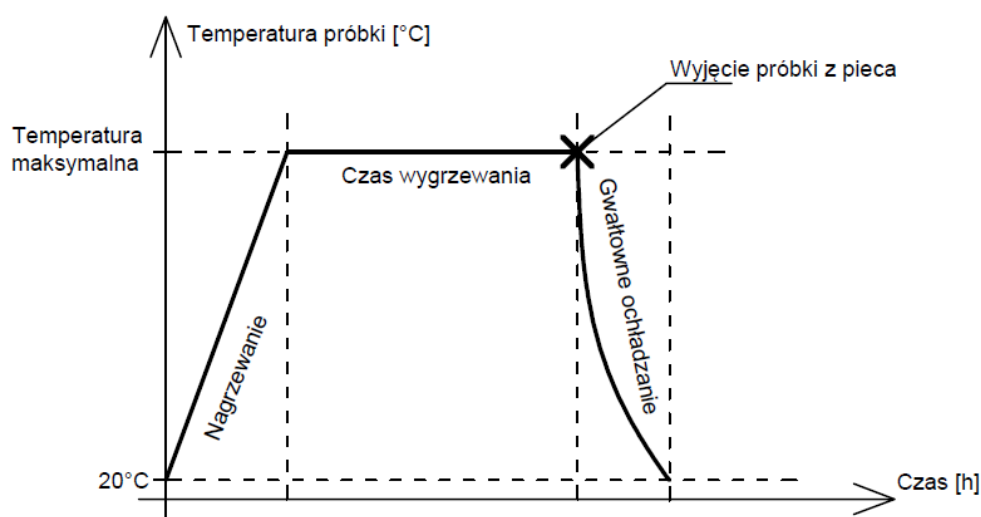
Do badań wstępnych przyjęto następujący reżim temperaturowy:

- Tempo nagrzewania - **1°C/min** – zgodnie z wnioskami rozdziału 4.1
- Temperatura maksymalna - **600°C** - najistotniejszym czynnikiem (wg rozdziału 2.1.1) wpływającym na wytrzymałość resztkową jest przedział temperatury wygrzewania od 300°C do 800°C (Obszar II). Przy doborze uwzględniony został również fakt występowania podobnego reżimu w innych pracach badawczych – dzięki czemu poprzez porównanie wyników można stwierdzić poprawność działania stanowiska badawczego.
- Chłodzenie – próbki powracały do temperatury pomieszczenia w zamkniętym piecu – wolniejsze i stabilniejsze ochładzanie próbek (rys. 33) zminimalizuje ryzyko dodatkowych uszkodzeń mechanicznych spowodowanych nagłym ochłodzeniem (rys. 34).

Przyjęta metoda bliżej oddaje sytuację zachodzącą wewnątrz elementów konstrukcji – następuje stopniowa zmiana temperatury, zarówno jej wzrost jak i spadek. Uznano, że ze względów praktycznych takie badania mają największą wartość poznawczą.



Rys. 33. Temperatura próbki jako funkcja czasu – chłodzenie w zamkniętym piecu



Rys. 34. Temperatura próbki jako funkcja czasu – chłodzenie w powietrzu o temperaturze pokojowej

Po etapie nagrzewania i chłodzenia próbki zostały poddane rehydratacji w powietrzu. Długość rehydratacji została ustalona na 28 dni. Jest to czas stosowany przez wielu innych badaczy, umożliwiający porównanie wyników własnego badania z innymi pracami. Następnie próbki niszczone w prasie, aby określić wytrzymałości na ściskanie. Badania niszczące próbek (rys. 35) zostały wykonane przy użyciu maszyny wytrzymałościowej infraTest ALPHA 2-3000 (rys. 37). Przed badaniami sprawdzono odchyłki wymiarów próbek – nie przekraczały one 1mm na 150mm (rys. 36). Do badań zastosowano wytyczne zgodne z [138] - przyjęto stałą prędkość obciążania równą 0,6 MPa/s, a próbki ustawiane były prostopadle do kierunku formowania. Schemat blokowy badań wstępnych został przedstawiony na rys. 38.



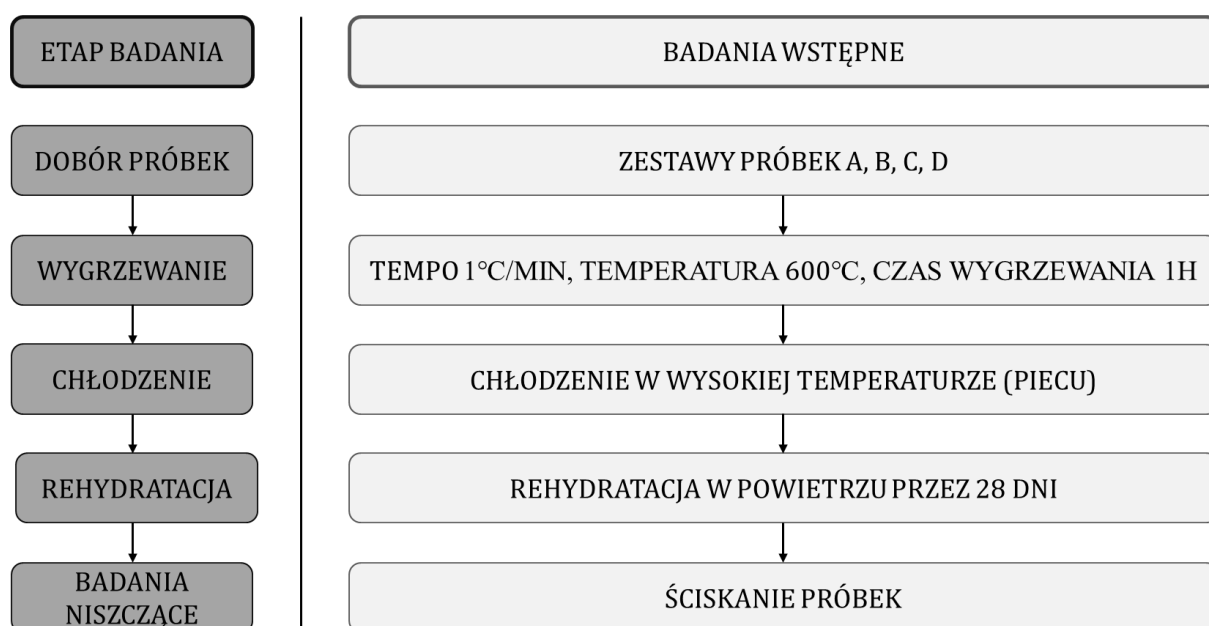
Rys. 35. Próbki po wygrzaniu



Rys. 36. Sprawdzenie wymiarów próbki za pomocą suwmiarki elektronicznej firmy VOREL



Rys. 37. Maszyna wytrzymałościowa infraTest ALPHA 2-3000 użyta w badaniach



Rys. 38. Plan badań wstępnych

4.4 WYNIKI BADAŃ WSTĘPNYCH

Typ zniszczenia dla wszystkich próbek był prawidłowy – wszystkie cztery powierzchnie były spękane niemal równomiernie, a uszkodzenia powierzchni stykających się z płytami dociskowymi były nieznaczne (rys. 39, rys. 40). Zgodnie z punktem 8 normy [138] wytrzymałość na ściskanie podano z dokładnością do 0,1 MPa.



Rys. 39. Typ zniszczenia – próbka 1A



Rys. 40. Typ zniszczenia – próbka 1D

Wytrzymałość na ściskanie została obliczona zgodnie z [138], pole zostało obliczone na podstawie deklarowanego wymiaru próbki. Wyniki badań zostały przedstawione w tab. 19. f_{c20} oznaczana wytrzymałość próbki niepoddanej ekspozycji (próbki kontrolnej), f_{rc600} wytrzymałość resztkową próbki poddanej ekspozycji zgodnie z warunkami opisanymi w rozdziale 4.3, a f_{rc600}/f_{c20} jest względną wytrzymałością resztkową betonu – obrazującą jaką część wytrzymałości betonu utracił w czasie ekspozycji i chłodzenia.

Wyniki otrzymane w badaniach potwierdzają tezę o braku znaczenia składu betonu, na jego względną wytrzymałość resztkową. Wszystkie zestawy próbek wykazały bardzo podobną wytrzymałość, współczynnik zmienności wyniósł mniej niż 5%. Wykonane zostało również porównanie wyników eksperymentu z danymi dostępnymi w literaturze (tab. 20). Wybrane zostały badania innych autorów z podobnymi warunkami ekspozycji – temperatura maksymalna na poziomie 600°C, czas wygrzewania od 1 do 3 godzin i czas rehydratacji około 28 dni. Zestawiając wyniki przeprowadzonego eksperymentu z literaturą, widoczne jest podobieństwo otrzymanych wyników - uśrednione względne wytrzymałości resztkowe nie różnią się od siebie o więcej niż 10%. Obserwacja ta potwierdza poprawność działania stanowiska badawczego i metody badania, spełniając tym główny cel badań wstępnych.

Tab. 19. Wyniki badań wstępnych - wytrzymałości na ściskanie próbek betonu, badania zgodnie z [138]

Zestaw próbek	Próbka	Siła niszcząca [kN]	f_{c20} [MPa]	f_{rc600} [MPa]	f_{rc600}/f_{c20}
A - [C30/37, CEM I, Ż + popioły]	1	575,7	x	25,6	0,442
	2	1302,80	57,9	x	-
B - [C30/37, CEM III, Ż + popioły]	1	555,0	x	24,7	0,447
	2	1242,00	55,2	x	-
C - [C25/30, CEM III, Ż + popioły]	1	1241,00	55,2	x	-
	2	584,7	x	26,0	0,471
	3	542,7	x	24,1	0,437
D - [C30/37, CEM II, Ż + popioły]	1	671,2	x	29,8	0,485
	2	684,9	x	30,4	0,495
	3	1383,00	61,5	x	-
Średnia					0,463
Odchylenie standardowe					0,022
Współczynnik zmienności					4,8%

Tab. 20. Porównanie wyników badań w zakresie względnej wytrzymałości dla temperatury maksymalnej $\theta=600^{\circ}\text{C}$ i różnych czasów wygrzewania, różni autorzy

Autor	Temp. maksymalna [$^{\circ}\text{C}$]	Czas [h]	Względna wytrzymałość ($f_{\text{rc}600}/f_{\text{c}20}$)
Yang [23]	600	1	0,24
Netinger [25]	600	1,5	0,52
Hager [26]	600	3	0,38
Xiao [31]	600	2	0,55
Chan [29]	600	1	0,43
Krzemień [27]	600	3	0,38
Średnia			0,42

4.5 METODA BADAŃ ZASADNICZYCH

Najistotniejszym elementem części badawczej są bez wątpienia badania właściwe – integralna część pracy nad wytrzymałością resztkową betonu. Aby zagwarantować adekwatność wyników z naukowego punktu widzenia, badania te muszą być powtarzalne i dające się odtworzyć. Osiągnięte zostanie to poprzez wykorzystanie stanowiska badawczego opisanego w rozdziale 4.2, które charakteryzowało się dokładnością w realizacji założonego scenariusza badań i umożliwiało uzyskanie powtarzalnych wyników. Jak podano w pkt. 4.1 celem badań zasadniczych było zbadanie wpływu czynników wskazanych jako istotnych na wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie.

4.5.1 Próbki użyte w badaniach

Zgodnie z wnioskami rozdziału 2.1.9 i z własnych badań wstępnych skład betonu nie ma istotnego wpływu na względną wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie. W związku z powyższym, w badaniach właściwych zostanie użyta tylko jedna mieszanka. W ten sposób wyniki będą wolne od dodatkowych rozważań na temat składu betonu. Wszystkie próbki pochodziły z jednej partii mieszanki betonowej, pochodzącej z profesjonalnego, przemysłowego węzła betoniarskiego. Podstawowe parametry mieszanki zostały przedstawione w tab. 21, a projektowany skład został przedstawiony w tab. 22. Próbki sześciennie o wymiarach 150x150x150mm zostały wykonane zgodnie z [139]. Przez pierwsze 28 dni dojrzewały w warunkach normowych po czym przez około 150 dni dojrzewały w powietrzu o temperaturze około 20 $^{\circ}\text{C}$ i wilgotności 50%. Tak długi czas dojrzewania miał zniwelować różnice w początkowej wytrzymałości betonu próbek poddawanych wygrzewaniu. Ze względu na ograniczenia stanowiska badawczego, w

ciągu jednej doby można było zrealizować badania obejmujące jeden wariant temperatury maksymalnej. Od wygrzania pierwszej partii próbek do czasu wygrzania ostatniej minęło więc ponad 25 dni. Próbkki musiały zatem być już na takim etapie dojrzewania, że zmiana właściwości w ciągu 25 dni była minimalna, a co za tym idzie wygrzewane próbki były prawie identyczne.

Tab. 21. Podstawowe parametry mieszanki i betonu użytego w badaniach właściwych

Parametr	Wartość
Projektowana klasa	C30/37
Uziarnienie (D _{max})	16mm
Cement	CEM II/BS 32,5R-NA
W/C	0,43
Klasa konsystencji	S3
Dodatki	Popiół lotny
Domieszki	Chryso OMEGA 132
Kruszywo	Żwir rzeczny (przewaga krzemianów)

Tab. 22. Projektowany skład mieszanki betonowej użytej do wykonania próbek w badaniach właściwych

Składnik	Zawartość
Cement CEM II/BS 32,5R-NA	320 kg/m ³
Woda całkowita	160 kg/m ³
Woda efektywna	139 kg/m ³
Kruszywo 0/2 - piasek	668 kg/m ³
Kruszywo 2/8 - żwir	437 kg/m ³
Kruszywo 8/16 - żwir	665 kg/m ³
Popiół lotny	60 kg/m ³
Plastyfikator OMEGA 132	2,88 kg/m ³
Ciężar mieszanki	2310 kg/m ³
Zawartość powietrza	2,5% +/- 1%

4.5.2 Plan badań zasadniczych

Planując badania mające na celu w jak najtrafniejszy sposób opisać zależność pomiędzy współczynnikiem zakumulowanego ciepła, a względną wytrzymałością resztkową betonu należy zacząć od wyznaczenia zakresu temperatur maksymalnych i czasów wygrzewania skutkujących zniszczeniami, które nie spowodują kompletnej nieprzydatności materiału od strony inżynierskiej. Biorąc pod uwagę wnioski z rozdziału 2.1.1, maksymalna

temperatura skutkująca materiałem potencjalnie użytecznym w obliczeniach nośności przyjęta została jako 800°C, a minimalna temperatura dająca wymierną utratę wytrzymałości to 400°C. Na podstawie wniosków z rozdziału 2.1.2 przyjęte zostały cztery okresy wygrzewania: 0 godzin, 1 godzina, 2 godziny, 3 godziny i 4 godziny. Czas dłuższy niż cztery godziny nie skutkuje znaczącym spadkiem wytrzymałości (względem wygrzewania czterogodzinnego). Na podstawie takich założeń zaplanowano liczbę próbek (tab. 23) i stworzono numerację próbek obowiązującą w czasie badań zasadniczych (tab. 24). Dodatkowo wykonano trzy próbki świadki – próbki niepoddawane wygrzewaniu nazwane: 0.0.A, 0.0.B, 0.0.C.

Tab. 23. Liczby próbek przyjętych do badania dla danych wartości temperatury i czasu wygrzewania

Temp. Czas	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
0 h	1	2	2	2	2
1 h	1	2	2	2	2
2 h	2	2	2	2	1
3 h	1	1	1	2	1
4 h	2	2	2	1	1

Suma: 41

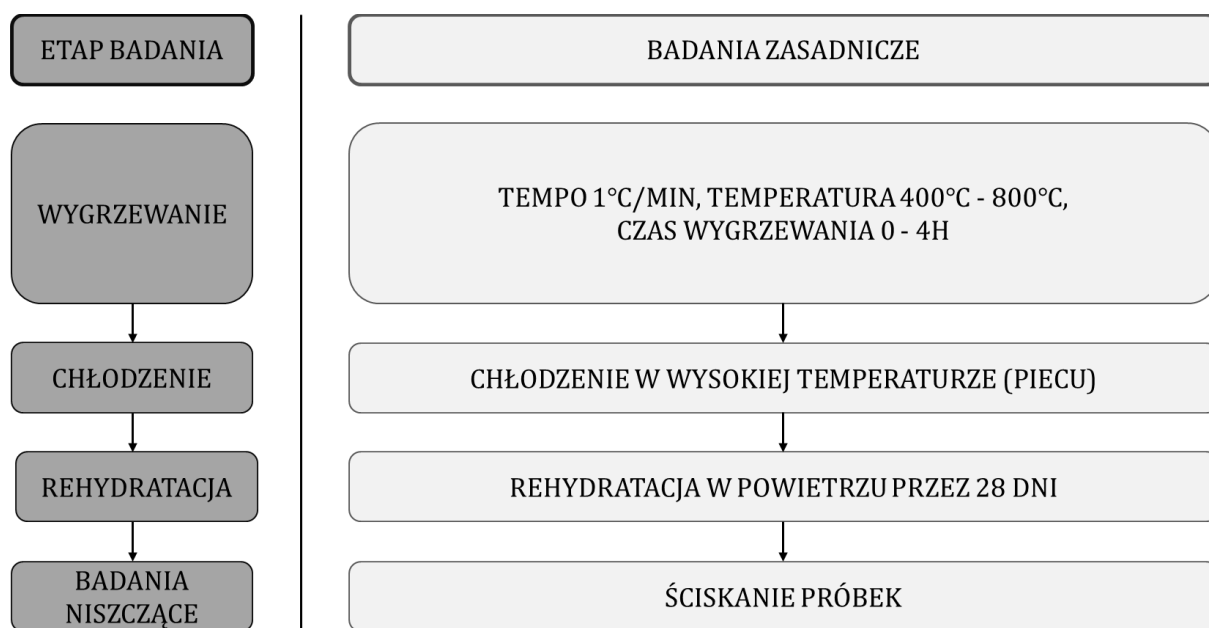
Tab. 24. Numeracja próbek przyjętych w badaniach właściwych

Temp. Czas	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
0 h	400.0.A	500.0.A i B	600.0.A i B	700.0.A i B	800.0.A i B
1 h	400.1.A	500.1.A i B	600.1.A i B	700.1.A i B	800.1.A i B
2 h	400.2.A i B	500.2.A i B	600.2.A i B	700.2.A i B	800.2.A
3 h	400.3.A	500.3.A	600.3.A	700.3.A i B	800.3.A
4 h	400.4.A i B	500.4.A i B	600.4.A i B	700.4.A	800.4.A

Tak nazwane próbki zostały wykonane z zachowaniem założeń z rozdziału 4.5.1 i wygrzane zgodnie z poniższym reżimem temperaturowym:

- Tempo nagrzewania - **1°C/min** – zgodnie z wnioskami rozdziału 4.1,
- Temperatura maksymalna i czas wygrzewania – zgodnie z założeniami badań właściwych,
- Chłodzenie – próbki będą powracały do temperatury pomieszczenia w zamkniętym piecu – wolniejsze i bardziej stabilne ochładzanie próbek (rys. 33) zminimalizuje ryzyko dodatkowych uszkodzeń mechanicznych spowodowanych nagłym ochłodzeniem (rys. 34). Dodatkowo jest to metoda bliżej oddająca sytuację zachodzącą wewnątrz elementów konstrukcji.

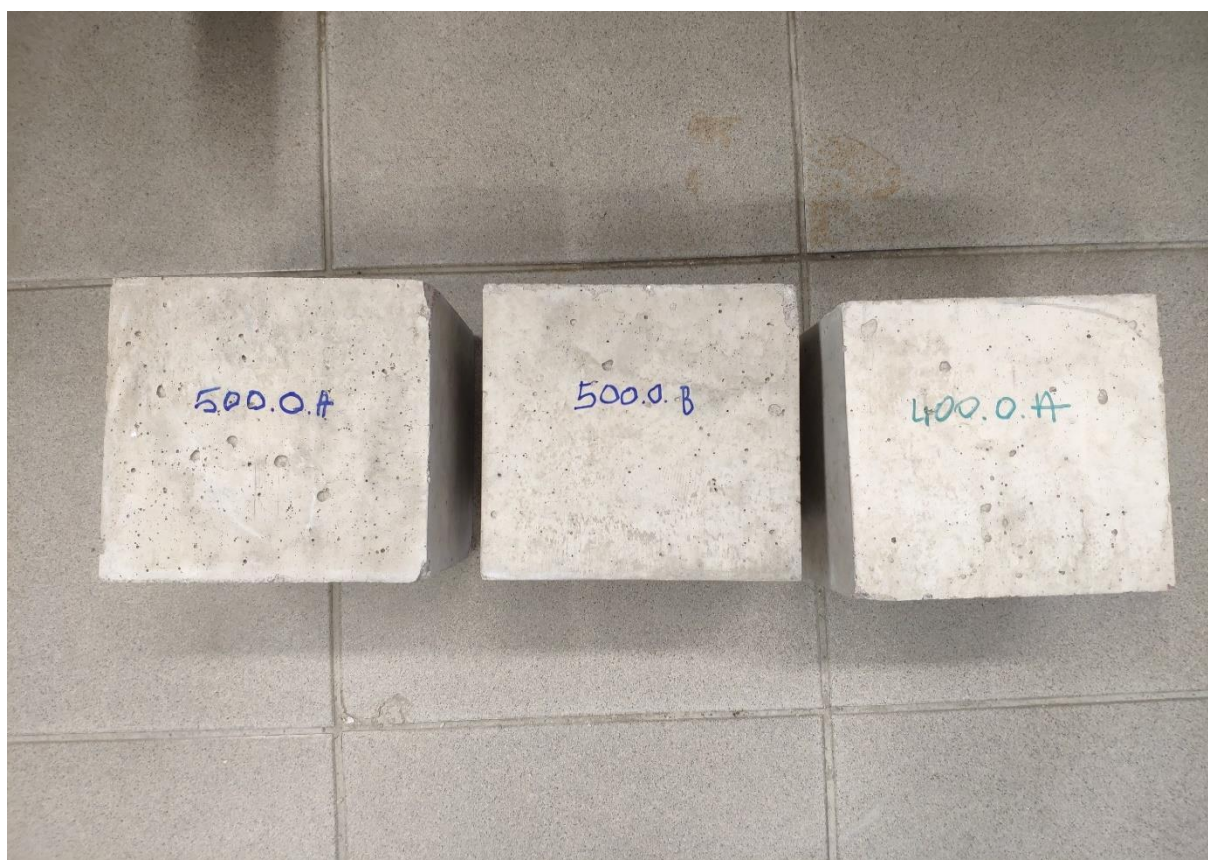
Następnie próbki zostały poddane rehydratacji w powietrzu w temperaturze 20°C i wilgotności względnej powietrza wynoszącej 50%. Po dokładnie 28 dniach od wyjęcia z pieca przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie z użyciem prasy infraTest ALPHA 2-3000 w sposób zgodny z [138]. Obciążanie odbywało się ze stałą prędkością równą 0,6 MPa/s. Plan badań został przedstawiony w formie schematu na rys. 41. Na rys. 42 do rys. 47 przedstawiono wybrane próbki podczas badania.



Rys. 41. Plan badań zasadniczych



Rys. 42. Próbkki 400.1.A, 400.2.A i 400.2.B przed wygrzewaniem



Rys. 43. Próbkki 500.0.A, 500.0.B i 400.0.A przed wygrzewaniem



Rys. 44. Próbką 400.0.A w piecu



Rys. 45. Próbki 500.0.A i 500.0.B w piecu



Rys. 46. Wygrzana próbka 400.0.A przed zniszczeniem



Rys. 47. Wygrzana próbka 400.0.A po zniszczeniu

4.6 WYNIKI BADAŃ ZASADNICZYCH

Po wygrzaniu próbek, ich rehydratacji i zniszczeniu zgodnie z [138] otrzymano wyniki przedstawione w tab. 25. Widoczne jest, że dla prawie każdego wygrzewanego zestawu (próbki A i B) osiągnięte wyniki są zbliżone. Potwierdza to poprawność wykonania eksperymentu i przydatność uzyskanych danych. Komentarza wymagają próbki wygrzewane do 800°C. Próbki 800.0.A i 800.0.B wykazują dużą różnicę wartości wytrzymałości przy takich samych warunkach wygrzewania. Dodatkowo próbki 800.3.A i 800.4.A nie zachowały się w stanie nadającym się do przeprowadzenia badania. Próbką

800.3.A zachowała spójność i udało się ją umieścić w maszynie, ale niestety jej wytrzymałość była tak niska, że nie udało się jej zanotować. Zniszczenie nastąpiło od razu po przyłożeniu obciążenia. Z kolei Próbką 800.4.A uległa tak znaczącej degradacji w trakcie wygrzewania, że zniszczyła się przy próbie wyjęcia jej z pieca. W tab. 26 przedstawione zostały uśrednione wartości wytrzymałości resztkowej dla odpowiednich temperatur i czasów wygrzewania. Biorąc pod uwagę wytrzymałość średnią próbek-świadków (tab. 27) oraz bazując na średniej wartości wytrzymałości resztkowej dla danego zakresu temperatury i czasu wygrzewania sporządzone zostało zestawienie względnej wytrzymałości resztkowej przedstawione w tab. 28.

Tab. 25. Wyniki wytrzymałości resztkowej betonu na ściskanie (f_{rc} – wyrażone w [MPa]) uzyskane w trakcie badań zasadniczych

Próbka	f_{rc}	Próbka	f_{rc}	Próbka	f_{rc}	Próbka	f_{rc}	Próbka	f_{rc}
400.0.A	42,8	500.0.A	36,6	600.0.A	31,7	700.0.A	12,6	800.0.A	3,9
400.1.A	34,6	500.0.B	35,6	600.0.B	28,3	700.0.B	11,9	800.0.B	7,4
400.2.A	36,6	500.1.A	33,1	600.1.A	18,8	700.1.A	8,3	800.1.A	2,8
400.2.B	37,5	500.1.B	31,7	600.1.B	18,3	700.1.B	10,1	800.1.B	2,2
400.3.A	37,5	500.2.A	28,2	600.2.A	11,7	700.2.A	11,3	800.2.A	0,9
400.4.A	35,7	500.2.B	33,1	600.2.B	16	700.2.B	8,8	800.3.A	0,0
400.4.B	39,7	500.3.A	29,2	600.3.A	11,1	700.3.A	8,2	800.4.A	0,0
		500.4.A	12,9	600.4.A	12,3	700.3.B	6,2		
		500.4.B	13,9	600.4.B	8,6	700.4.A	5,4		

Tab. 26. Średnia wytrzymałość resztkowa betonu (f_{rc} – wyrażone w [MPa]) dla przyjętych wartości temperatury i czasu wygrzewania

Temp. Czas	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
0 h	42,8	36,1	30,0	12,3	5,7
1 h	34,6	32,4	18,6	9,2	2,5
2 h	37,1	30,7	13,9	10,1	0,9
3 h	37,5	29,2	11,1	8,2	0,0
4 h	37,7	13,4	10,5	5,8	0,0

Tab. 27. Wytrzymałość próbek-świadków wyrażona w [MPa]

Próbka	Wytrzymałość [MPa]
0.0.A	56,5
0.0.B	55,3
0.0.C	61,0
Średnia	57,6
Odchylenie standardowe	2,45
Współczynnik zmienności	4,3%

Tab. 28. Względna wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie (R_{rs}) dla przyjętych wartości temperatury i czasu wygrzewania

Temp. Czas	400°C	500°C	600°C	700°C	800°C
0 h	0,743	0,627	0,521	0,213	0,098
1 h	0,601	0,563	0,322	0,160	0,043
2 h	0,643	0,532	0,240	0,174	0,016
3 h	0,651	0,507	0,193	0,142	0,000
4 h	0,655	0,233	0,181	0,101	0,000

4.7 WSPÓŁCZYNNIK ZAKUMULOWANEGO CIEPŁA

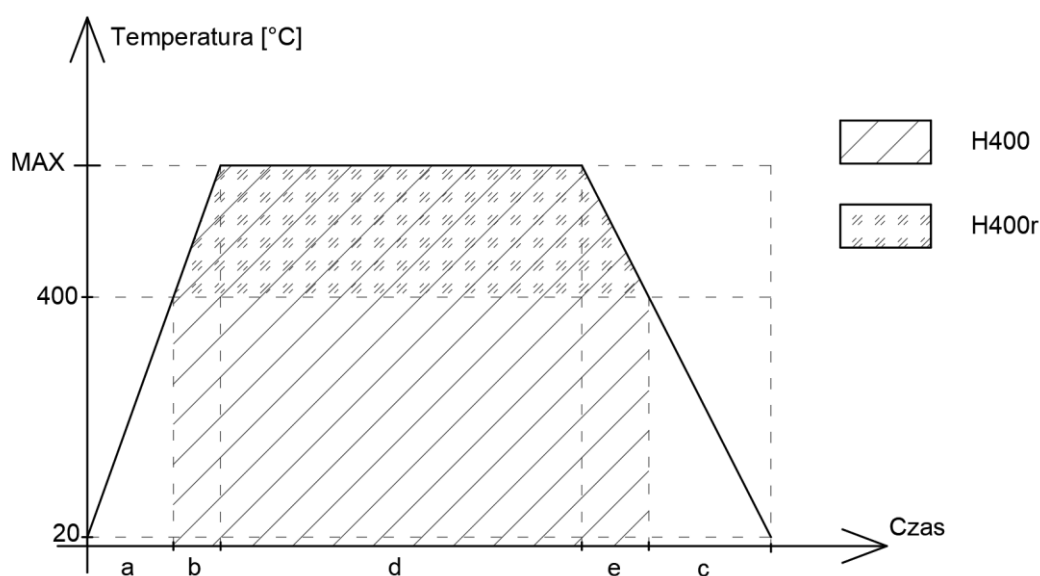
4.7.1 Koncepcja współczynnika

Zarówno wytrzymałość resztkowa, jak i ta w wysokiej temperaturze zależy w głównej mierze od dehydratacji żelu krzemiano-wodór-wapnia (C-S-H). Dehydratacja ta jest spowodowana ekspozycją na wysoką temperaturę i podlega wpływowi zarówno maksymalnej temperatury, jak i czasu nagrzewania, a nawet czasu chłodzenia, co pokazują wcześniej przedstawione badania. Bardzo korzystne ze względów praktycznych byłoby opracowanie parametru, który obejmowałby swoim zakresem wszystkie czynniki związane z temperaturą i nagrzewaniem. Dzięki takiemu podejściu można w postaci jednej wartości oddać stopień ekspozycji elementu na wysoką temperaturę, uwzględniając ilość ciepła zakumulowanego w betonie – będącego kluczowym czynnikiem przy szacowaniu wytrzymałości resztkowej. W [44] podjęta została taka próba w postaci współczynnika zakumulowanego ciepła H_{400} , który to wiąże wytrzymałość resztkową z polem powierzchni pod wykresem temperatury jako funkcji czasu ekspozycji wg równania (1). Wprowadzono również ograniczenie: pole to obliczano jedynie dla czasu, gdy temperatura była wyższa niż 400°C. Wartość 400°C

została przyjęta, gdyż przy takiej temperaturze zaczyna się rozkład zaczynu cementowego [58, 140–142]. Praktyka potwierdza takie podejście, długa ekspozycja betonu na temperaturę 200°C będzie dalece mniej niszcząca niż nawet krótka ekspozycja na 400°C. W [143] zaproponowano własny, zmodyfikowany sposób obliczania współczynnika zakumulowanego ciepła opisywanego jako H_{400r} . Zmianie podlegał sposób obliczania pola pod wykresem zgodnie z równaniem (2). Brano pod uwagę jedynie pole ponad linią wyznaczającą temperaturę 400°C. Porównanie sposobów przedstawiono graficznie na rys. 48. Zmodyfikowany sposób, likwiduje problem zwiększonej wartości współczynnika przy wydłużonym czasie ekspozycji na niższą temperaturę.

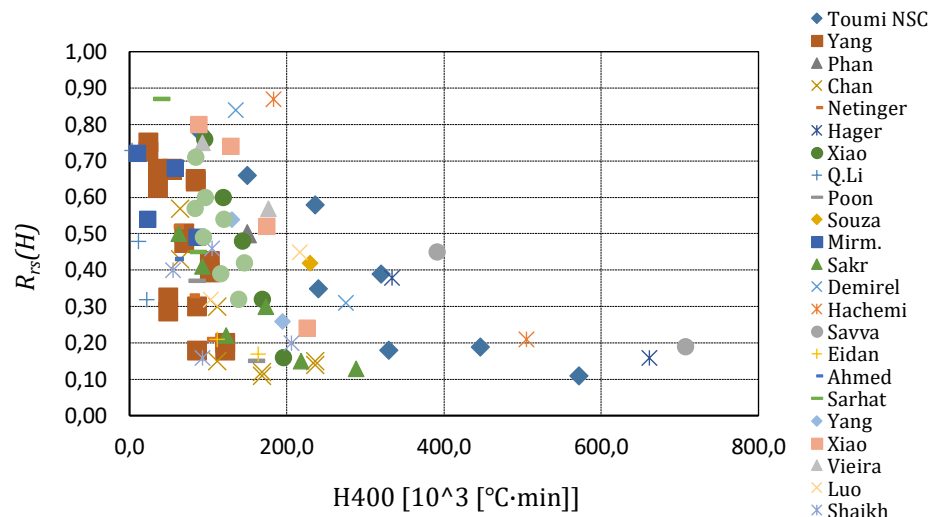
$$H_{400} = \int_{tr}^{ts} T(t) dt \quad (1)$$

$$H_{400r} = \int_{tr}^{ts} T(t) - 400 dt \quad (2)$$

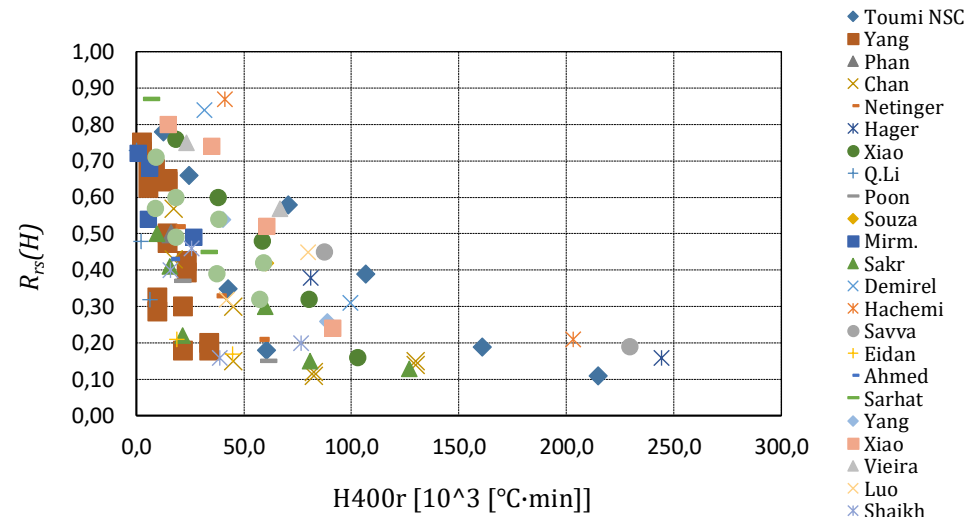


Rys. 48. Graficzne porównanie sposobów obliczania współczynnika zakumulowanego ciepła H^{400} i H^{400r} [143]

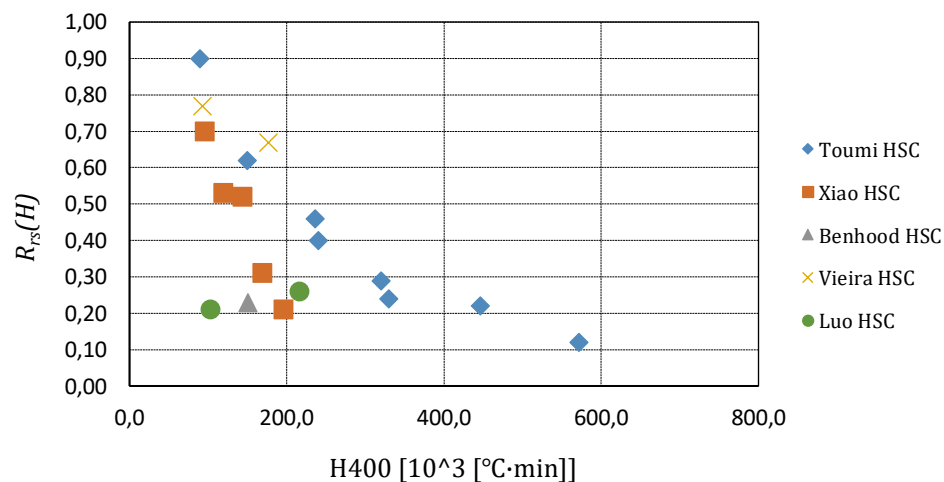
Od rys. 49 do rys. 56 zaprezentowano współczynniki zakumulowanego ciepła obliczone dla badań przeprowadzonych przez różnych autorów cytowanych w niniejszej pracy. Przy obliczeniach szybkość nagrzewania i chłodzenia były przyjęte jako stałe w celu ujednolicenia i uproszczenia prezentacji. Zarówno H_{400} jak i H_{400r} wykazują widoczną zależność od względnej wytrzymałości resztkowej betonu na ściskanie R_{rs} (rys. 49, rys. 50, rys. 51 i rys. 52), a im większy jest współczynnik zakumulowanego ciepła, tym mniejsza jest wytrzymałość. Rozrzut wyników jest jednak bardzo duży, ale mniejszy dla podejścia H_{400r} .



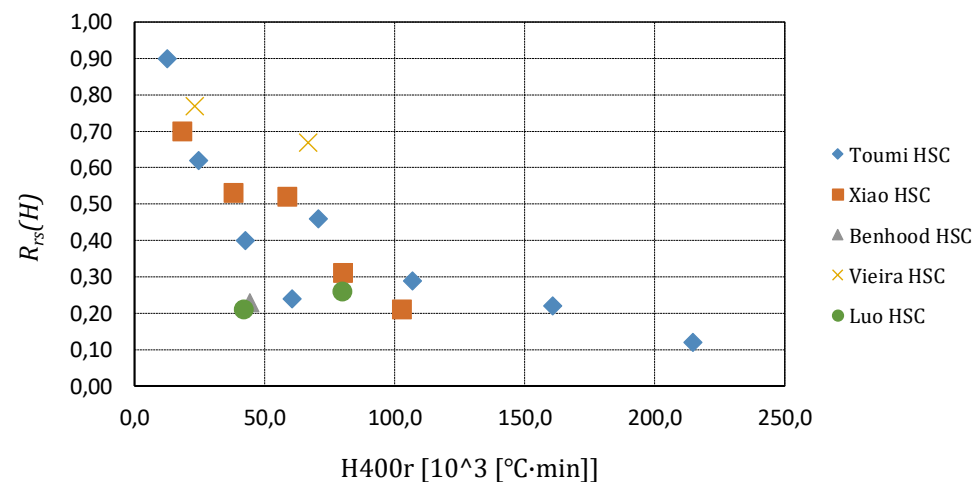
Rys. 49. Względna wytrzymałość resztkowa i współczynnik $H400$ – NSC, różni autorzy



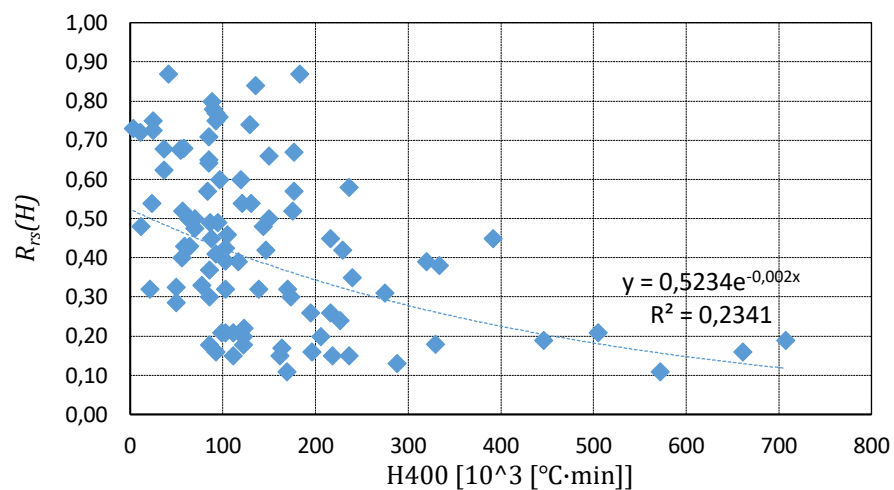
Rys. 50. Względna wytrzymałość resztkowa i współczynnik $H400r$ – NSC, różni autorzy



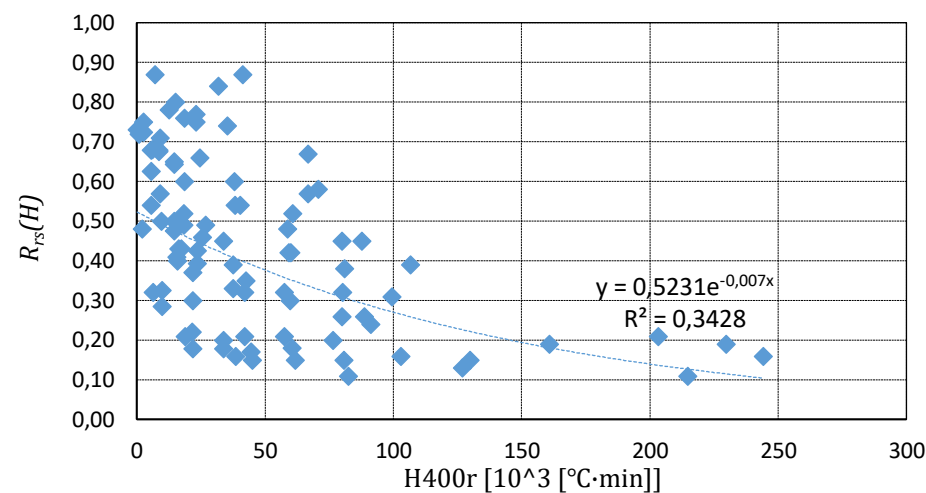
Rys. 51. Względna wytrzymałość resztkowa i współczynnik $H400$ – HSC, różni autorzy



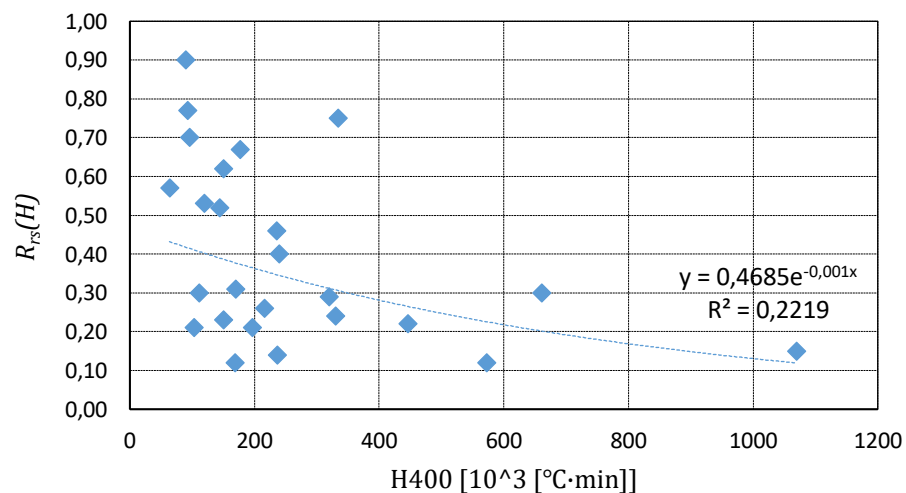
Rys. 52. Względna wytrzymałość resztkowa i współczynnik $H400r$ – HSC, różni autorzy



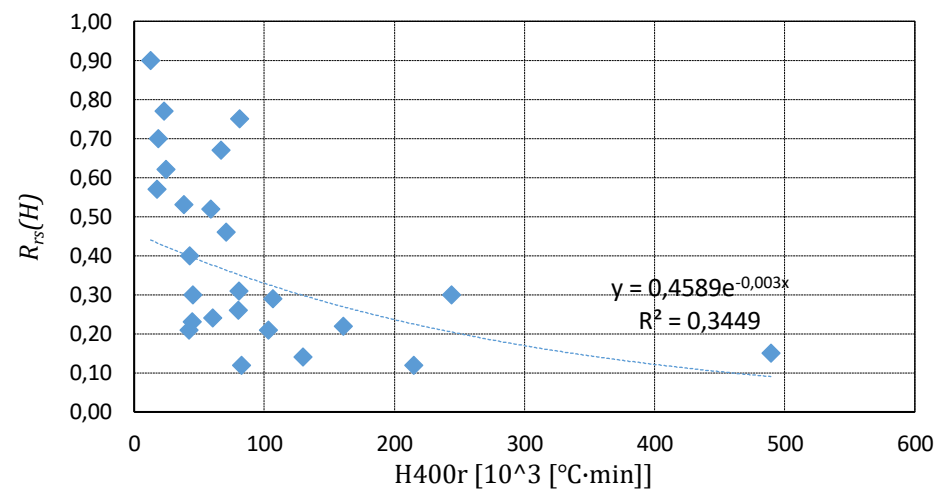
Rys. 53. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika H400 - NSC [143]



Rys. 54. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika H400r - NSC [143]



Rys. 55. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika H400 - HSC [143]



Rys. 56. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika H400r - HSC [143]

Na podstawie wszystkich wyników podjęta została próba dopasowania funkcji wykładniczej zarówno dla H_{400} (rys. 53 i rys. 55) jak i H_{400r} (rys. 54 i rys. 56). Mimo lepszego efektu dopasowania dla H_{400r} w obu przypadkach wyniki dalekie są od zadowalających. Współczynniki korelacji (tab. 29) wskazują na ujemną zależność o średniej sile. Ważne w kontekście przyszłych badań jest zbliżone zachowanie NSC i HSC, rozdzielanie podejść w stosunku do nich można pominąć. Współczynniki zakumulowanego ciepła są interesującym podejściem, mającym potencjał. Opracowane do tej pory funkcje nie są jednak wystarczająco dokładne, żeby z ich użyciem szacować wytrzymałość resztkową. Niezbędny jest dodatkowy wysiłek badawczy, aby metodę tę rozwinąć.

Tab. 29. Współczynniki korelacji pomiędzy współczynnikami zakumulowanego ciepła, a względną wytrzymałością resztkową [143]

	NSC		HSC	
	H_{400}	H_{400r}	H_{400}	H_{400r}
Pearson	-0,455	-0,543	-0,434	-0,498
Spearman	-0,494	-0,615	-0,500	-0,675
Kendall	-0,335	-0,435	-0,363	-0,490

4.7.2 Parametryzacja współczynnika zakumulowanego ciepła

Punktem wyjścia dla rozważań tego rozdziału będzie współczynnik H_{400r} zaproponowany w [143] będący zmodyfikowaną wersją H_{400} zaproponowanego przez [44]. Oba współczynniki są ciekawym i innowacyjnym podejściem do szacowania uszkodzeń betonu, jednak ich dokładność pozostawia wiele do życzenia (wartości współczynników korelacji wynosiły około 0,5) i w obecnej formie nie wykazują dużej przydatności w rzeczywistym szacowaniu wytrzymałości resztkowej.

Rozważania na temat sposobu obliczania współczynnika zakumulowanego ciepła i jego późniejszej przydatności w szacowaniu względnej wytrzymałości resztkowej należy zacząć od określenia sposobu szacowania tej wytrzymałości i kryteriów używanych w późniejszej ocenie danego oszacowania. Biorąc pod uwagę naturę zagadnienia zaproponowano dwie metody szacowania względnej wytrzymałości resztkowej:

1. Metodę opartą o funkcję logarytmiczną
2. Metodę opartą o funkcję wykładniczą

Otrzymano w ten sposób dwa wzory pozwalające szacować względną wytrzymałość resztkową betonu (3)(4) jako funkcję współczynnika zakumulowanego ciepła H_{af} :

$$Rars_{i,l}(H_{af,i}) = A_{i,l} \cdot \ln\left(\frac{H_{af,i}}{c_i}\right) + B_{i,l} \quad (3)$$

$$Rars_{i,e}(H_{af,i}) = A_{i,e} \cdot e^{B_{i,e} \cdot H_{af,i}} \quad (4)$$

gdzie A i B są współczynnikami dopasowania funkcji, a c jest współczynnikiem normalizującym funkcję logarytmiczną. $H_{af,i}(T_{max}, t_e, \alpha_i, \beta_i, \dots)$ jest z definicji funkcją maksymalnej temperatury i czasu wygrzewania, dodatkowo uzupełnione o współczynniki $(\alpha, \beta, \dots)$, które będą służyły lepszemu dopasowaniu funkcji do zestawu danych. Liczba współczynników będzie zależała od kształtu funkcji $H_{af,i}$, a "i" będzie opisywało kolejną modyfikację sposobu jej obliczania.

Tab. 30. Zestawienie badań innych autorów użytych w obliczeniach wraz z istotnymi warunkami badań

Autor	Zakres temperatury	Czas wygrzewania	Szybkość nagrzewania
Toumi [22]	300-700°C	3-9 h	10 °C/min
Yang [23]	400-600°C	0-2h	2,5 °C/min
Phan [24]	100-450°C	5h 30min	5 °C/min
Netinger [25]	200-1000°C*	1h 30min	NA
Xiao [28]	100-900°C	3h	ISO-834
Chan [29]	400-1200°C*	1h	BS476:Part20:1987
Yang [40]	200-800°C	3h	10 °C/min
Bingol [43]	100-700°C	3h	12-20 °C/min
Shaikh [46]	200-800°C	2h	8 °C/min
Li [48]	150-750°C	2h 30min	5 °C/min
Poon [58]	600-800°C	1h	2,5 °C/min
Souza [59]	300-600°C	2h - 2h 40min	ISO-834
Mirmomeni [61]	300-600°C	15min - 2h	NA
Luo [73]	800-1100°C*	1h	5-7 °C/min
Savva [79]	100-750°C	2h	2,5 °C/min
Sakr [83]	250-950°C	1-3h	10 °C/min
Xiao [88]	200-800°C	2h	ISO-834
Hachemi [93]	150-900°C	1h	3 °C/min
Ho [97]	400-1000°C*	1h	10 °C/min
Demirel [111]	400-800°C	1h	2,5 °C/min
Behnood [112]	100-600°C	3h	3 °C/min
Eidan [121]	100-600°C	2h 30min	6 °C/min
Sarhat [144]	250-750°C	1h	NA

* W obliczeniach brane były tylko pod uwagę próbki wygrzane do temp. mniejszych niż 1000°C

Kryterium oceny poprawności jest metoda najmniejszej sumy kwadratów (RSS – z ang. Residual Sum of Squares) według (5):

$$RSS_{j,i} = \sum_{k=1}^n \left(\frac{Rrs_k - Rars_{i,j}(H_{af,i,k})}{Rrs_k} \right)^2$$

gdzie:

j – rodzaj funkcji szacowania: logarytmiczna bądź wykładnicza

i – numer modyfikacji

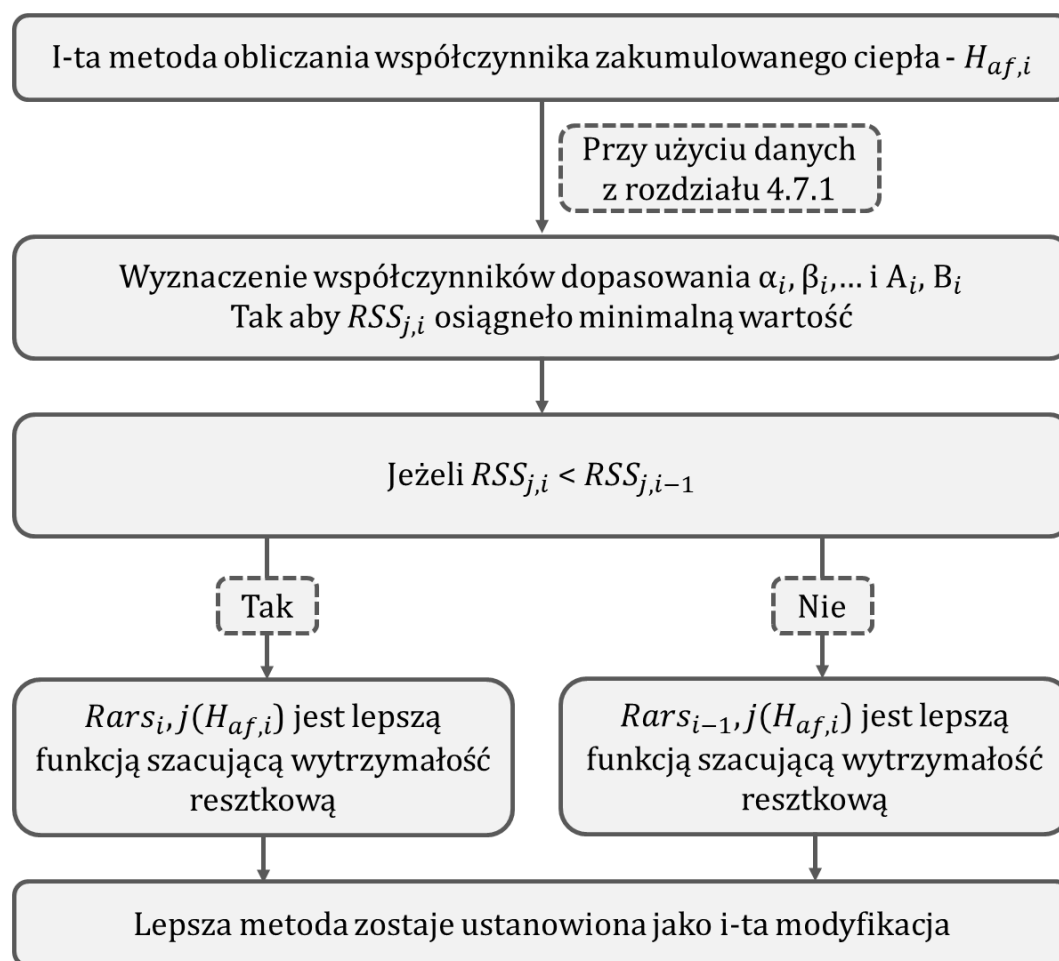
n – liczba próbek (5)

Rrs_k – względna wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie k-tej próbki

$Rars_{i,j}(H_{af,i,k})$ – Oszacowana na podstawie współczynnika zakumulowanego ciepła względna wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie k-tej próbki j-tą metodą, funkcją i-tej modyfikacji

Znalezienie najmniejszej wartości RSS będzie równoznaczne ze znalezieniem najlepszego dopasowania funkcji szacującej wytrzymałość resztkową. Danymi użytymi w powyższych obliczeniach będą wyniki zebrane w czasie analizy literaturowej (tab. 30) i wyniki własne przedstawione w rozdziale 4.7.1. Zmianą podejścia w stosunku do wcześniejszych obliczeń będzie zgrupowanie betonów NSC i HSC razem, gdyż względna wytrzymałość resztkowa dla obu rodzajów betonu nie odbiegała od siebie w sposób istotny. Schemat postępowania przy poszukiwaniu funkcji najlepiej szacującej wytrzymałość resztkową przedstawiony jest na rys. 57.

Punktem wyjściowym rozważań jest współczynnik H_{400r} . Kolejno proponowane są udoskonalenia funkcji H_{af} i będą one testowane wg zaproponowanego algorytmu. Dla każdej metody przedstawione zostaną wykresy obrazujące rozkład wartości funkcji szacowania i H_{af} jako jej argumentu. Dodatkowo przedstawiony zostanie współczynnik korelacji Pearsona, aby w sposób szacunkowy określić jakość dopasowania. Po osiągnięciu zadowalającego dopasowania najlepsza metoda zostanie przyjęta jako ostateczna.



Rys. 57. Schemat postępowania przy poszukiwaniu najdokładniejszej funkcji szacującej wytrzymałość resztkową na podstawie współczynnika zakumulowanego ciepła $Rars(H_{af})$

4.7.3 Funkcja początkowa - H_{400r}

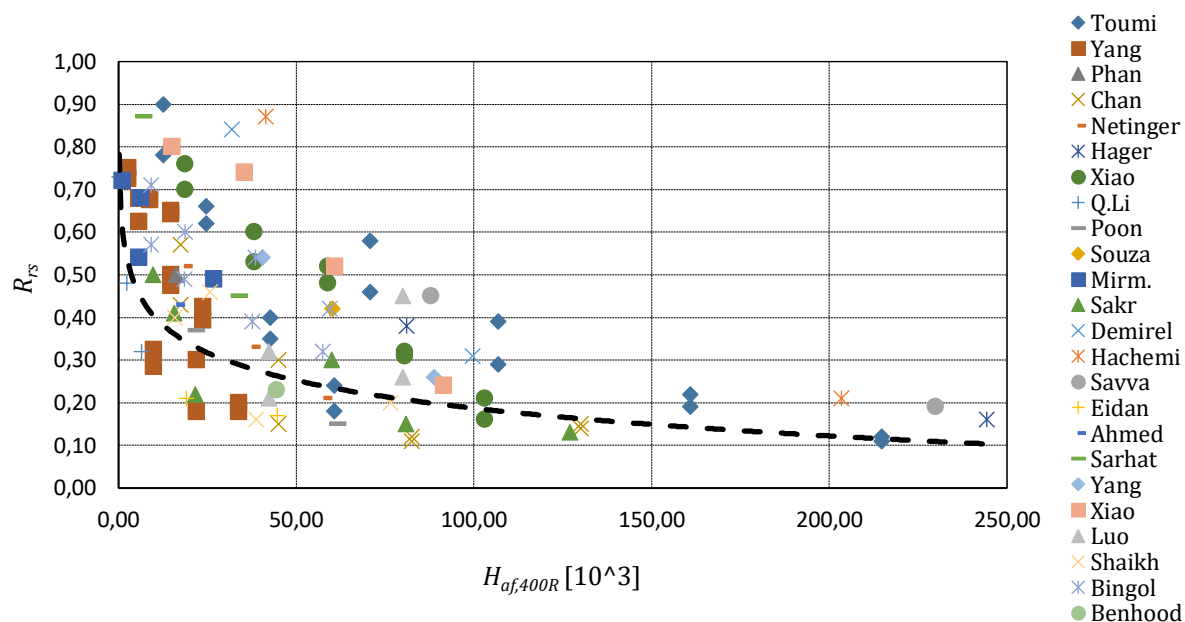
Aby określić punkt odniesienia w rozważaniach na temat współczynnika zakumulowanego ciepła należy, przy użyciu zaproponowanej powyżej metody, stworzyć funkcję szacującą wytrzymałość resztkową betonu na podstawie H_{400r} . Metoda obliczania współczynnika H_{400r} przedstawiona została na rys. 48, a korelacja wyników uzyskanych za pomocą tej metody w odniesieniu do wytrzymałości resztkowej wyniosła -0,589. Funkcja szacunkowa oparta na wzorach (3) (4) została wyznaczona przy pomocy narzędzia Solver w programie Excel, pozwalającej na znalezienie optymalnego rozwiązania dla zadanych warunków (6):

$$\begin{cases} \text{Zmieniaj: } A_{0,j}, B_{0,j} \\ \text{Szukaj: } \min(RSS_{0,j}) \end{cases} \quad (6)$$

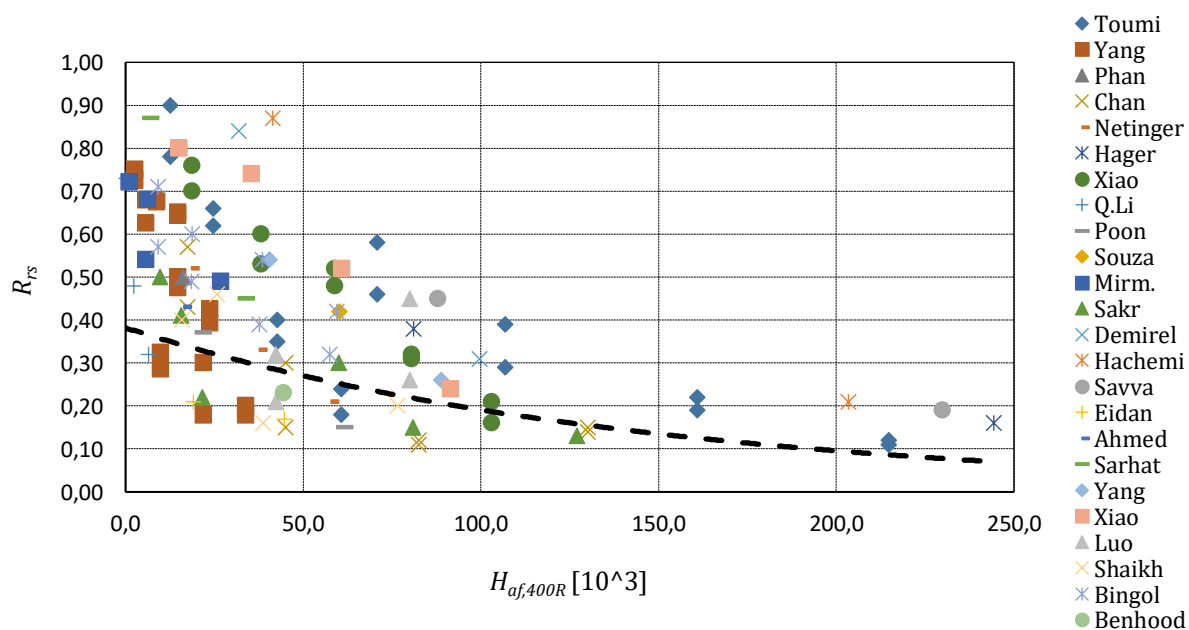
Postępowanie takie zastosowano dla obu metod szacowania wytrzymałości resztkowej (funkcja logarytmiczna i wykładnicza). Wyniki przedstawiono w tab. 31 i na wykresach (rys. 59, rys. 60).

Tab. 31. Wartości współczynników $A_{i,j}$, $B_{i,j}$ oraz $RSS_{j,i}$ dla funkcji szacującej wytrzymałość resztkową na bazie współczynnika H_{400r} : logarytmiczna (l) i wykładnicza (e)

Współczynniki	Funkcja logarytmiczna	Współczynniki	Funkcja wykładnicza
$A_{0,l}$	-0,09376	$A_{0,e}$	0,38194
$B_{0,l}$	0,6191	$B_{0,e}$	-0,00692
$RSS_{0,l}$	17,78	$RSS_{0,e}$	20,55



Rys. 58. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika H_{400r} – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (logarytmiczna, $c_0 = 10^3$)



Rys. 59. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika H_{400r} – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (wykładnicza)

Dopasowanie wyników i współczynnik korelacji pokazują, że istnieje silna zależność, co potwierdza potencjał tej metody w przypadku szacowania wytrzymałości resztkowej. Współczynnik H_{400r} jako baza rozważań nie uwzględnia istotności poszczególnych czynników (temperatura i czas), co należy zmienić w kolejnych modyfikacjach. W kwestii funkcji szacującej lepsze okazuje się podejście z funkcją logarytmiczną, co potwierdzają zarówno otrzymane wyniki błędu szacowania RSS, jak i optyczne wrażenie dopasowania.

4.7.4 Modyfikacja pierwsza - $H_{af,1}$

Pierwsza modyfikacja wzoru będzie bazować na H_{400r} opisanym w rozdziale 4.7.3. Udoskonaleniem będzie dodanie współczynnika α , który (przy $\alpha > 1$) będzie zwiększał wpływ wysokiej temperatury względem czasu wygrzewania. Podejście takie przyjęte zostało na podstawie obserwacji istniejących badań, gdzie kluczowym i najbardziej decydującym czynnikiem jest temperatura maksymalna. Taka modyfikacja wzoru powoduje jednocześnie zniwelowanie problemu podejścia H_{400r} , w którym bardzo długa ekspozycja w niskiej temperaturze skutkowałą takimi samymi teoretycznymi uszkodzeniami betonu jak krótka ekspozycja w zdecydowanie wyższej temperaturze – taka zależność nie znajduje potwierdzenia w wynikach eksperymentów. Ogólna postać funkcji jest następująca:

$$H_{af,1} = \int (T - 400)^\alpha dt$$

gdzie:

T – temperatura próbki (7)

α – współczynnik modyfikujący

t - czas

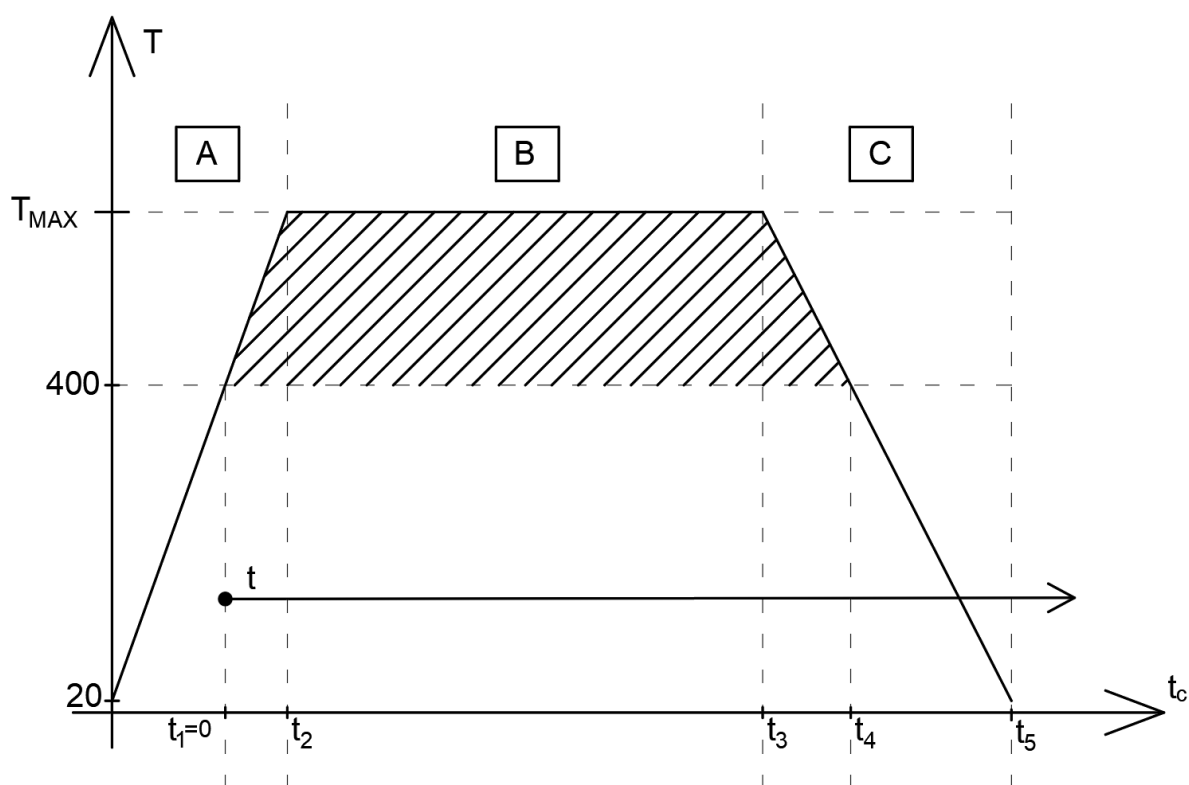
Graficzne przedstawienie funkcji temperatury w czasie zostało przedstawione na rys. 60. Aby poprawnie obliczyć wartość współczynnika zakumulowanego ciepła należało obliczenia podzielić na trzy obszary: [A] – nagrzewanie, [B] – ekspozycja stałą temperaturą maksymalną i [C] – chłodzenie. Zgodnie z założeniami eksperymentów wzrost temperatury jest liniowy:

$$n_A = \frac{dT}{dt} = \text{const.} - \text{szybkość nagrzewania} \quad (8)$$

Dodatkowo dla uproszczenia obliczeń przyjęto liniową zmianę temperatury w obszarze chłodzenia :

$$c_C = \frac{dT}{dt} = \text{const.} - \text{szybkość chłodzenia} \quad (9)$$

Dla każdego obszaru wprowadzono wzory pozwalające obliczyć $H_{af,1}$:



Rys. 60. Temperatura jako funkcja czasu wraz z podziałem na obszary dla obliczeń $H_{af,1}$

$$H_{af,1} = P_A + P_B + P_C \quad (10)$$

▪ Obszar [A]

$$T = n_A \cdot t \quad (11)$$

$$T^{\alpha_1} = n_A^{\alpha_1} \cdot t^{\alpha_1} \quad (12)$$

$$P_A = \int_{t_1}^{t_2} n_A^{\alpha_1} \cdot t^{\alpha_1} dt = n_A^{\alpha_1} \cdot \left. \frac{t^{\alpha_1+1}}{\alpha_1+1} \right|_{t_1}^{t_2} \quad (13)$$

$$t_1 = 0, \quad t_2 = \frac{T_{max} - 400}{n_A}$$

• Obszar [B]

$$P_B = (T_{max} - 400)^{\alpha_1} \cdot (t_3 - t_2) \quad (14)$$

• Obszar [C]

$$P_C = \int_{t_4}^{t_3} c_C^{\alpha_1} \cdot t^{\alpha_1} dt = c_C^{\alpha_1} \cdot \left. \frac{t^{\alpha_1+1}}{\alpha_1+1} \right|_{t_4}^{t_3} \quad (15)$$

gdzie:

$P_{A,B,C}$ – Pola pod wykresem dla obszarów A,B,C

T_{max} – maksymalna temperatura próbki

Funkcja szacunkowa oparta na wzorach (3),(4) została ponownie obliczona przy pomocy narzędzia analizy warunkowej pozwalającej na znalezienie optymalnego rozwiązania dla zadanych warunków (16) i (6):

$$\begin{cases} \text{Zmieniaj: } A_{1,j}, B_{1,j}, \alpha_{1,j} \\ \alpha_{1,j} > 1 \\ \text{Szukaj: } \min (RSS_{1,j}) \end{cases} \quad (16)$$

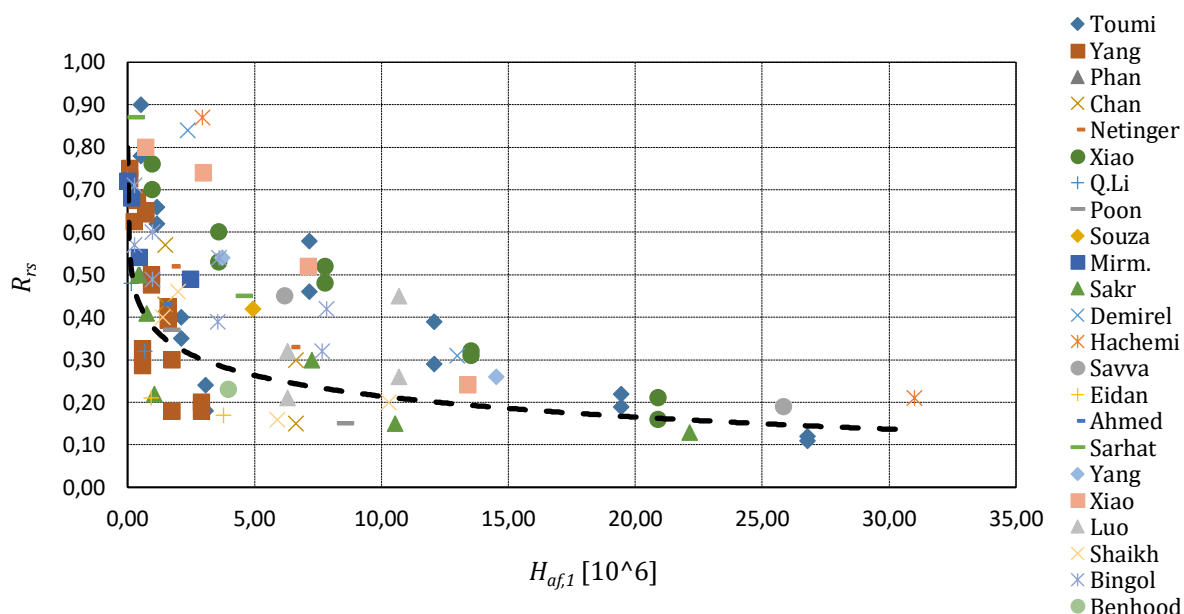
Zgodnie z algorytmem działania postępowanie to przeprowadzono dla obu metod (funkcja logarytmiczna i wykładnicza). Wyniki przedstawiono w tab. 32, tab. 33 oraz na wykresach (rys. 61, rys. 62).

Tab. 32. Współczynnik korelacji współczynników $H_{af,1,l}$ oraz $H_{af,1,e}$ i względnej wytrzymałości resztkowej

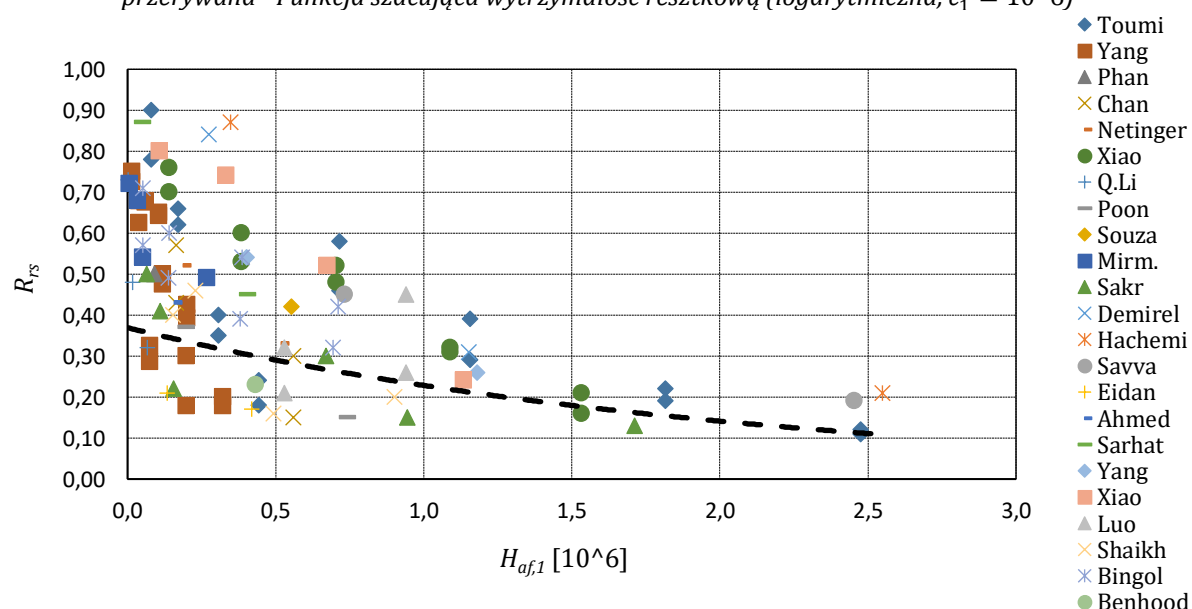
Współczynnik korelacji Pearsona	
Szacowanie funkcją logarytmiczną (l)	-0,584
Szacowanie funkcją wykładniczą (e)	-0,583

Tab. 33. Wartości współczynników $A_{i,j}$, $B_{i,j}$, $\alpha_{i,j}$ oraz $RSS_{j,i}$ dla funkcji szacującej wytrzymałość resztkową na bazie współczynnika $H_{af,1}$: logarytmiczna (l) i wykładnicza (e)

Współczynniki	Funkcja logarytmiczna	Współczynniki	Funkcja wykładnicza
$A_{1,l}$	-0,07064	$A_{1,e}$	0,36928
$B_{1,l}$	0,37708	$B_{1,e}$	-0,48031
$\alpha_{1,l}$	1,86	$\alpha_{1,e}$	1,44
$RSS_{1,l}$	15,349	$RSS_{1,e}$	18,035



Rys. 61. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika $H_{af,1}$, l – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (logarytmiczna, $c_1 = 10^6$)



Rys. 62. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika $H_{af,1}$, e – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (wykładnicza)

Analizując wyniki uzyskane w pierwszej modyfikacji, widoczne jest lepsze dopasowanie funkcji szacującej wytrzymałość resztkową ($RSS_1 < RSS_0$) dla obu metod w porównaniu z funkcją początkową. Ciekawym jest fakt, że współczynnik korelacji jest nieznacznie mniejszy, co bardziej wynika ze specyfiki metody Pearsona, bazującej na korelacji liniowej niż z dużo lepszego dopasowania funkcji. Graficzna reprezentacja wyników charakteryzuje się mniejszym rozproszeniem i zdecydowanie trafniejszym dopasowaniem funkcji. Po raz kolejny w przypadku funkcji logarytmicznej, otrzymano mniejszą wartość błędu oszacowania. Pomimo postępu względem początkowego wzoru,

modyfikacja pierwsza dalej zmagą się z problemem utrudniającym lepsze dopasowanie: długotrwała ekspozycja próbki na niższą temperaturę skutkuje wysokim $H_{af,1}$ – które skutkuje szacunkiem większych zniszczeń próbki niż faktycznie ma to miejsce.

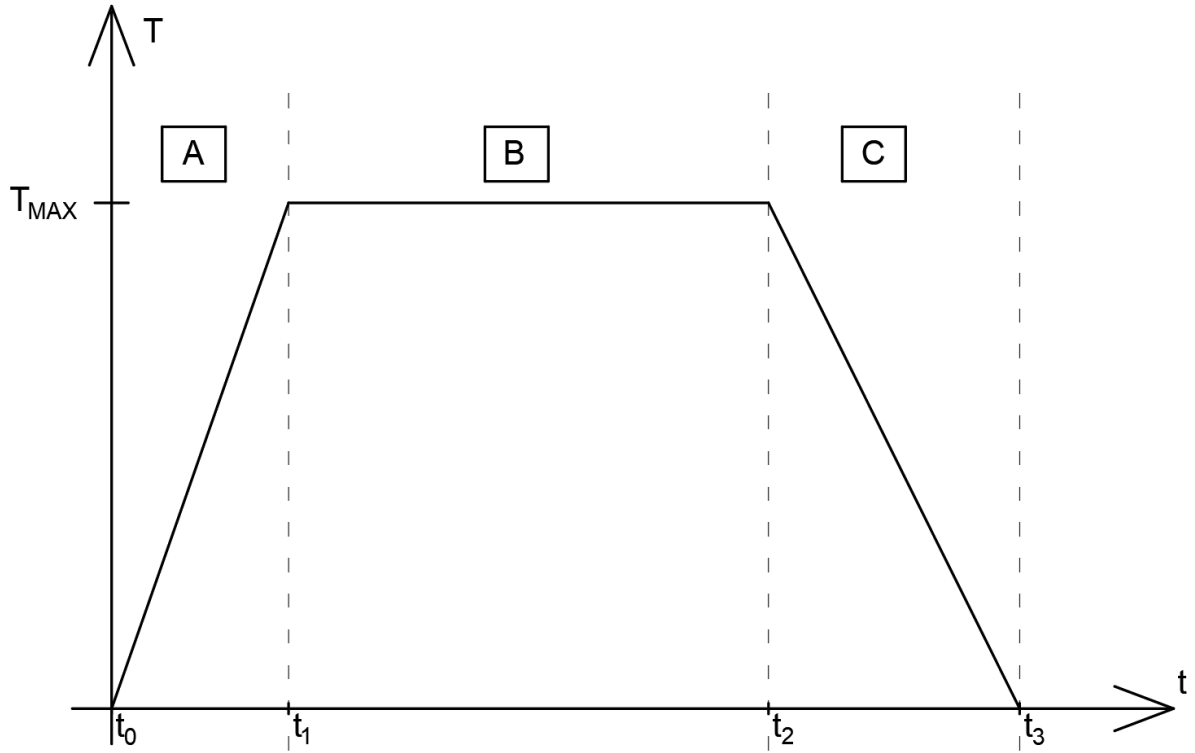
4.7.5 Modyfikacja druga - $H_{af,2}$

Druga modyfikacja będzie próbą rozwiązania problemu, z którym zmagają się zarówno modyfikacja początkowa, jak i w mniejszym stopniu modyfikacja pierwsza. Przedłużający się czas wygrzewania w niższej temperaturze skutkuje nieadekwatnie zwiększonym współczynnikiem zakumulowanego ciepła w porównaniu do krótszego wygrzania w wyższej temperaturze. Symulacją zmniejszającego się wpływu czasu wygrzewania będzie wzór:

$$H_{af,2} = \int T^{\alpha_2} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_3}\right) dt \quad (17)$$

Poprzez dodanie fragmentu $\left(1 - \frac{t}{t_3}\right)$, umożliwiające jest oddanie faktu, że najbardziej kluczowy jest początkowy czas nagrzewania – to wtedy następuje większość zniszczeń. Wygrzewanie, które następuje w późniejszej fazie jest mniej istotne. W przypadku zwiększenia wpływu temperatury poprzez współczynnik α_2 i dodatkowe zmniejszenie wpływu długości czasu wygrzewania granica 400°C, jako pułap, od którego należy zaczynać obliczenia przestaje mieć znaczenie. Współczynniki same dopasują się w sposób pozwalający odpowiednio uwzględnić temperaturę. Jednocześnie bardziej naturalnym wydaje się zastosowanie funkcji ciągłej. Nie jest prawdą, że poniżej 400°C nie zachodzą zniszczenia. Graficzne przedstawienie funkcji temperatury w czasie zostało przedstawione na rys. 63. Wzory (8) i (9) dalej znajdują zastosowanie, a modyfikacją wzoru (10) jest :

$$H_{af,2} = P_A + P_B + P_C \quad (18)$$



Rys. 63. Temperatura jako funkcja czasu wraz z podziałem na obszary dla obliczeń $H_{af,2}$

Dla każdego obszaru wyprowadzono wzory pozwalające obliczyć $H_{af,2}$:

- Obszar [A]

$$T = n_A \cdot t \quad (19)$$

$$P_A = \int_{t_0}^{t_1} n_A^{\alpha_2} t^{\alpha_2} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_3}\right) dt = n_A^{\alpha_2} \cdot t^{\alpha_2+1} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_2+1} - \frac{t}{(\alpha_2+2) \cdot t_3}\right) \Big|_{t_0}^{t_1} \quad (20)$$

- Obszar [B]

$$P_B = \int_{t_1}^{t_2} T_{max}^{\alpha_2} \left(1 - \frac{t}{t_3}\right) dt = T_{max}^{\alpha_2} \left(t - \frac{t^2}{2t_3}\right) \Big|_{t_1}^{t_2} \quad (21)$$

- Obszar [C]

$$T = T_{max} - c_C \cdot (t - t_2) \quad (22)$$

$$P_C = \int_{t_2}^{t_3} (T_{max} - c_C t + c_C t_2)^{\alpha_2} \cdot \left(1 - \frac{t}{t_3}\right) dt$$

$$= \frac{(T_{max} - c_C t + c_C t_2)^{\alpha_2+1} \cdot (\alpha_2 t + t + t_2 - \alpha_2 t_3 - 2t_3 + \frac{T_{max}}{c_C})}{(\alpha_2+1)(\alpha_2+2) \cdot c_C \cdot t_3} \Big|_{t_2}^{t_3} \quad (23)$$

Funkcja szacunkowa oparta na wzorach (3),(4) została ponownie obliczona przy pomocy narzędzia analizy warunkowej pozwalającej na znalezienie optymalnego rozwiązania dla zadanych warunków (24):

$$\begin{cases} \text{Zmieniaj: } A_{2,j}, B_{2,j}, \alpha_{2,j} \\ \alpha_{2,j} > 1 \\ \text{Szukaj: } \min (RSS_{2,j}) \end{cases} \quad (24)$$

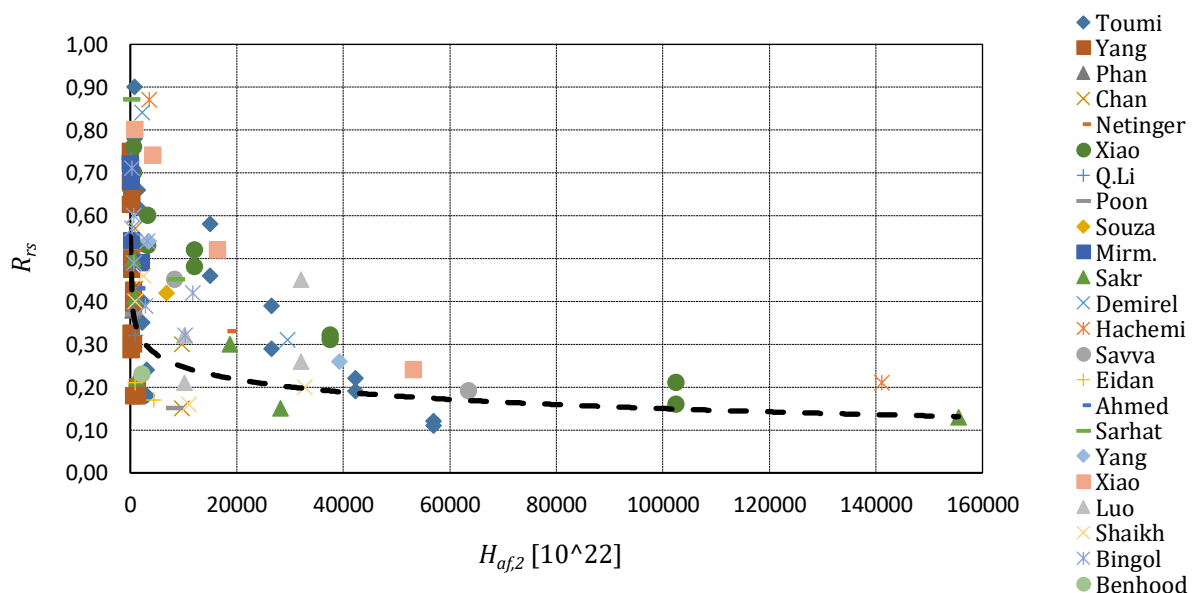
Zgodnie z algorytmem działania, postępowanie to przeprowadzono dla obu metod (funkcja logarytmiczna i wykładnicza). Wyniki przedstawiono w tab. 34, tab. 35 i na wykresach (rys. 64, rys. 65).

Tab. 34. Współczynnik korelacji współczynników $H_{af,2,l}$ oraz $H_{af,2,e}$ i względnej wytrzymałości resztkowej

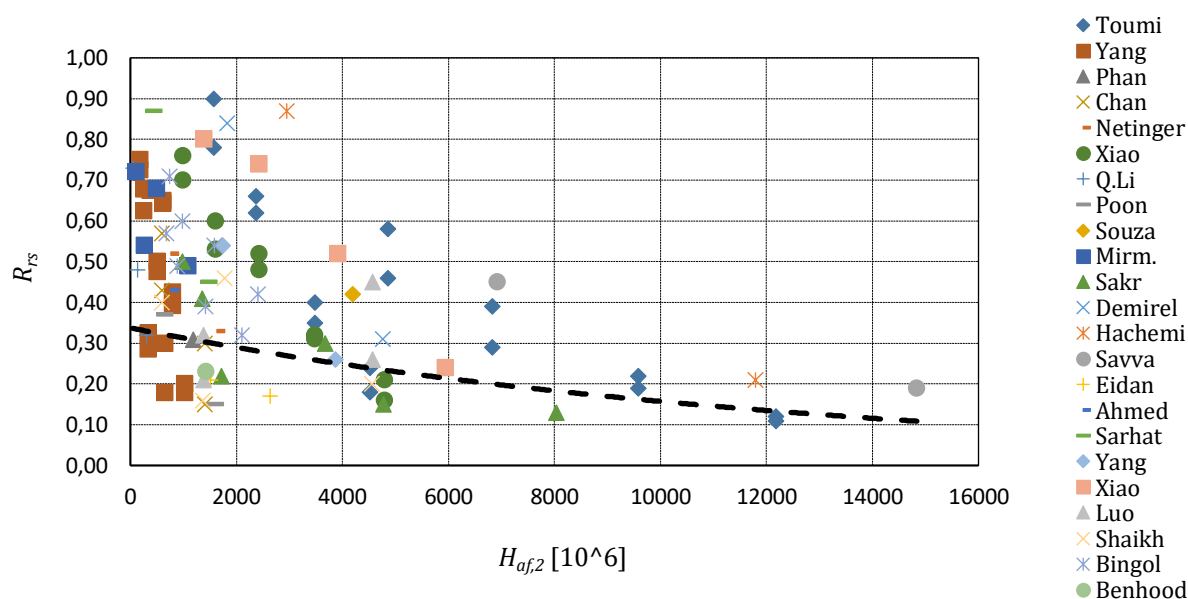
Współczynnik korelacji Pearsona	
Szacowanie funkcją logarytmiczną (l)	-0,475
Szacowanie funkcją wykładniczą (e)	-0,479

Tab. 35. Wartości współczynników $A_{i,j}$, $B_{i,j}$, $\alpha_{i,j}$ oraz $RSS_{j,i}$ dla funkcji szacującej wytrzymałość resztkową na bazie współczynnika $H_{af,2}$: logarytmiczna (l) i wykładnicza (e)

Współczynniki	Funkcja logarytmiczna	Współczynniki	Funkcja wykładnicza
$A_{2,l}$	-0,0421	$A_{2,e}$	0,3374
$B_{2,l}$	0,6347	$B_{2,e}$	-0,00008
$\alpha_{2,l}$	8,47	$\alpha_{2,e}$	2,60
$RSS_{2,l}$	17,385	$RSS_{2,e}$	20,148



Rys. 64. Względna wytrzymałość resztkowa i współczynnik $H_{af,2,l}$ – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (logarytmiczna, $c_2 = 10^{22}$)



Rys. 65. Względna wytrzymałość resztkowa i współczynnik $H_{af,2}$, e – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (wykładnicza)

Druga modyfikacja nie przyniosła oczekiwanych rezultatów. Wartości zarówno współczynnika korelacji, jak i błędu szacowania wskazują, że metoda ta jest gorsza niż zastosowana w pierwszej iteracji ($RSS_1 < RSS_2$). Wykresy cechują się znacznym rozproszeniem wyników, a optymalna wartości współczynników dla metody logarytmicznej powoduje znaczne spłaszczenie dla niższych wartości $H_{af,2}$. Spowodowane jest to bardzo wysoką wartością $\alpha_2 = 8,47$, która powoduje przeszacowanie wpływu temperatury maksymalnej i skutkuje wątpliwą jakością szacowania. Pomimo niezadowolających rezultatów tego kroku iteracji, ponownie potwierdza się, że funkcja logarytmiczna jest lepszym sposobem szacowania wytrzymałości resztkowej. Założenia początkowe o próbie zmniejszenia wpływu przedłużającego się czasu wygrzewania są prawidłowe, ale niezbędne jest znalezienie bardziej złożonego sposobu niż współczynnik zmniejszający $(1 - \frac{t}{t_3})$. Konieczna jest dalsza modyfikacja.

4.7.6 Modyfikacja trzecia - $H_{af,3}$

Modyfikacja trzecia będzie rozwinięciem pomysłu wykorzystanego w iteracji drugiej. Różnica będzie polegała na większej kontroli nad częścią wzoru zmniejszającą wpływ czasu wygrzewania. Zaimplementowanie dodatkowego współczynnika β_3 pomoże w odpowiednim dopasowaniu właściwego poziomu wpływu czasu :

$$H_{af,3} = \int T^{\alpha_3} \cdot (1 - \frac{\beta_3 t}{t_3}) dt \quad (25)$$

Podobnie jak w przypadku poprzedniej iteracji wzory (8) i (9) dalej znajdują zastosowanie, a modyfikacją wzoru (10) jest :

$$H_{af,3} = P_A + P_B + P_C \quad (26)$$

Graficzne przedstawienie funkcji temperatury w czasie pozostaje takie same jak na rys.

63. Dla każdego obszaru wyprowadzono wzory pozwalające obliczyć $H_{af,3}$:

- Obszar [A]

$$T = n_A \cdot t \quad (27)$$

$$P_A = \int_{t_0}^{t_1} n_A^{\alpha_3} t^{\alpha_3} \cdot \left(1 - \frac{\beta_3 t}{t_3}\right) dt = n_A^{\alpha_3} \cdot t^{\alpha_3+1} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_3+1} - \frac{\beta_3 t}{(\alpha_3+2) \cdot t_3}\right) \Big|_{t_0}^{t_1} \quad (28)$$

- Obszar [B]

$$P_B = \int_{t_1}^{t_2} T_{max}^{\alpha_3} \left(1 - \frac{\beta_3 t}{t_3}\right) dt = T_{max}^{\alpha_3} \left(t - \frac{\beta_3 t^2}{2t_3}\right) \Big|_{t_1}^{t_2} \quad (29)$$

- Obszar [C]

$$T = T_{max} - c_C \cdot (t - t_2) \quad (30)$$

$$P_C = \int_{t_2}^{t_3} (T_{max} - c_C t + c_C t_2)^{\alpha_3} \cdot \left(1 - \frac{\beta_3 t}{t_3}\right) dt$$

$$= \frac{(T_{max} - c_C t + c_C t_2)^{\alpha_3+1} \cdot (\alpha_3 \beta_3 t + \beta_3 t + \beta_3 t_2 - \alpha_3 t_3 - 2t_3 + \frac{\beta_3}{c_C} T_{max})}{(\alpha_3+1)(\alpha_3+2) \cdot c_C \cdot t_3} \Big|_{t_2}^{t_3} \quad (31)$$

Funkcja szacunkowa oparta na wzorach (3) i (4) została ponownie obliczona przy pomocy narzędzia analizy warunkowej pozwalającej na znalezienie optymalnego rozwiązania dla zadanych warunków(24) i (32):

$$\begin{cases} \text{Zmieniaj: } A_{3,j}, B_{3,j}, \alpha_{3,j}, \beta_{3,j} \\ \alpha_{3,j} > 1 \\ \text{Jeżeli: } P_C < 0, \text{ to } P_C = 0 \\ \text{Szukaj: } \min(RSS_{3,j}) \end{cases} \quad (32)$$

Dodatkowy warunek (32) został zaimplementowany, gdyż ze względu na kształt funkcji, przy niektórych wartościach temperatury i czasu wygrzewania P_C osiągało wartości ujemne. Sytuacja taka nie może mieć miejsca, gdyż niezależnie od rodzaju chłodzenia (obszar [C]) – nie może ono powodować zmniejszenia współczynnika $H_{af,3}$.

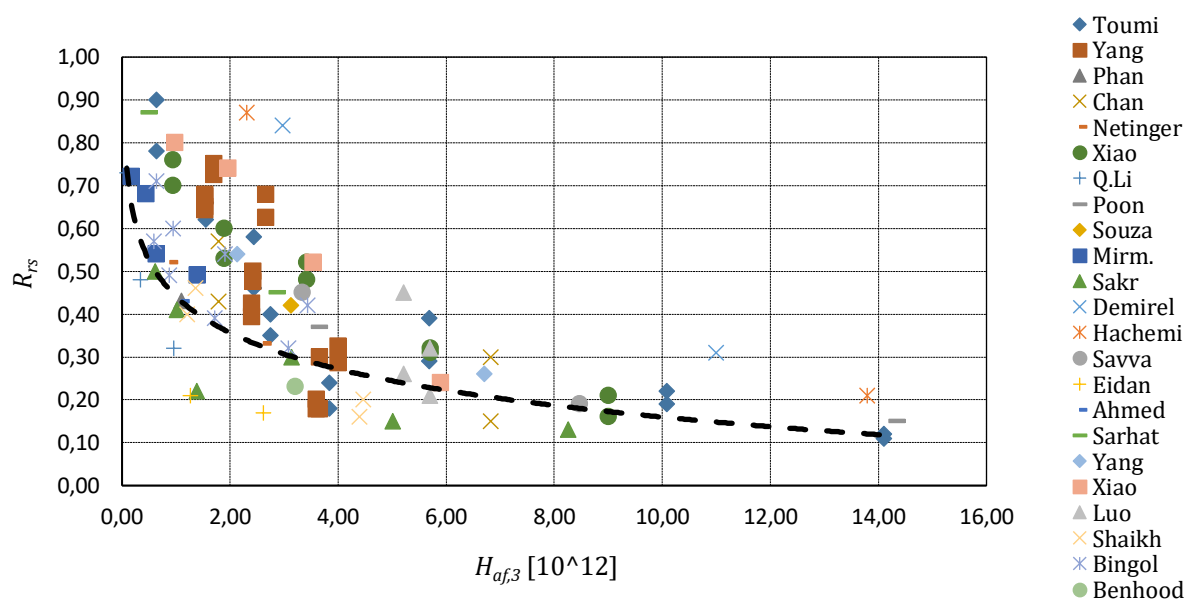
Zgodnie z algorytmem działania postępowanie to przeprowadzono dla obu metod (funkcja logarytmiczna i wykładnicza). Wyniki przedstawiono w tab. 36, tab. 37 i na wykresach (rys. 66, rys. 67).

Tab. 36. Współczynnik korelacji współczynników $H_{af,3,l}$ oraz $H_{af,3,e}$ i względnej wytrzymałości resztkowej

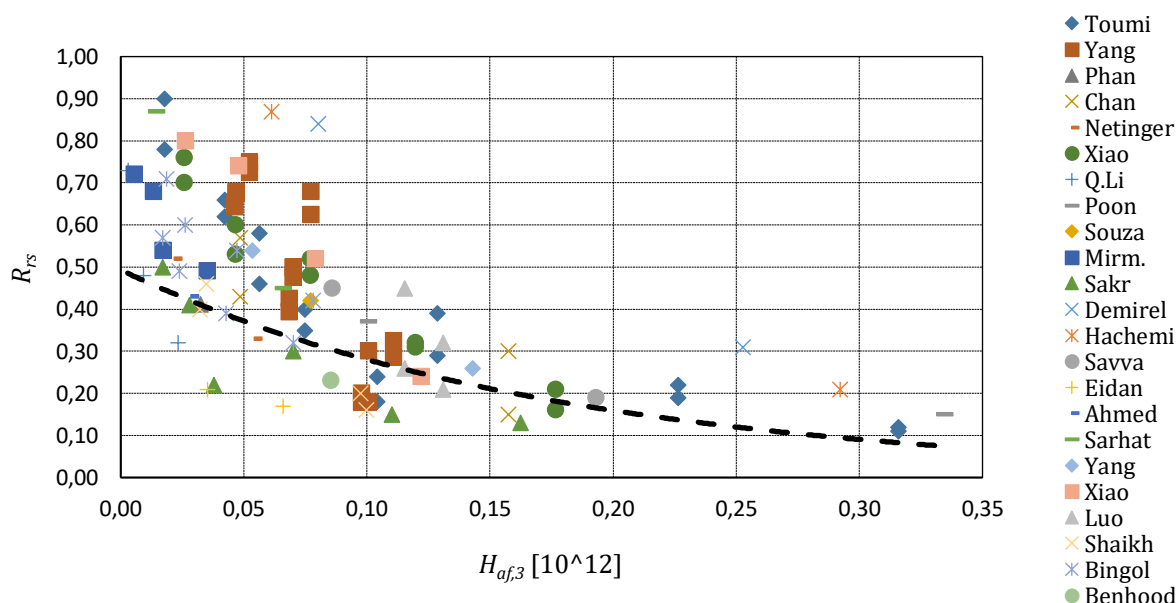
Współczynnik korelacji Pearsona	
Szacowanie funkcją logarytmiczną (l)	-0,655
Szacowanie funkcją wykładniczą (e)	-0,653

Tab. 37. Wartości współczynników $A_{i,j}$, $B_{i,j}$, $\alpha_{i,j}$, $\beta_{i,j}$ oraz $RSS_{j,i}$ dla funkcji szacującej wytrzymałość resztkową na bazie współczynnika $H_{af,2}$: logarytmiczna (l) i wykładnicza (e)

Współczynniki	Funkcja logarytmiczna	Współczynniki	Funkcja wykładnicza
$A_{3,l}$	-0,1223	$A_{3,e}$	0,4933
$B_{3,l}$	0,4413	$B_{3,e}$	-5,6551
$\alpha_{3,l}$	3,70	$\alpha_{3,e}$	3,12
$\beta_{3,l}$	3,83	$\beta_{3,e}$	4,41
$RSS_{3,l}$	13,137	$RSS_{3,e}$	14,556



Rys. 66. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika $H_{af,3,l}$ – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (logarytmiczna, $c_3 = 10^{12}$)



Rys. 67. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnik $H_{af,3}$, e – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (wykładnicza)

Trzeci krok iteracji przyniósł, w opinii autora, satysfakcjonujące wyniki. Zarówno korelacja, jak i błąd RSS są najlepsze spośród dotychczasowych modyfikacji. Również przedstawienie wyników na wykresach jest zdecydowanie mniej rozporoszone i trend jest klarownie widoczny, a funkcja szacująca poprawnie go oddaje. Udało się zniwelować wpływ długotrwałego wygrzewania w niższej temperaturze. Model także poprawnie oddaje istotność początkowego okresu wygrzewania i temperatury maksymalnej. Kolejny raz to funkcja logarytmiczna daje lepsze wyniki szacowania.

W tab. 38 przedstawiono podsumowanie wyników uzyskanych w poszczególnych modyfikacjach dla logarytmicznej funkcji szacowania. Trzeci krok iteracyjny wyróżnia się zdecydowanie niższym RSS (o około 20%), dodatkowo współczynnik korelacji Pearsona wskazuje na silniejszą zależność. Biorąc pod uwagę różnorodność danych wejściowych, gdzie pomimo podobieństw każdy z eksperymentów charakteryzował trochę innym przebiegiem, wynik osiągnięty w trzeciej modyfikacji uznany został za satysfakcjonujący.

Tab. 38. Porównanie wartości RSS i współczynnika Pearsona dla różnych iteracji obliczania H_{af}

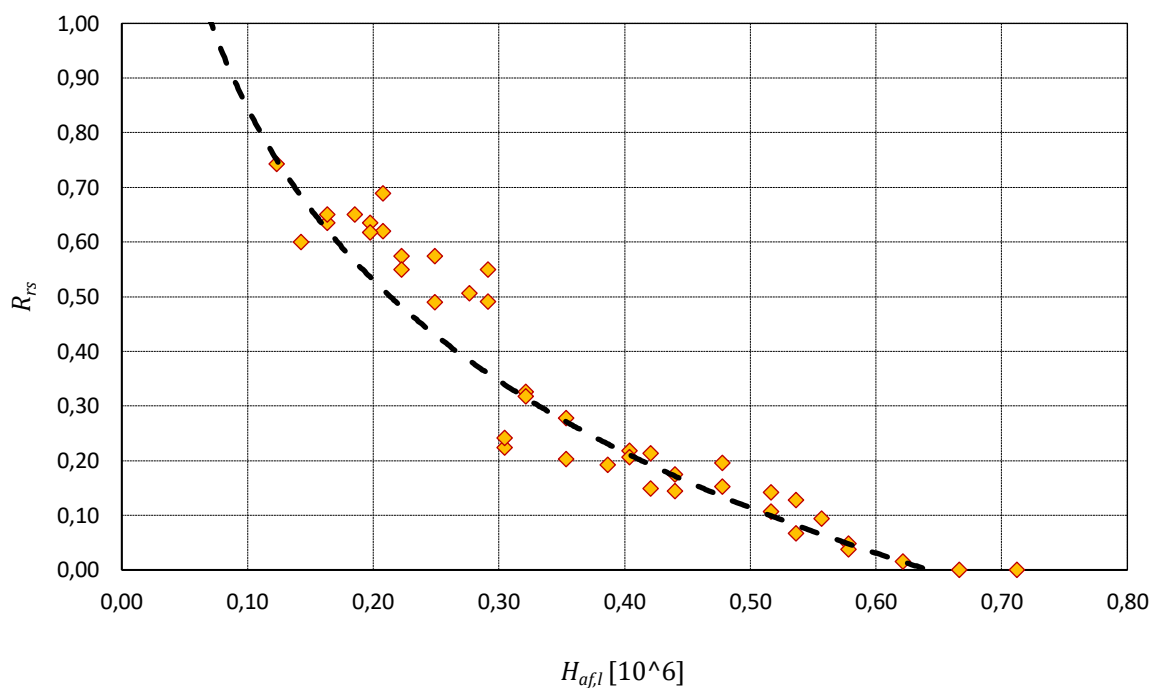
Model (modyfikacja)	RSS	Współczynnik Pearsona
$H_{af,0} (H_{400r})$	17,780	-0,589
$H_{af,1}$	15,349	-0,584
$H_{af,2}$	17,385	-0,475
$H_{af,3}$	13,137	-0,655

4.8 FUNKCJA SZACUJĄCA WYTRZYMAŁOŚĆ RESZTKOWĄ

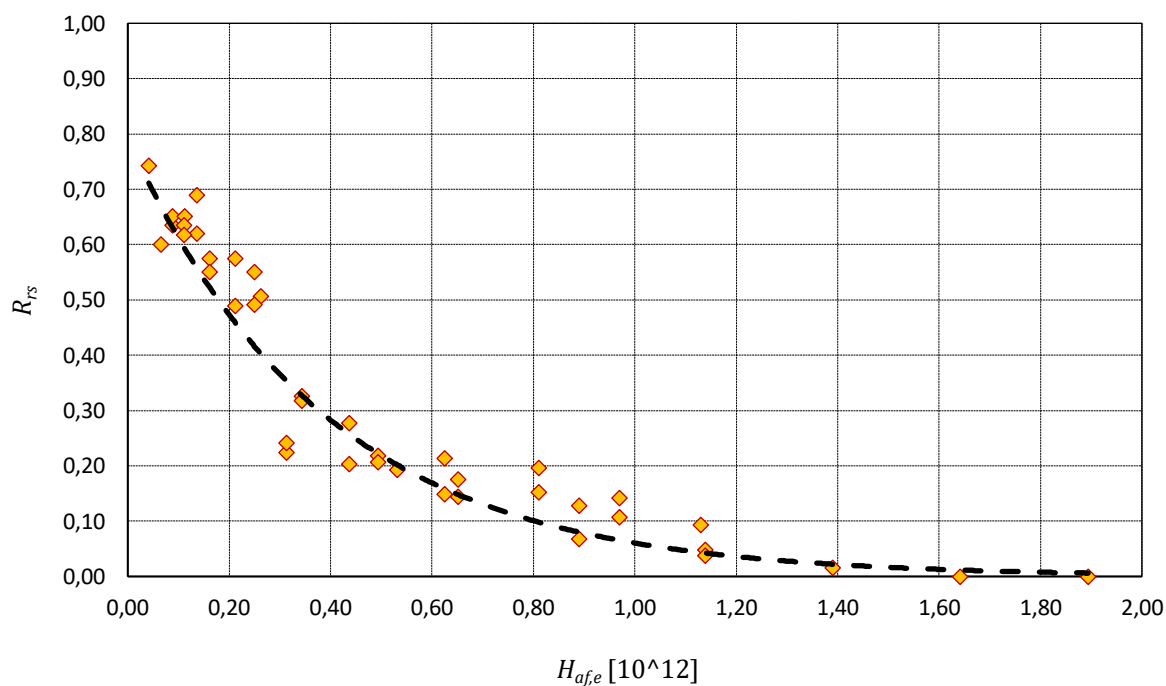
Na podstawie wyników otrzymanych w badaniach zasadniczych i podejścia opracowanego w rozdziale 4.7.6 sparametryzowana zostanie funkcja szacująca wytrzymałość resztkową betonu po 28 dniach rehydratacji. Jako punkt wyjścia przyjęto funkcje opisane wzorami (3) i (4). Poprawność dopasowania określono ponownie na podstawie RRS wg (5). Korzystając ze wzorów (27),(28),(29),(30) i (31) obliczano wartość współczynnika $H_{af,3}$ zwanego dalej współczynnikiem H_{af} . Powielając postępowanie z rozdziału 4.7.6 przy pomocy narzędzia analizy warunkowej poszukiwano optymalnego rozwiązania dla zagadnienia opisanego warunkami:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Zmieniaj: } A_j, B_j, \alpha_j, \beta_j \\ \alpha_j > 1 \\ \text{Jeżeli: } P_c < 0, \text{ to } P_c = 0 \\ \text{Szukaj: } \min (RSS_j) \end{array} \right. \quad (33)$$

Różnica pomiędzy (32), a (33) polegała na pominięciu parametru i , gdyż modyfikacja trzecia przyjęta została jako ostateczna. Algorytm szukania dopasowania został wdrożony dla obu funkcji szacujących (logarytmicznej i wykładniczej). Wyniki w formie graficznej zostały przedstawione na rys. 68, rys. 69, a wartości współczynników w funkcji podano w tab. 39, tab. 40. Wyniki obu typów funkcji dają bardzo dobry poziom dopasowania, funkcja logarytmiczna po raz kolejny okazała się nieznacznie dokładniejsza niż wykładnicza. Jednak jej kształt jest zbliżony do funkcji liniowej (co zresztą potwierdza współczynnik korelacji Pearsona, równy prawie -1,0). Obie funkcje szacowania zostaną porównane uwzględniając więcej niż tylko parametr RSS. Zacząć jednak należy od porównania osiągniętych wyników z analizą wykonaną w rozdziale 4.7.6. Jednak aby to zrobić, należy wprowadzić inny parametr sprawdzający błąd oszacowania.



Rys. 68. Względna wytrzymałość reszkowa jako funkcja współczynnika $H_{af,l}$ – badania właściwe, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość reszkową (logarytmiczna, $c_3 = 10^{12}$)



Rys. 69. Względna wytrzymałość reszkowa jako funkcja współczynnika $H_{af,e}$ – badania właściwe, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość reszkową (wykładnicza)

Tab. 39. Wartości współczynników $A_j, B_j, \alpha_j, \beta_j$ oraz RSS_j dla funkcji szacujących względną wytrzymałość resztkową na bazie współczynnika $H_{af,j}$: logarytmiczna (l) i wykładnicza (e)

Współczynniki	Funkcja logarytmiczna	Współczynniki	Funkcja wykładnicza
A_l	-0,4546	A_e	0,791
B_l	-6,481	B_e	-2,573
α_l	1,12	α_e	3,42
β_l	5,68	β_e	1,79
RSS_l	1,807	RSS_e	2,477

Tab. 40. Współczynnik korelacji współczynników $H_{af,l}$ oraz $H_{af,e}$ i względnej wytrzymałości resztkowej

Współczynnik korelacji Pearsona	
Szacowanie funkcją logarytmiczną (l)	-0,940
Szacowanie funkcją wykładniczą (e)	-0,865

RSS jest wartością bezwzględną sumującą wszystkie błędy oszacowania, więc aby porównać szacowania bazujące na innej liczbie próbek (przegląd literatury bazował na 101 wynikach, a badania właściwe na 41) trzeba błąd taki przeliczyć na jedną próbkę – czemu służy błąd $PS - RSS$ opisany za pomocą równania:

$$PS - RSS_{i,j} = \frac{RSS_{i,j}}{N} \quad (34)$$

gdzie:

N – liczba wyników w procedurze szacowania

W tab. 41 widoczna jest znaczna poprawa dopasowania uzyskanego poprzez opracowanie wyniku badań właściwych w porównaniu do badań z przeglądu literatury – około trzykrotnie mniejszy błąd $PS - RSS_{i,j}$.

Tab. 41. Porównanie błędów $PS - RSS_{i,j}$ dla różnych modyfikacji funkcji szacujących

Współczynniki	Funkcja logarytmiczna	Współczynniki	Funkcja wykładnicza
$PS - RSS_{0,l}$	0,176	$PS - RSS_{0,e}$	0,203
$PS - RSS_{1,l}$	0,152	$PS - RSS_{1,e}$	0,179
$PS - RSS_{2,l}$	0,172	$PS - RSS_{2,e}$	0,199
$PS - RSS_{3,l}$	0,130	$PS - RSS_{3,e}$	0,144
$PS - RSS_l$	0,044	$PS - RSS_e$	0,060

Efekt ten jest spowodowany spójnością metody badania. W przypadku badań przytoczonych w przeglądzie literatury mamy do czynienia z wieloma niezależnymi eksperymentami, co powoduje, że funkcje szacowania oparte na zbiorczej bazie wyników obarczone są błędem wynikającym z różnicy w warunkach eksperymentów. Warunki i

wyniki badań własnych były powtarzalne. W związku z tym, do finalnego sparametryzowania funkcji oszacowującej wytrzymałość resztkową betonu wykorzystano jedynie wyniki uzyskane przez autora w badaniach właściwych.

Wyniki przedstawione w tab. 39, tab. 40 wskazują na nieznacznie lepsze dopasowanie funkcji poprzez użycie modelu logarytmicznego – co potwierdza spostrzeżenia z rozdziałów 4.7.3, 4.7.4, 4.7.5 i 4.7.6. Obserwując jednak graficzną reprezentację wyników (rys. 68, rys. 69) model logarytmiczny jest opisem mniej odpowiadającym intuicyjnemu oddaniu fenomenu wytrzymałości resztkowej. Występują tu dwa zasadnicze problemy: pierwszym jest wytrzymałość resztkowa oszacowana dla bardzo wysokiej wartości współczynnika zakumulowanego ciepła, a drugim jest zachowanie funkcji szacującej w przypadku niskiego H_{af}, l .

Już dla $H_{af}, l \approx 0,65 \cdot 10^6$ wartość R_{rs} szacowana jest na 0, co samo w sobie nie jest wynikiem niedającym się wytłumaczyć, ale trend funkcji zbliżającej się szybko do 0 wydaje się nie opisywać dobrze natury zachodzących zmian. Funkcja w okolicach miejsca zerowego jest dalej szybko malejąca ($\frac{dR_{ars}}{dH_{af}, l} \ll 0$).

W przypadku drugiego problemu intuicyjną interpretacją $H_{af}, l = 0$ jest niewygrzany beton, a za czym idzie $R_{rs} = 1,0$. W przypadku funkcji logarytmicznej wartość oszacowana będzie większa, powodując teoretyczne zwiększenie wytrzymałości dla niektórych temperatur i czasów wygrzewania (co w niewielkim stopniu znajduje potwierdzenie w badaniach). Jest to jednak podejście niebezpieczne w inżynierskim zastosowaniu – nie powinno uwzględniać się zwiększenia wytrzymałości materiału, szczególnie poprzez ekspozycje na wysoką temperaturę, która ze względu na swoją naturę jest trudna do definitywnego i jednoznacznego opisanie. Problem ten można oczywiście w łatwy sposób rozwiązać dodając warunek :

$$\text{Jeżeli } R_{rs} > 1 \text{ to } R_{rs} = 1,0 \quad (35)$$

lecz nie zmienia to faktu mało naturalnego opisu zjawiska.

Metoda bazująca na funkcji wykładniczej radzi sobie z tymi problemami znacznie lepiej. Dla bardzo dużych wartości H_{af}, e wytrzymałość resztkowa zbliża się do 0:

$$\lim_{H_{af}, e \rightarrow \infty} R_{ars}(H_{af}, e) = 0 \quad (36)$$

co przy analitycznym rozwiązaniu problemu wydaje się naturalne. W przypadku drugiego problemu (przy bardzo małej wartości współczynnika zakumulowanego ciepła) da się w bardzo łatwy sposób określić wartość funkcji w tym miejscu :

$$R_{ars}(H_{af}, e = 0) = A_e \quad (37)$$

gdzie:

A_e – wartość funkcji aproksymacji dla współczynnika zakumulowanego ciepła równego 0

Dla najlepszego pod względem wartości $PS - RSS_e$ dopasowania wartość $R_{ars}(H_{af}, e = 0) = 0,791$, co jest wynikiem bliskim intuicyjnej interpretacji $R_{ars}(0) = 1,0$. Dodatkowo rozwiązanie, doprowadzające nas do naturalnego rozwiązania jest bardzo proste, wystarczy przyjąć współczynnik $A_e = 1,0$. Niezaprzeczalną zaletą w przypadku praktycznego wykorzystania funkcji wykładniczej jest brak konieczności wprowadzania warunków jak (35), funkcja taka w całej swojej dziedzinie daje adekwatny i sensowny wynik ($D: H_{af}, e \in 0 \text{ do } \infty$).

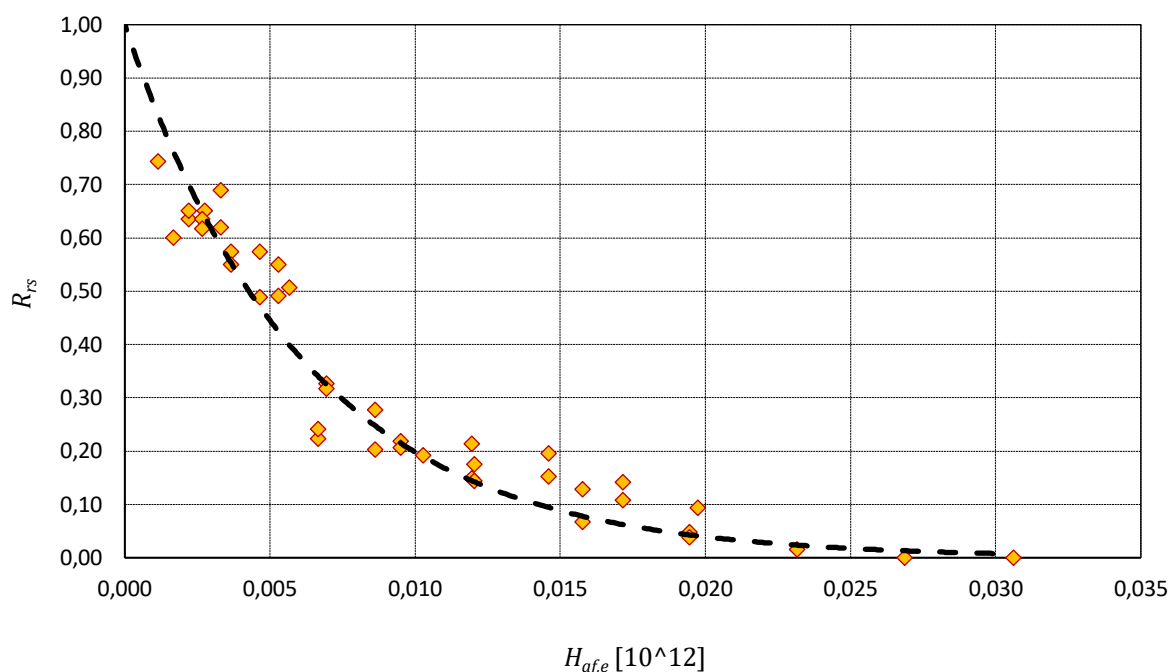
Bazując na powyższych spostrzeżeniach można wyprowadzić ostateczną postać funkcji szacującej wytrzymałość resztkową betonu. Punktem wyjścia będzie funkcja wykładnicza. Dodatkowo, aby lepiej wpisać się w naturalną interpretację zjawiska przyjęto warunek $R_{ars}(0) = 1,0$. Ponownie korzystając ze wzorów (27), (28), (29), (30) i (31) obliczano wartość współczynnika H_{af}, e . Następnie przy pomocy narzędzia analizy warunkowej poszukiwano optymalnego rozwiązania dla zagadnienia opisanego warunkami :

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{ars}(H_{af}, e = 0) = 1,0 \rightarrow A_e = 1,0 \\ \text{Zmieniaj: } B_e, \alpha_e, \beta_e \\ \alpha_e > 1 \\ \text{Jeżeli: } P_C < 0, \text{ to } P_C = 0 \\ \text{Szukaj: } \min(RSS_e) \end{array} \right. \quad (38)$$

Wyniki tego podejścia zostały przedstawione w tab. 42. Uzyskano jedynie nieznacznie wyższą wartość RRS niż w przypadku, gdy parametrem zmienianym było również A_e , co potwierdza słuszność podejścia. Również graficzna reprezentacja (rys. 70) spełnia wcześniej założone kryteria, potwierdzając poprawność tej funkcji szacowania wytrzymałości.

Tab. 42. Wartości współczynników $A_e, B_e, \alpha_e, \beta_e$ oraz RSS_e dla funkcji szacującej wytrzymałość resztkową na bazie współczynnika H_{af}, e . Współczynnik korelacji Pearsona H_{af}, e i względnej wytrzymałości resztkowej

Współczynniki	Funkcja wykładnicza
A_e	1,0
B_e	-161,91
α_e	2,79
β_e	2,02
RSS_e	2,617
$PS - RSS_e$	0,064
Współczynnik korelacji Pearsona	-0,887



Rys. 70. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika $H_{af,e}$ – badania właściwe, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (wykładnicza)

Obliczając średni błąd względny według wzoru (39) dla wszystkich wyników aproksymacji wytrzymałości próbek z badań własnych, otrzymujemy wynik na poziomie $|\delta_{ars}| = 18,9\%$.

$$|\delta_{ars}| = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{|R_{ars,n} - R_{rs,n}|}{R_{rs,n}} \quad (39)$$

gdzie:

n – numer próbki

Biorąc pod uwagę wszystkie założenia i wyniki można podsumować poszukiwania przedstawiając funkcję szacującą **wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie po 28 dniach rehydracji** w następujący sposób (40):

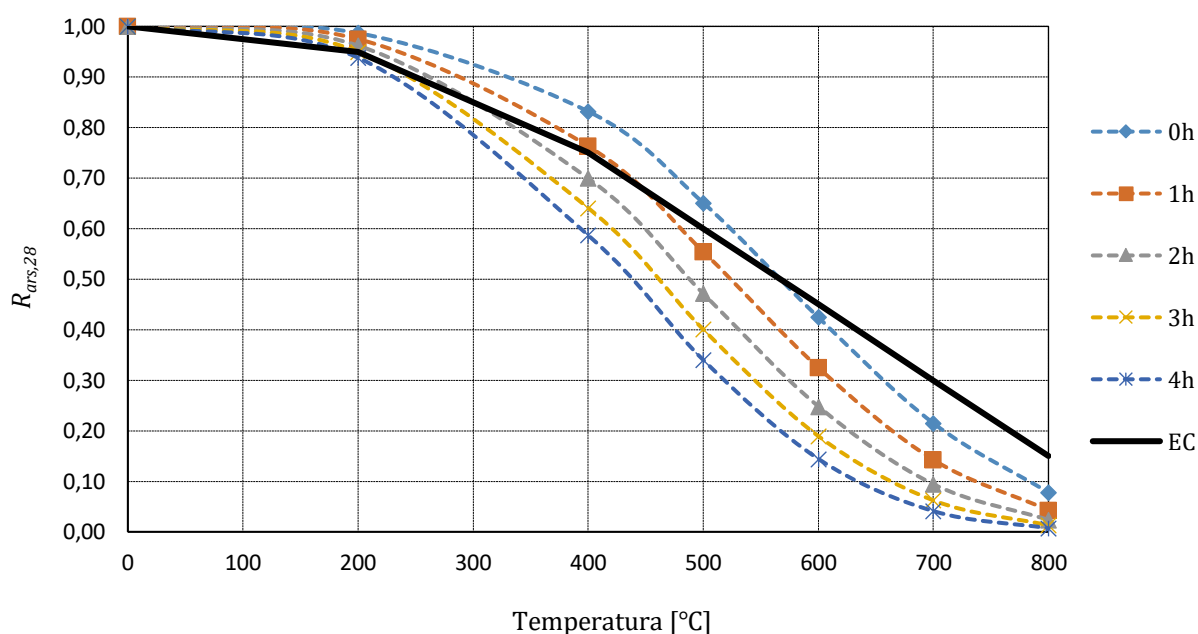
$$R_{ars,28}(H_{af}) = e^{-161,91 \cdot H_{af}} \quad (40)$$

$$H_{af} = \int T^{2,79} \cdot \left(1 - \frac{2,02 \cdot t}{t_3}\right) dt \quad (41)$$

Obliczanie współczynnika zakumulowanego ciepła wg (41) musi odbywać się przy zachowaniu metody z rozdziału 4.7.6.

4.8.1 Porównanie sparametryzowanej funkcji wytrzymałości resztkowej z wytrzymałością w wysokiej temperaturze

Nie istnieją żadne formalne przepisy podające sposób szacowania wytrzymałości resztkowej betonu na ściskanie. Najbliższe zagadnienia są normy, np. [21], które odnoszą się do wytrzymałości betonu w wysokiej temperaturze. W [31] proponuje się zastosowanie współczynnika $k_c(\theta)$, który określa jaką część wytrzymałości pierwotnej beton jest w stanie zachować w temperaturze (θ) . Jest to podejście bliźniacze do wyznaczania względnej wytrzymałości resztkowej, dzięki czemu można je porównać w sposób bezpośredni. Zestawione zostały wyniki szacowania względnej wytrzymałości betonu przy użyciu wzoru z rozdziału 4.8 i wytrzymałości resztkowej betonu dla betonu na kruszywie krzemianowym (rys. 71).



Rys. 71. Względna wytrzymałość resztkowa $R_{ars,28}$ dla różnych czasów wygrzewania jako funkcja temperatury, linia EC – Względna wytrzymałość betonu na kruszywie krzemianowym w wysokiej temperaturze wg [21]

Analizując wyniki, zauważalne jest, że generalny trend wszystkich funkcji jest zgodny. Do około 300°C-400°C spadek wytrzymałości nie jest tak duży, dopiero w zakresie 400°C-800°C zauważalny jest drastyczny spadek wytrzymałości. Różnica tkwi jednak w wartościach, funkcja zaproponowana przez [21] charakteryzuje się wartościami zbliżonymi do funkcji $R_{ars,28}$ dla zakresu do 400°C (różnice są większe dla dłuższych czasów nagrzewania). Dla zakresu temperatur większych od 500°C widoczne są jednak znaczne różnice pomiędzy wytrzymałością w wysokiej temperaturze, a wytrzymałością resztkową. Jest to prawdopodobnie spowodowane większymi zniszczeniami betonu w trakcie długotrwałego wygrzewania w temperaturze maksymalnej niedostatecznie

kompensowanymi przez rehydratację betonu. Tłumaczyłoby to obserwację, że w niższym zakresie temperatur, gdzie zniszczenia betonu są mniejsze i bardziej odwracalne za sprawą rehydratacji, wytrzymałość resztkowa jest podobna, a czasami większa niż wytrzymałości w wysokiej temperaturze. Inaczej sprawa ma się w wyższym zakresie temperatur, gdzie bardzo rozległe zniszczenia zmniejszają potencjał betonu do odzyskania wytrzymałości poprzez rehydratację, jednocześnie w trakcie długotrwałego wygrzewania i powolnego chłodzenia powstaje więcej uszkodzeń. Wszystko to składa się na wyższą wytrzymałość betonu w wysokiej temperaturze niż wytrzymałość resztkowa.

5 SYMULACJA WYTRZYMAŁOŚCI RESZTKOWEJ PRZY POMOCY SIECI NEURONOWYCH

Przegląd aktualnego stanu wiedzy wykonany w niniejszej pracy daje możliwość wyznaczenia czynników istotnych, niejednoznacznych i nieistotnych. Dzięki temu możliwe jest stworzenie potencjalnie dokładniejszego algorytmu, jako alternatywnej do przedstawionej w rozdziale 4.8 metody szacowania wytrzymałości resztkowej na podstawie współczynnika zakumulowanego ciepła.

5.1 MODEL WYTRZYMAŁOŚCI RESZTKOWEJ WYKORZYSTUJĄCY SIECI NEURONOWE

Sieci neuronowe dają możliwości zastosowania regresji do obróbki danych. Obecnie istniejące oprogramowanie daje ogromne możliwości przy tworzeniu i późniejszym wykorzystywaniu zaawansowanych sieci neuronowych. Na potrzeby poniższej analizy użyty został program Statistica i jego rozszerzenie Statistica Automatyczne Sieci Neuronowe (SANN). Na podstawie rozdziału 2.2 jako czynniki istotne (dane wejściowe) do analizy przyjęte zostały temperatura maksymalna i czas wygrzewania. Danymi wejściowymi były warunki badań zasadniczych, a jedyną daną wyjściową była względna wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie.

Do tworzenia i odnalezienia optymalnej sieci neuronowej użyty został wbudowany w program kreator sieci. Wybrane zostały następujące warunki:

- Typ analizy: regresja
- Wybór podzbiorów: uczący 80%, testowy 10%, walidujący 10% danych
- Typ sieci: perceptron wielowarstwowy (MLP)
- Algorytm uczenia: BFGS
- Warstwy ukryte: od 3 do 9

Tak skonfigurowane warunki zostały wykorzystane przy uczeniu 200 sieci neuronowych. Spośród nich automatycznie wybrane zostało 5 określone przez program jako najlepsze

(tab. 43) na podstawie warunku funkcji błędu SOS (sumy kwadratów). Dla 5 wskazanych funkcji przeprowadzona została dodatkowa weryfikacja przy użyciu wzorów (42) i (43):

$$RSS_{SANN,j} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{Rrs_n - Rars_i(SANN_j)}{Rrs_n} \right)^2 \quad (42)$$

$$PS - RSS_{SANN,j} = \frac{RSS_{SANN,j}}{N} \quad (43)$$

gdzie:

N – liczba wyników w procedurze szacowania

Dzięki temu możliwe było zarówno wyłonienie najlepszej sieci neuronowej dla danej aplikacji, jak i porównanie jej z metodą zaproponowaną w rozdziale 4.8.

Tab. 43. Nazwy sieci neuronowych wraz z rodzajami funkcji aktywacji

Nazwa sieci	Aktywacja (warstwa ukryta)	Aktywacja (warstwa wyjściowa)
MLP 2 – 7 – 1	Logistyczna	Wykładnicza
MLP 2 – 8 – 1	Wykładnicza	Tangens hiperboliczny
MLP 2 – 7 – 1'	Logistyczna	Tangens hiperboliczny
MLP 2 – 3 – 1	Logistyczna	Liniowa
MLP 2 – 3 – 1'	Tangens hiperboliczny	Liniowa

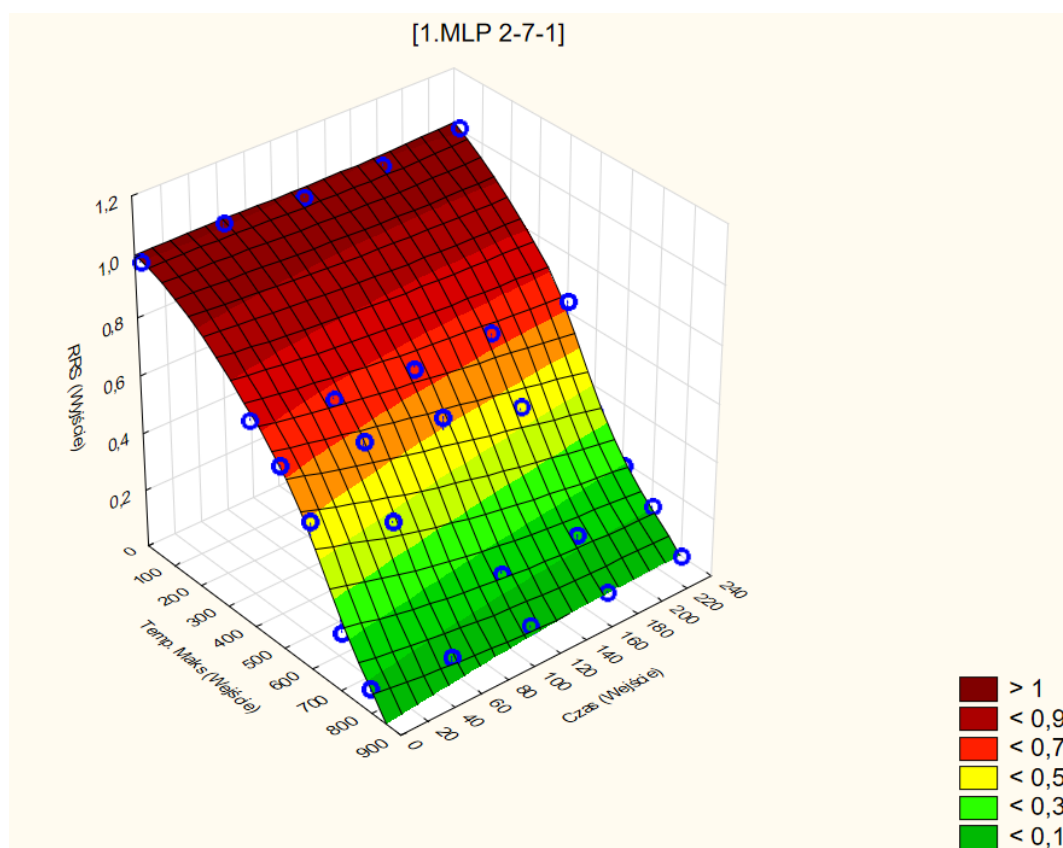
Najlepszą okazała się sieć MLP 2-7-1, posiadająca dwie dane wejściowe, siedem warstw ukrytych i jedną daną wyjściową. Na rys. 72 i rys. 73 widoczny jest wykres względnej wytrzymałości resztkowej oszacowanej przez sieć neuronową jako funkcja maksymalnej temperatury i czasu wygrzewania. Widoczny jest zdecydowanie najistotniejszy wpływ temperatury maksymalnej i mniejszy czasu wygrzewania, co jest zbieżne z wnioskami przeglądu literatury i wynikami badań zasadniczych. Na rys. 74 zamieszczono kod w języku PMML, umożliwiający użycie wspomnianej sieci neuronowej.

Porównując wyniki osiągane przez sieci neuronowe i podejście z użyciem współczynnika akumulacji ciepła (H_{af}) można dojść do wniosku, że obie metody charakteryzują się zbliżoną dokładnością. Wyniki zamieszczone w tab. 44 dają dodatkowe potwierdzenie poprawności rozwiązania przedstawionego w rozdziale 4.8. Sieci neuronowe, bazując na takim samym zbiorze danych wejściowych osiągają bardzo zbliżone funkcje szacowania. Wyjątkowo dokładna wydaje się sieć MLP 2-7-1. RSS na poziomie 1,445 to wynik mniejszy o około 20% od najlepszej funkcji dopasowania H_{af}, l .

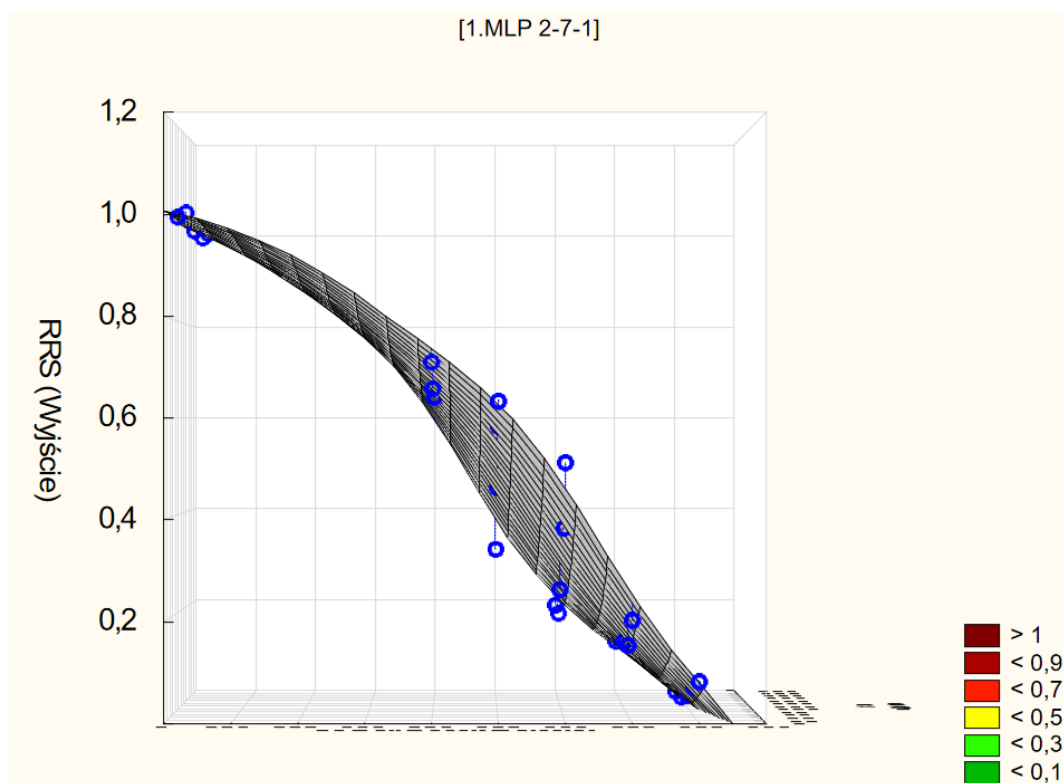
Tab. 44. Porównanie współczynników RSS i $PS - RSS_j$ dla różnych funkcji szacujących, zarówno sieci neuronowych, jak i podejścia tradycyjnego

Funkcja szacująca	RSS	$PS-RSS$
$MLP\ 2 - 7 - 1$	1,445	0,036
H_{af}, l (rozdział 4.7.6)	1,807	0,044
H_{af} (rozdział 4.8)	2,617	0,064
$MLP\ 2 - 3 - 1$	2,745	0,069
$MLP\ 2 - 3 - 1'$	4,678	0,117
$MLP\ 2 - 7 - 1'$	4,934	0,123
$MLP\ 2 - 8 - 1$	5,972	0,149

Niemniej funkcja szacowania oparta o sieć neuronową, pomimo świetnej dokładności, cechuje się pewnymi problemami. Pierwszym jest na pewno brak bezpośredniego i łatwego wglądu w sposób szacowania wytrzymałości. Jedynie po wgłębieniu się w funkcje aktywacji warstw ukrytych sieci można w pewien sposób prześledzić ścieżkę regresji danych. Ogranicza to kontrolę i uniemożliwia wprowadzanie poprawek wynikających z chęci lepszego dopasowania do naturalnie zachodzących zjawisk. Drugim ograniczeniem są komplikacje obliczeniowe, metoda oparta o współczynnik akumulacji ciepła jest szeregiem elementarnych obliczeń algebraicznych, skutkujących oszacowaniem względnej wytrzymałości resztkowej. W przypadku SN, niezbędne jest zaimplementowanie kodu do programu i wykonanie obliczeń wszystkich warstw. Co znacząco zwiększa ilość obliczeń niezbędną do wykonania przez program.



Rys. 72. Względna wytrzymałość resztkowa betonu (RRS) jako funkcja temperatury maksymalnej i czasu wygrzewania



Rys. 73. Względna wytrzymałość resztkowa betonu (RRS) jako funkcja temperatury maksymalnej i czasu wygrzewania - widok z perspektywy osi X (temperatury wygrzewania)

```
<PMML version="3.0">

<Header copyright="Copyright 1984-2017 TIBCO Software Inc. All rights reserved.">
  <Application name="STATISTICA Automated Neural Networks (SANN)" version="2.0"/>
</Header>
<DataDictionary numberOfFields="3">
  <DataField name="RRS" optype="continuous"/>
  <DataField name="Temp. Maks" optype="continuous"/>
  <DataField name="Czas" optype="continuous"/>
</DataDictionary>
<NeuralNetwork modelName="_MLP 2-7-1" functionName="regression">
  <MiningSchema>
    <MiningField name="RRS" usageType="predicted"/>
    <MiningField name="Temp. Maks" lowValue="20.000000" highValue="800.000000"/>
    <MiningField name="Czas" lowValue="0.000000" highValue="240.000000"/>
  </MiningSchema>
  <NeuralInputs numberOfInputs="2">
    <NeuralInput id="0">
      <DerivedField>
        <NormContinuous field="Temp. Maks" shift="-2.56410256410256e-002" scale="1.28205128205128e-003">
          <LinearNorm orig="2.00000000000000e+001" norm="0.000000"/>
          <LinearNorm orig="8.00000000000000e+002" norm="1.000000"/>
        </NormContinuous>
      </DerivedField>
    </NeuralInput>
    <NeuralInput id="1">
      <DerivedField>
        <NormContinuous field="Czas" shift="-0.00000000000000e+000" scale="4.1666666666667e-003">
          <LinearNorm orig="0.00000000000000e+000" norm="0.000000"/>
          <LinearNorm orig="2.40000000000000e+002" norm="1.000000"/>
        </NormContinuous>
      </DerivedField>
    </NeuralInput>
  </NeuralInputs>
  <NeuralLayer numberOfNeurons="7" activationFunction="logistic">
    <Neuron id="2" bias="-1.16509447299943e+001">
      <Con from="0" weight="1.16568934715248e+001"/>
      <Con from="1" weight="3.03049455628945e+000"/>
    </Neuron>
    <Neuron id="3" bias="-3.30266023024446e+000">
      <Con from="0" weight="-3.27284201407185e+000"/>
      <Con from="1" weight="-3.35163986676920e+000"/>
    </Neuron>
    <Neuron id="4" bias="-4.43220510884412e-001">
      <Con from="0" weight="2.02529632035269e+000"/>
      <Con from="1" weight="4.05853510882498e+000"/>
    </Neuron>
    <Neuron id="5" bias="4.95980322359789e+000">
      <Con from="0" weight="3.73781196377328e+000"/>
      <Con from="1" weight="7.1119548053717e+000"/>
    </Neuron>
    <Neuron id="6" bias="-1.82850317123348e+001">
      <Con from="0" weight="2.13535158317124e+001"/>
      <Con from="1" weight="5.09002876082631e+000"/>
    </Neuron>
    <Neuron id="7" bias="1.01506283271239e+000">
      <Con from="0" weight="4.93256091327506e-001"/>
      <Con from="1" weight="-7.46718043496614e-002"/>
    </Neuron>
    <Neuron id="8" bias="-2.17084049257878e+001">
      <Con from="0" weight="1.90091582396539e+001"/>
      <Con from="1" weight="2.84772634973221e+000"/>
    </Neuron>
  </NeuralLayer>
  <NeuralLayer numberOfNeurons="1" activationFunction="exponential">
    <Neuron id="9" bias="1.30936815904687e+001">
      <Con from="2" weight="1.79508276748589e+000"/>
      <Con from="3" weight="-1.04892016699709e+001"/>
      <Con from="4" weight="-7.67048018070381e-001"/>
      <Con from="5" weight="-5.58162831523298e+000"/>
      <Con from="6" weight="-1.98057119879432e+000"/>
      <Con from="7" weight="-9.37753312251167e+000"/>
      <Con from="8" weight="-1.08273160154122e+001"/>
    </Neuron>
  </NeuralLayer>
  <NeuralOutputs numberOfOutputs="1">
    <NeuralOutput outputNeuron="9">
      <DerivedField optype="continuous">
        <NormContinuous field="RRS" shift="-0.00000000000000e+000" scale="1.00000000000000e+000">
          <LinearNorm orig="0.00000000000000e+000" norm="0.00000000000000e+000"/>
          <LinearNorm orig="1.00000000000000e+000" norm="1.00000000000000e+000"/>
        </NormContinuous>
      </DerivedField>
    </NeuralOutput>
  </NeuralOutputs>
</NeuralNetwork>
</PMML>
```

Rys. 74. Kod modelu sieci neuronowej MLP 2-7-1 w języku PMML

6 WNIOSKI KOŃCOWE I PROPOZYCJE KIERUNKÓW DALSZYCH BADAŃ

6.1 PODSUMOWANIE

W przeglądzie istniejącego stanu wiedzy skupiono się na pracach poruszających temat czynników wpływających na wytrzymałość resztkową betonu. Przeprowadzono analizy porównawcze dla licznych badań laboratoryjnych, wyodrębniając wpływ poszczególnych czynników na podstawie współczynników korelacji. Dokonano również przeglądu metod eksperymentalnych szacowania wytrzymałości resztkowej proponowanych w literaturze.

Po przeprowadzeniu krytycznej analizy stanu wiedzy oraz badań wstępnych stwierdzono, że skład betonu nie ma istotnego wpływu na względną resztkową wytrzymałość betonu. Ponadto za czynniki nieistotne uznano tempo nagrzewania, tempo i rodzaj ochładzania, wiek betonu w czasie ekspozycji oraz porowatość betonu. Jednakże prace badawcze potwierdzają niezaprzeczalny wpływ dwóch dodatkowych czynników: rehydratacji po ekspozycji i obciążenia betonu w jej czasie – ich wpływ nie był jednak badany w powyższej pracy.

Mając powyższe na uwadze, we właściwych badaniach własnych użyta została tylko jedna mieszanka betonowa i jedno tempo nagrzewania/chłodzenia. Skupiono całą uwagę badawczą na najbardziej istotnych czynnikach, którymi są temperatura maksymalna i czas wygrzewania. W rozpoznanych pracach pojawił się innowacyjny sposób analitycznego połączenia wpływu temperatury i czasu wygrzewania poprzez użycie współczynnika zakumulowanego ciepła. Zdaniem autora jest to metoda posiadająca wielki potencjał i to na niej oparta została funkcja szacowania wytrzymałości resztkowej.

Badania wstępne pozwoliły na potwierdzenie sprawności stanowiska badawczego. Właściwe badania materiałowe przeprowadzono dla szerokiego zakresu temperatur (od 400°C do 800°C) i czasów wygrzewania (od 0 do 4 godzin), co miało na celu uzyskanie zbioru danych, który umożliwi opracowanie skutecznych i uniwersalnych modeli obliczeniowych wytrzymałości resztkowej.

Opierając się na zbiorze wyników badań dostępnych w literaturze zaproponowano funkcje służące do obliczania współczynnika zakumulowanego ciepła i szacowania wytrzymałości resztkowej. Po analizach dopasowania do wyników tych badań, wybrano optymalny model analityczny zagadnienia. Wykorzystując własne badania właściwe przedstawiono metodę parametryzacji tego modelu. Dodatkowo zaprezentowano również możliwości przygotowania modelu wytrzymałości resztkowej z użyciem sieci neuronowych w oparciu o te same dane. Uzyskane wyniki z obu modeli są bardzo zbliżone.

6.2 WNIOSKI KOŃCOWE

Możliwość oszacowania wytrzymałości resztkowej betonu jest zagadnieniem bardzo istotnym ze względu na następstwa pożaru w obiektach budowlanych. Budynek, który przetrwa pożar i nie ulegnie zawaleniu należy ocenić pod kątem potencjalnej dalszej eksploatacji. Obecnie nie istnieje żadna potwierdzona i szerzej stosowana metoda analityczna umożliwiająca wyznaczenie wytrzymałości resztkowej betonu. W tego typu analizach konieczne jest opieranie się na badaniach niszczących lub nieniszczących. Stanowi to dużą niedogodność i dodatkowo nie zapewnia pełnego obrazu zniszczeń obiektu, a jedynie w miejscach, z których pobrano próbki lub wykonano badania. W związku z tym w niniejszej pracy podjęto próbę ustanowienia funkcji umożliwiającej analityczne szacowanie wytrzymałości resztkowej betonu na ściskanie oraz modelu tej wytrzymałości opartego o sztuczne sieci neuronowe.

Poniżej przedstawiono wnioski o charakterze ogólnym:

1. Na podstawie analizy statystycznej danych zebranych w czasie przeglądu literatury ustalono, że istotnymi czynnikami wpływającymi na względną wytrzymałość resztkową na ściskanie są: temperatura wygrzewania, czas wygrzewania, czas rehydratacji i obciążenie w czasie ekspozycji.
2. Spośród wskazanego w pkt. 1 zbioru najistotniejsza jest temperatura wygrzewania, drugim w kolejności czynnikiem jest czas wygrzewania. Fakt ten uwzględniono formułując własną wersję współczynnika zakumulowanego ciepła.
3. W oparciu o dostępne badania określono zakres temperatur wygrzewania kluczowy ze względów badawczych. Ekspozycja poniżej 300°C nie skutkuje znaczącymi nieodwracalnymi uszkodzeniami. Natomiast temperatura wygrzewania powyżej 800°C powoduje tak znaczący spadek wytrzymałości (o ponad 80%), że beton traci użyteczność konstrukcyjną.
4. Własna funkcja aproksymująca względną wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie oparta na współczynniku zakumulowanego ciepła skutkuje szacunkiem z błędem względnym na poziomie 18,9%.
5. Przy zastosowaniu tego samego zbioru danych do parametryzacji funkcji analitycznej wg modyfikacji 3 (równanie (25)) oraz modelu korzystającego z sieci neuronowych, wyniki szacowania wytrzymałości resztkowej betonu na ściskanie są bardzo zbliżone. Potwierdza to użyteczność obu modeli.

6. Nie zaleca się stosowania metody z PN-EN-1992-1-2 do szacowania wytrzymałości resztkowej, gdyż nie jest ona do tego przystosowana. Postępowanie takie prowadzi do przeszacowania wyników, szczególnie dla temperatur wygrzewania powyżej 600°C.

Szczegółowe wnioski zamieszczono na końcu każdego z odpowiednich rozdziałów.

6.3 KIERUNKI DALSZYCH BADAŃ

Biorąc pod uwagę analizę aktualnego stanu wiedzy uzupełnioną przez badania własne i analizy ich wyników można wskazać następujące kierunki dalszych badań w zakresie wytrzymałości resztkowej betonu:

1. Prace nad rozszerzeniem funkcji pozwalającej szacować względną wytrzymałość resztkową ($R_{ars,28}(H_{af})$) o wpływ rehydratacji i obciążenia w czasie ekspozycji wg zależności:

$$R_{ars}(H_{af}, t_{re}) = R_{ars,28}(H_{af}) \cdot g_{re}(t_{re}, H_{af}) \cdot \alpha_{EL} \quad (44)$$

Zaproponowana funkcja (44) uwzględnia pozytywny wpływ rehydratacji poprzez funkcję $g_{re}(t_{re}, H_{af})$. Istniejące badania wskazują, że będzie ona zależna od czasu rehydratacji (t_{re}) i współczynnika zakumulowanego ciepła (stopnia zniszczenia betonu). Wpływ obciążenia w czasie ekspozycji jest przedstawiony przy pomocy współczynnika α_{EL} . Bardzo mała liczba badań na ten temat uniemożliwia dokładne opisanie tej zależności. Można jednak przewidywać kilkunasto lub kilkudziesięcio procentowe zwiększenie wytrzymałości resztkowej w przypadku próbek obciążonych, co sugerowałoby, że $\alpha_{EL} \in \langle 1.0; 2.0 \rangle$.

2. Prace nad modelem betonu resztkowego, a w tym opracowanie zależności odkształcenie - naprężenie w zależności od stopnia zniszczenia betonu (H_{af}).
3. Prace nad analizą współpracy betonu resztkowego ze zbrojeniem.

SPIS RYSUNKÓW

Rys. 1. Względna wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie jako funkcja maksymalnej temperatury dla różnych czasów wygrzewania wg Toumi [22], Phan [24].....	12
Rys. 2. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja maksymalnej temperatury dla różnych czasów wygrzewania wg Yang [23]	12
Rys. 3. Względna wytrzymałość resztkowa dla różnych typów betonu: NSC i HSC jako funkcja maksymalnej temperatury wg Netinger [25], Hager [26], Krzemień [27], Xiao [28], Chan [29]	13
Rys. 4. Wzrost temperatury otoczenia jako funkcja czasu dla pożaru standardowego wg [1]	14
Rys. 5. Zakres wyników względnej wytrzymałości betonu jako funkcji maksymalnej temperatury, różni autorzy przywołani w tej części pracy	15
Rys. 6. Względna wytrzymałość resztkowa dla NSC i HSC i różnych temperatur maksymalnych: 300°C, 500°C, 700°C jako funkcja czasu wygrzewania wg Toumi [22]	16
Rys. 7. Względna wytrzymałość resztkowa różnych klas betonu: C20, C30, C35 oraz różnych temperatur maksymalnych: 400°C, 600°C jako funkcja czasu wygrzewania wg Pertiwi [34]	16
Rys. 8. Względna wytrzymałość resztkowa różnych typów betonu: w/c = 0,58, w/c = 0,68 i różnych temperatur maksymalnych: 400°C, 500°C, 550°C, 600°C jako funkcja czasu wygrzewania, na podstawie [23]	17
Rys. 9. Zakres wyników względnej wytrzymałości resztkowej betonu jako funkcji czasu wygrzewania, różne temperatury maksymalne, różni autorzy przywołani w tej części pracy	18
Rys. 10. Względna wytrzymałość resztkowa betonu zanurzonego w wodzie i później przechowywanego w powietrzu w porównaniu do wytrzymałości resztkowej betonu chłodzonego w powietrzu jako funkcja czasu zanurzenia dla różnych temperatur wygrzewania: 330°C, 430°C i 550°C, na podstawie [38].....	21
Rys. 11. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja czasu rehydratacji dla różnych temperatur wygrzewania $\theta=300^{\circ}\text{C}$, 450°C , 600°C i 750°C , i dla różnych typów chłodzenia (AC – chłodzenie w powietrzu, WC – chłodzenie w wodzie) wg Li [48]	25
Rys. 12. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja czasu rehydratacji dla różnych temperatur wygrzewania $\theta=600^{\circ}\text{C}$ i 800°C i dla różnych typów rehydratacji: MC – rehydratacja mieszana, WC – rehydratacja w wodzie wg Poon [58]	26
Rys. 13. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja czasu rehydratacji dla różnych temperatur wygrzewania $\theta=300^{\circ}\text{C}$ i 600°C , i dla różnych typów rehydratacji: WC – rehydratacja w wodzie, AC – rehydratacja powietrzna, PF – rehydratacja z folią blokującą wilgoć wg Souza [59].....	27
Rys. 14. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja czasu rehydratacji dla różnych temperatur wygrzewania $\theta=300^{\circ}\text{C}$, 450°C i 600°C wg Mirmomeni [61].....	28

Rys. 15. Zakres wyników względnej wytrzymałości resztkowej betonu jako funkcji czasu rehydratacji, różne temperatury maksymalne, różni autorzy przywołani w tej części pracy	29
Rys. 16. Względna porowatość jako funkcja czasu rehydratacji dla różnych warunków rehydratacji: air – rehydratacja powietrzna, water – rehydratacja w wodzie i dla różnych temperatur wygrzewania $\Theta=600^{\circ}\text{C}$ i 800°C wg Poon [58]	31
Rys. 17. Porowatość całkowita jako funkcja maksymalnej temperatury i rehydratacji wg Chroma [72]	33
Rys. 18. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja maksymalnej temperatury dla różnych kruszyw wg Hager [26]	35
Rys. 19. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja maksymalnej temperatury dla różnych kruszyw wg Netinger [25]	36
Rys. 20. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja czasu rehydratacji dla różnych kruszyw i różnych temperatur maksymalnych $\Theta=300^{\circ}\text{C}$ i 600°C wg Souza [59]	37
Rys. 21. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja maksymalnej temperatury dla różnych dodatków: FGP i SF wg Demirel [111]	41
Rys. 22. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja maksymalnej temperatury dla różnych dodatków: MFA, PFA i ME wg Savva [79]	42
Rys. 23. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja maksymalnej temperatury dla różnych poziomów zastąpienia cementu przez GGBFS: od 0% do 50% wg Li [113]	43
Rys. 24. Względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja maksymalnej temperatury dla próbek z i bez włókien PP, różni autorzy	45
Rys. 25. Różnica pomiędzy względną wytrzymałość resztkowa betonu z i bez włókien PP jako funkcja maksymalnej temperatury, różni autorzy	45
Rys. 26. Piec Naber 50	52
Rys. 27. Naber 50 – panel kontrolny	52
Rys. 28. Naber 50 – tabliczka znamionowa	53
Rys. 29. Termometr Center CE309	53
Rys. 30. Próbka w piecu	53
Rys. 31. Próbka i dystanse w piecu	53
Rys. 32. Zestaw próbek wytypowanych do badań wstępnych	55
Rys. 33. Temperatura próbki jako funkcja czasu – chłodzenie w zamkniętym piecu	56
Rys. 34. Temperatura próbki jako funkcja czasu – chłodzenie w powietrzu o temperaturze pokojowej	56
Rys. 35. Próbki po wygrzaniu	57
Rys. 36. Sprawdzenie wymiarów próbki za pomocą suwmiarki elektronicznej firmy VOREL	57
Rys. 37. Maszyna wytrzymałościowa infraTest ALPHA 2-3000 użyta w badaniach	58
Rys. 38. Plan badań wstępnych	59
Rys. 39. Typ zniszczenia – próbka 1A	59
Rys. 40. Typ zniszczenia – próbka 1D	59

Rys. 41. Plan badań zasadniczych.....	64
Rys. 42. Próbki 400.1.A, 400.2.A i 400.2.B przed wygrzewaniem.....	65
Rys. 43. Próbki 500.0.A, 500.0.B i 400.0.A przed wygrzewaniem.....	65
Rys. 44. Próbką 400.0.A w piecu.....	66
Rys. 45. Próbki 500.0.A i 500.0.B w piecu.....	66
Rys. 46. Wygrzana próbka 400.0.A przed zniszczeniem.....	66
Rys. 47. Wygrzana próbka 400.0.A po zniszczeniu.....	66
Rys. 48. Graficzne porównanie sposobów obliczania współczynnika zakumulowanego ciepła H400i H400r [143].....	69
Rys. 49. Względna wytrzymałość resztkowa i współczynnik H400 – NSC, różni autorzy.....	70
Rys. 50. Względna wytrzymałość resztkowa i współczynnik H400r – NSC, różni autorzy.....	70
Rys. 51. Względna wytrzymałość resztkowa i współczynnik H400 – HSC, różni autorzy.....	70
Rys. 52. Względna wytrzymałość resztkowa i współczynnik H400r – HSC, różni autorzy.....	70
Rys. 53. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika H400 - NSC [143].....	71
Rys. 54. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika H400r – NSC [143].....	71
Rys. 55. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika H400 – HSC [143].....	71
Rys. 56. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika H400r – HSC [143].....	71
Rys. 57. Schemat postępowania przy poszukiwaniu najdokładniejszej funkcji szacującej wytrzymałość resztkową na podstawie współczynnika zakumulowanego ciepła $Rars(Haf)$	75
Rys. 58. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika H400r – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (logarytmiczna, $c0 = 10^3$)	76
Rys. 59. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika H400r – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (wykładnicza).....	76
Rys. 60. Temperatura jako funkcja czasu wraz z podziałem na obszary dla obliczeń $Haf, 1$	78
Rys. 61. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika $Haf, 1, l$ – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (logarytmiczna, $c1 = 10^6$)	80
Rys. 62. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika $Haf, 1, e$ – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (wykładnicza).....	80
Rys. 63. Temperatura jako funkcja czasu wraz z podziałem na obszary dla obliczeń $Haf, 2$	82
Rys. 64. Względna wytrzymałość resztkowa i współczynnik $Haf, 2, l$ – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (logarytmiczna, $c2 = 10^{22}$). 83	
Rys. 65. Względna wytrzymałość resztkowa i współczynnik $Haf, 2, e$ – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (wykładnicza).....	84
Rys. 66. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika $Haf, 3, l$ – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (logarytmiczna, $c3 = 10^{12}$).....	86

Rys. 67. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnik $Haf, 3, e$ – różni autorzy, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (wykładnicza)	87
Rys. 68. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnik Haf, l – badania właściwe, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (logarytmiczna, , $c_3 = 10^{12}$).....	89
Rys. 69. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnik Haf, e – badania właściwe, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (wykładnicza)..	89
Rys. 70. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja współczynnika Haf, e – badania właściwe, linia przerywana - Funkcja szacująca wytrzymałość resztkową (wykładnicza)..	93
Rys. 71. Względna wytrzymałość resztkowa $Rars, 28$ dla różnych czasów wygrzewania jako funkcja temperatury, linia EC – Względna wytrzymałość betonu na kruszywie krzemianowym w wysokiej temperaturze wg [21]	94
Rys. 72. Względna wytrzymałość resztkowa betonu (RRS) jako funkcja temperatury maksymalnej i czasu wygrzewania.....	98
Rys. 73. Względna wytrzymałość resztkowa betonu (RRS) jako funkcja temperatury maksymalnej i czasu wygrzewania - widok z perspektywy osi X (temperatury wygrzewania)	98
Rys. 74. Kod modelu sieci neuronowej MLP 2-7-1 w języku PMML.....	99

SPIS TABEL

Tab. 1. Zestawienie badań na temat wpływu maksymalnej temperatury na wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie	11
Tab. 2. Współczynniki korelacji pomiędzy maksymalną temperaturą a względną wytrzymałością resztkową dla dwóch różnych czasów nagrzewania w maksymalnej temperaturze.....	13
Tab. 3. Zestawienie badań na temat wpływu czasu wygrzewania na wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie.....	15
Tab. 4. Współczynniki korelacji pomiędzy czasem wygrzewania a względną wytrzymałością resztkową betonu $R_{rs\Theta}$ dla temperatury maksymalnej równej 500°C.....	18
Tab. 5. Współczynniki korelacji pomiędzy prędkością nagrzewania, a względną wytrzymałością resztkową $R_{rs\Theta}$ dla temperatury maksymalnej równej 500°C	19
Tab. 6. Zestawienie badań na temat wpływu rodzaju i prędkości ochładzania na wytrzymałość resztkową betonu.....	20
Tab. 7. Porównanie wartości względnej wytrzymałości betonu $R_{rs\Theta}$ w zależności od rodzaju chłodzenia i czasu rehydratacji, na podstawie [44].....	22
Tab. 8. Porównanie wyników względnej wytrzymałości resztkowej betonu $R_{rs\Theta}$ w zależności od rodzaju chłodzenia i od rodzaju betonu, na podstawie [45]	22
Tab. 9. Porównanie wyników względnej wytrzymałości resztkowej betonu w zależności od rodzaju chłodzenia i czasu rehydratacji, na podstawie [47,48].....	23
Tab. 10. Zestawienie badań na temat wpływu rehydratacji betonu na wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie.....	24
Tab. 11. Współczynniki korelacji pomiędzy czasem rehydratacji a względną wytrzymałością resztkową $R_{rs\Theta}$	28
Tab. 12. Zestawienie badań na temat wpływu porowatości na wytrzymałość resztkową betonu	30
Tab. 13. Porowatość, względna wytrzymałość resztkowa i względna porowatość jako funkcja temperatury nagrzewania i czasu rehydratacji dla różnych mieszanek (HS-CC – próbka kontrolna, HS-FA30 – 30% cementu zastąpione popiołem lotnym), na podstawie [58]	32
Tab. 14. Względna porowatość i względna wytrzymałość resztkowa betonu jako funkcja temperatury wygrzewania, na podstawie [26]	33
Tab. 15. Współczynniki korelacji między porowatością po ekspozycji, a względną wytrzymałością resztkową $R_{rs\Theta}$	34
Tab. 16. Względna wytrzymałość resztkowa jako funkcja maksymalnej temperatury i współczynnika w/c, na podstawie [40].....	40
Tab. 17. Zbiorcze podsumowanie czynników i ich istotności w szacowaniu wytrzymałości resztkowej betonu po ekspozycji na wysoką temperaturę	47
Tab. 18. Zestawienie podstawowych informacji o mieszkankach betonowych użytych w badaniach wstępnych.....	54
Tab. 19. Wyniki badań wstępnych - wytrzymałości na ściskanie próbek betonu, badania zgodnie z [138]	60

Tab. 20. Porównanie wyników badań w zakresie względnej wytrzymałości dla temperatury maksymalnej $\Theta=600^{\circ}\text{C}$ i różnych czasów wygrzewania, różni autorzy	61
Tab. 21. Podstawowe parametry mieszanki i betonu użytego w badaniach właściwych	62
Tab. 22. Projektowany skład mieszanki betonowej użytej do wykonania próbek w badaniach właściwych	62
Tab. 23. Liczby próbek przyjętych do badania dla danych wartości temperatury i czasu wygrzewania.....	63
Tab. 24. Numeracja próbek przyjętych w badaniach właściwych.....	63
Tab. 25. Wyniki wytrzymałości resztkowej betonu na ściskanie (f_{rc} – wyrażone w [MPa]) uzyskane w trakcie badań zasadniczych.....	67
Tab. 26. Średnia wytrzymałość resztkowa betonu (f_{rc} – wyrażone w [MPa]) dla przyjętych wartości temperatury i czasu wygrzewania	67
Tab. 27. Wytrzymałość próbek-świadków wyrażona w [MPa].....	68
Tab. 28. Względna wytrzymałość resztkowa betonu na ściskanie (R_{rs}) dla przyjętych wartości temperatury i czasu wygrzewania	68
Tab. 29. Współczynniki korelacji pomiędzy współczynnikami zakumulowanego ciepła, a względną wytrzymałością resztkową [143]	72
Tab. 30. Zestawienie badań innych autorów użytych w obliczeniach wraz z istotnymi warunkami badań	73
Tab. 31. Wartości współczynników $A_{i,j}, B_{i,j}$ oraz $RSS_{j,i}$ dla funkcji szacującej wytrzymałość resztkową na bazie współczynnika H_{400r} : logarytmiczna (l) i wykładnicza (e)	76
Tab. 32. Współczynnik korelacji współczynników $H_{af,1,l}$ oraz $H_{af,1,e}$ i względnej wytrzymałości resztkowej.....	79
Tab. 33. Wartości współczynników $A_{i,j}, B_{i,j}, \alpha_{i,j}$ oraz $RSS_{j,i}$ dla funkcji szacującej wytrzymałość resztkową na bazie współczynnika $H_{af,1}$: logarytmiczna (l) i wykładnicza (e)	79
Tab. 34. Współczynnik korelacji współczynników $H_{af,2,l}$ oraz $H_{af,2,e}$ i względnej wytrzymałości resztkowej.....	83
Tab. 35. Wartości współczynników $A_{i,j}, B_{i,j}, \alpha_{i,j}$ oraz $RSS_{j,i}$ dla funkcji szacującej wytrzymałość resztkową na bazie współczynnika $H_{af,2}$: logarytmiczna (l) i wykładnicza (e)	83
Tab. 36. Współczynnik korelacji współczynników $H_{af,3,l}$ oraz $H_{af,3,e}$ i względnej wytrzymałości resztkowej.....	86
Tab. 37. Wartości współczynników $A_{i,j}, B_{i,j}, \alpha_{i,j}, \beta_{i,j}$ oraz $RSS_{j,i}$ dla funkcji szacującej wytrzymałość resztkową na bazie współczynnika $H_{af,2}$: logarytmiczna (l) i wykładnicza (e)	86
Tab. 38. Porównanie wartości RSS i współczynnika Pearsona dla różnych iteracji obliczania H_{af}	87
Tab. 39. Wartości współczynników $A_j, B_j, \alpha_j, \beta_j$ oraz RSS_j dla funkcji szacujących względną wytrzymałość resztkową na bazie współczynnika $H_{af,j}$: logarytmiczna (l) i wykładnicza (e)	90

Tab. 40. Współczynnik korelacji współczynników Haf, l oraz Haf, e i względnej wytrzymałości resztkowej.....	90
Tab. 41. Porównanie błędów $PS - RSS_{i,j}$ dla różnych modyfikacji funkcji szacujących	90
Tab. 42. Wartości współczynników $Ae, Be, ae, \beta e$ oraz $RSSe$ dla funkcji szacującej wytrzymałość resztkową na bazie współczynnika Haf, e . Współczynnik korelacji Pearsona Haf, e i względnej wytrzymałości resztkowej	92
Tab. 43. Nazwy sieci neuronowych wraz z rodzajami funkcji aktywacji	96
Tab. 44. Porównanie współczynników RSS i $PS - RSS_j$ dla różnych funkcji szacujących, zarówno sieci neuronowych, jak i podejścia tradycyjnego	97

BIBLIOGRAFIA

1. Comité Européen de Normalisation *EN 1991-1-2 Eurocode 1. Actions on structures. General actions. Actions on structures exposed to fire*; 2002;
2. 200-HTC, R.T. Recommendation of RILEM TC 200-HTC: mechanical concrete properties at high temperatures—modelling and applications. *Mater. Struct.* **2007**, *40*, 855–864, doi:10.1617/s11527-007-9286-1.
3. ASTM Standard *E119-20 Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials*; ASTM International: West Conshohocken, PA, 2020;
4. Chang, Y.F.; Chen, Y.H.; Sheu, M.S.; Yao, G.C. Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures. *Cem. Concr. Res.* **2006**, *36*, 1999–2005, doi:10.1016/j.cemconres.2006.05.029.
5. Ayman Nassif Postfire full stress–strain response of fire-damaged concrete.pdf 2005, 10.
6. Hager, I.; Krzemień, K. an Overview of Concrete Modulus of Elasticity Evolution With Temperature and Comments To European Code Provisions. *IFireSS – Int. Fire Saf. Symp. Coimbra* **2015**.
7. Felicetti, R.; Gambarova, P.G.; Meda, A. Residual behavior of steel rebars and R/C sections after a fire. *Constr. Build. Mater.* **2009**, *23*, 3546–3555, doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.06.050.
8. Kodur, V.K.R.; Raut, N.K.; Mao, X.Y.; Khaliq, W. Simplified approach for evaluating residual strength of fire-exposed reinforced concrete columns. *Mater. Struct. Constr.* **2013**, *46*, 2059–2075, doi:10.1617/s11527-013-0036-2.
9. Wróblewski, R.; Gierczak, J.; Smardz, P.; Kmita, A. Fire and collapse modelling of a precast concrete hall. *Struct. Infrastruct. Eng.* **2016**, *12*, 714–729, doi:10.1080/15732479.2015.1042885.
10. Głowacki, M.; Kowalski, R. An experimental approach to the estimation of stiffness changes in RC elements exposed to bending and high temperature. *Eng. Struct.* **2020**, *217*, 110720, doi:10.1016/j.engstruct.2020.110720.
11. Chudzik, P.; Kowalski, R.; Abramowicz, M. Strains of Concrete in RC Structures Subjected to Fire. *Procedia Eng.* **2017**, *193*, 377–384, doi:10.1016/j.proeng.2017.06.227.
12. Mróz, K.; Hager, I. Non-Destructive Assessment of Residual Strength of Thermally Damaged Concrete Made with Different Aggregate Types. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* **2017**, *245*, doi:10.1088/1757-899X/245/3/032034.
13. Hager, I.; Carré, H.; Krzemie, K. Damage Assessment of Concrete Subjected To High Temperature By Means of the Ultrasonic Pulse Velocity – Upv Method. *Stud. Res.* **2013**, *32*, 197–211.
14. Hager, I. Methods for assessing the state of concrete in fire damaged structures | Metody oceny stanu betonu w konstrukcji po pożarze. *Cem. Wapno, Bet.* **2009**, *29*, 167–178.
15. Wróblewski, R.; Stawiski, B. Ultrasonic Assessment of the Concrete Residual Strength after a Real Fire Exposure. *Buildings* **2020**, *10*, 154, doi:10.3390/buildings10090154.
16. Moura, M.A. do N.; Moreno, A.L.; Ferreira, G.C. dos S. Ultrasonic testing on evaluation of concrete residual compressive strength: A review. *Constr. Build. Mater.* **2023**, *373*, 130887, doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.130887.
17. Wróblewska, J.; Kowalski, R. Assessing concrete strength in fire-damaged

- structures. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *254*, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119122.
18. Ma, Q.; Guo, R.; Zhao, Z.; Lin, Z.; He, K. Mechanical properties of concrete at high temperature-A review. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *93*, 371–383.
 19. Luccioni, B.M.; Figueroa, M.I.; Danesi, R.F. Thermo-mechanic model for concrete exposed to elevated temperatures. *Eng. Struct.* **2003**, *25*, 729–742, doi:10.1016/S0141-0296(02)00209-2.
 20. Türkmen, İ.; Findık, S.B. Several properties of mineral admixed lightweight mortars at elevated temperatures. *Fire Mater.* **2013**, *37*, 337–349, doi:10.1002/fam.1030.
 21. for Standardization, E.C. *EN 1992-1-2, Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design*; Brussels, 2004; Vol. 3;.
 22. Toumi, B.; Resheidat, M.; Guemmadi, Z.; Chabil, H. Coupled effect of high temperature and heating time on the residual strength of normal and high-strength concretes. *Jordan J. Civ. Eng.* **2009**, *3*, 322–330.
 23. Yang, H.; Lin, Y.; Hsiao, C.; Liu, J.Y. Evaluating residual compressive strength of concrete at elevated temperatures using ultrasonic pulse velocity. *Fire Saf. J.* **2009**, *44*, 121–130, doi:10.1016/j.firesaf.2008.05.003.
 24. Phan, L.T.; Lawson, J.R.; Davis, F.L. Effects of elevated temperature exposure on heating characteristics, spalling, and residual properties of high performance concrete. *Mater. Struct. Constr.* **2001**, *34*, 83–91, doi:10.1007/bf02481556.
 25. Netinger, I.; Kesegic, I.; Guljas, I. The effect of high temperatures on the mechanical properties of concrete made with different types of aggregates. *Fire Saf. J.* **2011**, *46*, 425–430, doi:10.1016/j.firesaf.2011.07.002.
 26. Hager, I.; Tracz, T.; Śliwiński, J.; Krzemień, K. The influence of aggregate type on the physical and mechanical properties of high-performance concrete subjected to high temperature. *Fire Mater.* **2016**, *40*, 668–682, doi:10.1002/fam.2318.
 27. Krzemień, K.; Hager, I. Post-fire assessment of mechanical properties of concrete with the use of the impact-echo method. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *96*, 155–163, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.007.
 28. Xiao, J.; Falkner, H. On residual strength of high-performance concrete with and without polypropylene fibres at elevated temperatures. *Fire Saf. J.* **2006**, *41*, 115–121, doi:10.1016/j.firesaf.2005.11.004.
 29. Chan, Y.N.; Peng, G.F.; Anson, M. Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures. *Cem. Concr. Compos.* **1999**, *21*, 23–27, doi:10.1016/S0958-9465(98)00034-1.
 30. Tolentino, E.; Lameiras, F.S.; Gomes, A.M.; Silva, C.A.R. da; Vasconcelos, W.L. Effects of High Temperature on the Residual Performance of Portland Cement Concretes. *Mater. Res.* **2002**, *5*, 301–307, doi:10.1590/s1516-14392002000300014.
 31. Xiao, J.; Xie, M.; Zhang, C. Residual compressive behaviour of pre-heated high-performance concrete with blast-furnace-slag. *Fire Saf. J.* **2006**, *41*, 91–98, doi:10.1016/j.firesaf.2005.11.001.
 32. Ashkezari, G.D.; Razmara, M. Thermal and mechanical evaluation of ultra-high performance fiber-reinforced concrete and conventional concrete subjected to high temperatures. *J. Build. Eng.* **2020**, *32*, 101621, doi:10.1016/j.job.2020.101621.
 33. Zhai, Y.; Deng, Z.; Li, N.; Xu, R. Study on compressive mechanical capabilities of concrete after high temperature exposure and thermo-damage constitutive model.

- Constr. Build. Mater.* **2014**, 68, 777–782, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.06.052.
34. Pertiwi, N.; Ahmad, I.A.; Taufieq, N.A.S. Analysis - Residual Strength of Post Fire Concrete. *Asian J. Appl. Sci.* **2017**, 05, 602–607.
35. Wu, Y.; Wu, B. Residual compressive strength and freeze-thaw resistance of ordinary concrete after high temperature. *Constr. Build. Mater.* **2014**, 54, 596–604, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.089.
36. Mohamedbhai, G.T.G. Effect of exposure time and rates of heating and cooling on residual strength of heated concrete. *Mag. Concr. Res.* **1986**, 38, 151–158, doi:10.1680/macr.1986.38.136.151.
37. Annerel, E.; Taerwe, L.R. Approaches for the assessment of the residual strength of concrete exposed to fire 2007, 12.
38. Kowalski, R. The effects of the cooling rate on the residual properties of heated-up concrete. *Struct. Concr.* **2007**, 8, 11–15, doi:10.1680/stco.2007.8.1.11.
39. Peng, G.F.; Bian, S.H.; Guo, Z.Q.; Zhao, J.; Peng, X.L.; Jiang, Y.C. Effect of thermal shock due to rapid cooling on residual mechanical properties of fiber concrete exposed to high temperatures. *Constr. Build. Mater.* **2008**, 22, 948–955, doi:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.002.
40. Yang, H.; Zhao, H.; Liu, F. Residual cube strength of coarse RCA concrete after exposure to elevated temperatures. *Fire Mater.* **2018**, 42, 424–435, doi:10.1002/fam.2508.
41. Husem, M. The effects of high temperature on compressive and flexural strengths of ordinary and high-performance concrete. *Fire Saf. J.* **2006**, 41, 155–163, doi:10.1016/j.firesaf.2005.12.002.
42. Mendes, A.; Sanjayan, J.G.; Collins, F. Effects of slag and cooling method on the progressive deterioration of concrete after exposure to elevated temperatures as in a fire event. *Mater. Struct. Constr.* **2011**, 44, 709–718, doi:10.1617/s11527-010-9660-2.
43. Bingöl, A.F.; Gül, R. Effect of elevated temperatures and cooling regimes on normal strength concrete. *Fire Mater.* **2009**, 33, 79–88, doi:10.1002/fam.987.
44. Li, L.; Jia, P.; Dong, J.; Shi, L.; Zhang, G.; Wang, Q. Effects of cement dosage and cooling regimes on the compressive strength of concrete after post-fire-curing from 800 °C. *Constr. Build. Mater.* **2017**, 142, 208–220, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.053.
45. Luo, X.; Sun, W.; Chan, S.Y.N. Effect of heating and cooling regimes on residual strength and microstructure of normal strength and high-performance concrete. *Cem. Concr. Res.* **2000**, 30, 379–383, doi:10.1016/S0008-8846(99)00264-1.
46. Shaikh, F.U.A.; Vimonsatit, V. Effect of cooling methods on residual compressive strength and cracking behavior of fly ash concretes exposed at elevated temperatures. *Fire Mater.* **2016**, 40, 335–350, doi:10.1002/fam.2276.
47. Wang, Y.; Liu, F.; Xu, L.; Zhao, H. Effect of elevated temperatures and cooling methods on strength of concrete made with coarse and fine recycled concrete aggregates. *Constr. Build. Mater.* **2019**, 210, 540–547, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.215.
48. Li, Q.; Yuan, G.; Shu, Q. Effects of heating/cooling on recovery of strength and carbonation resistance of fire-damaged concrete. *Mag. Concr. Res.* **2014**, 66, 925–936, doi:10.1680/macr.14.00029.
49. Karakoç, M.B. Effect of cooling regimes on compressive strength of concrete with lightweight aggregate exposed to high temperature. *Constr. Build. Mater.* **2013**, 41, 21–25, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.11.104.

50. Abramowicz, M.; Kowalski, R. The influence of short time water cooling on the mechanical properties of concrete heated up to high temperature. *J. Civ. Eng. Manag.* **2005**, *11*, 85–90, doi:10.1080/13923730.2005.9636336.
51. Yu, J.; Weng, W.; Yu, K. Effect of different cooling regimes on the mechanical properties of cementitious composites subjected to high temperatures. *Sci. World J.* **2014**, *2014*, doi:10.1155/2014/289213.
52. Tanaçan, L.; Ersoy, H.Y.; Arpacioğlu, Ü. Effect of high temperature and cooling conditions on aerated concrete properties. *Constr. Build. Mater.* **2009**, *23*, 1240–1248, doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.08.007.
53. Zhai, Y.; Li, Y.; Li, Y.; Wang, S.; Liu, Y.; Song, K. Il Impact of high-temperature-water cooling damage on the mechanical properties of concrete. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *215*, 233–243, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.161.
54. Awal, A.S.M.A.; Shehu, I.A.; Ismail, M. Effect of cooling regime on the residual performance of high-volume palm oil fuel ash concrete exposed to high temperatures. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *98*, 875–883, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.09.001.
55. Xuan, D.X.; Shui, Z.H. Rehydration activity of hydrated cement paste exposed to high temperature. *Fire Mater.* **2011**, *35*, 481–490, doi:10.1002/fam.1067.
56. Akca, A.H.; Özyurt, N. Effects of re-curing on microstructure of concrete after high temperature exposure. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *168*, 431–441, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.02.122.
57. Papayianni, J.; Valiasis, T. Residual mechanical properties of heated concrete incorporating different pozzolanic materials. *Mater. Struct.* **1991**, *24*, 115–121, doi:10.1007/BF02472472.
58. Poon, C.S.; Azhar, S.; Anson, M.; Wong, Y.L. Strength and durability recovery of fire-damaged concrete after post-fire-curing. *Cem. Concr. Res.* **2001**, *31*, 1307–1318, doi:10.1016/S0008-8846(01)00582-8.
59. Souza, A.A.A. de; Moreno Jr, A.L. Assessment of the influence of the type of aggregates and rehydration on concrete submitted to high temperatures. *Rev. IBRACON Estruturas e Mater.* **2010**, *3*, 477–493, doi:10.1590/s1983-41952010000400007.
60. Lin, Y.; Hsiao, C.; Yang, H.; Lin, Y.F. The effect of post-fire-curing on strength-velocity relationship for nondestructive assessment of fire-damaged concrete strength. *Fire Saf. J.* **2011**, *46*, 178–185, doi:10.1016/j.firesaf.2011.01.006.
61. Mirmomeni, M.; Heidarpour, A.; Schlangen, E.; Smith, S. Effect of Post-Fire Curing on the Residual Mechanical Properties of Fire-Damaged Self-Compacting Concrete. **2016**, doi:10.21012/fc9.027.
62. Horiguchi, T.; Suhaendi, S.L. Recovery behavior of hybrid fiber reinforced high strength concrete after fire exposure. *J. Struct. Fire Eng.* **2010**, *1*, 219–229, doi:10.1260/2040-2317.1.4.219.
63. Park, S.J.; Yim, H.J.; Kwak, H.G. Effects of post-fire curing conditions on the restoration of material properties of fire-damaged concrete. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *99*, 90–98, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.09.015.
64. Eden, M.A. Fire damaged concrete - The potential for on-going deterioration post-fire in concrete heated to temperatures of less than 300°C. *Concr. - Proc. Concr. Solut. 4th Int. Conf. Concr. Repair* **2012**, *2*, 497–501, doi:10.1201/b11570-73.
65. Chen, B.; Li, C.; Chen, L. Experimental study of mechanical properties of normal-strength concrete exposed to high temperatures at an early age. *Fire Saf. J.* **2009**,

- 44, 997–1002, doi:10.1016/j.firesaf.2009.06.007.
66. Endait, M.; Wagh, S. Effect of elevated temperature on mechanical properties of early-age concrete. *Innov. Infrastruct. Solut.* **2020**, *5*.
67. Yu, K.Q.; Lu, Z.D.; Yu, J. Residual compressive properties of strain-hardening cementitious composite with different curing ages exposed to high temperature. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *98*, 146–155, doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.08.041.
68. Kowalski, R. Mechanical properties of concrete subjected to high temperature. *Archit. Civ. Eng. Environ.* **2010**, *3*, 61–70.
69. Castillo, C. Effect of transient high temperature on high strength concrete, Rice University, 1987.
70. Yoon, M.; Kim, G.; Choe, G.C.; Lee, Y.; Lee, T. Effect of coarse aggregate type and loading level on the high temperature properties of concrete. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *78*, 26–33, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.12.096.
71. Kim, Y.S.; Lee, T.G.; Kim, G.Y. An experimental study on the residual mechanical properties of fiber reinforced concrete with high temperature and load. *Mater. Struct. Constr.* **2013**, *46*, 607–620, doi:10.1617/s11527-012-9918-y.
72. Chromá, M.; Vo, D.; Bayer, P. Concrete Rehydration after Heating to Temperatures of up to 1200 ° C. *Int. Conf. Durab. Build. Mater. Components* **2011**, 1633–1639.
73. Chan, S.Y.N.; Luo, X.; Sun, W. Effect of high temperature and cooling regimes on the compressive strength and pore properties of high performance concrete. *Constr. Build. Mater.* **2000**, *14*, 261–266, doi:10.1016/S0950-0618(00)00031-3.
74. Li, L.; Shi, L.; Wang, Q.; Liu, Y.; Dong, J.; Zhang, H.; Zhang, G. A review on the recovery of fire-damaged concrete with post-fire-curing. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *237*, 117564, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117564.
75. Babalola, O.E.; Awoyera, P.O.; Le, D.H.; Bendezi Romero, L.M. A review of residual strength properties of normal and high strength concrete exposed to elevated temperatures: Impact of materials modification on behaviour of concrete composite. *Constr. Build. Mater.* **2021**, *296*, doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.123448.
76. Cree, D.; Green, M.; Noumowé, A. Residual strength of concrete containing recycled materials after exposure to fire: A review. *Constr. Build. Mater.* **2013**, *45*, 208–223, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.04.005.
77. Niry Razafinjato, R.; Beaucour, A.L.; Hebert, R.L.; Ledesert, B.; Bodet, R.; Noumowe, A. High temperature behaviour of a wide petrographic range of siliceous and calcareous aggregates for concretes. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *123*, 261–273, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.097.
78. Xing, Z.; Hébert, R.; Beaucour, A.L.; Ledésert, B.; Noumowé, A. Influence of chemical and mineralogical composition of concrete aggregates on their behaviour at elevated temperature. *Mater. Struct. Constr.* **2014**, *47*, 1921–1940, doi:10.1617/s11527-013-0161-y.
79. Savva, A.; Manita, P.; Sideris, K.K. Influence of elevated temperatures on the mechanical properties of blended cement concretes prepared with limestone and siliceous aggregates. *Cem. Concr. Compos.* **2005**, *27*, 239–248, doi:10.1016/j.cemconcomp.2004.02.013.
80. Al-Jabri, K.S.; Waris, M.B.; Al-Saidy, A.H. Effect of aggregate and water to cement ratio on concrete properties at elevated temperature. *Fire Mater.* **2016**, *40*, 913–925, doi:10.1002/fam.2351.
81. Lo Monte, F.; Gambarova, P.G. Thermo-mechanical behavior of baritic concrete

- exposed to high temperature. *Cem. Concr. Compos.* **2014**, 53, 305–315, doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.07.009.
82. Albero, V.; Reig, L.; Hernández-Figueirido, D.; Roig-Flores, M.; Melchor-Eixea, A.; Piquer, A.; Pitarch, A.M. Fire and postfire compressive strength of recycled aggregate concrete made with ceramic stoneware. *J. Build. Eng.* **2024**, 89, 109363, doi:10.1016/j.jobe.2024.109363.
83. Sakr, K.; El-Hakim, E. Effect of high temperature or fire on heavy weight concrete properties. *Cem. Concr. Res.* **2005**, 35, 590–596, doi:10.1016/j.cemconres.2004.05.023.
84. Vieira, J.P.B.; Correia, J.R.; De Brito, J. Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. *Cem. Concr. Res.* **2011**, 41, 533–541, doi:10.1016/j.cemconres.2011.02.002.
85. Zhao, H.; Liu, F.; Yang, H. Residual compressive response of concrete produced with both coarse and fine recycled concrete aggregates after thermal exposure. *Constr. Build. Mater.* **2020**, 244, 118397, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.118397.
86. Laneyrie, C.; Beaucour, A.L.; Green, M.F.; Hebert, R.L.; Ledesert, B.; Noumowe, A. Influence of recycled coarse aggregates on normal and high performance concrete subjected to elevated temperatures. *Constr. Build. Mater.* **2016**, 111, 368–378, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.02.056.
87. Khan, A. ur R.; Aziz, T.; Fareed, S.; Xiao, J. Behaviour and Residual Strength Prediction of Recycled Aggregates Concrete Exposed to Elevated Temperatures. *Arab. J. Sci. Eng.* **2020**, 45, 8241–8253, doi:10.1007/s13369-020-04682-5.
88. Xiao, J.; Fan, Y.; Tawana, M.M. Residual compressive and flexural strength of a recycled aggregate concrete following elevated temperatures. *Struct. Concr.* **2013**, 14, 168–175, doi:10.1002/suco.201200037.
89. Kou, S.C.; Poon, C.S.; Etxeberria, M. Residue strength, water absorption and pore size distributions of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Cem. Concr. Compos.* **2014**, 53, 73–82, doi:10.1016/j.cemconcomp.2014.06.001.
90. Gales, J.; Parker, T.; Cree, D.; Green, M. Fire Performance of Sustainable Recycled Concrete Aggregates: Mechanical Properties at Elevated Temperatures and Current Research Needs. *Fire Technol.* **2016**, 52, 817–845, doi:10.1007/s10694-015-0504-z.
91. Martins, D.J.; Correia, J.R.; de Brito, J. The effect of high temperature on the residual mechanical performance of concrete made with recycled ceramic coarse aggregates. *Fire Mater.* **2016**, 40, 289–304, doi:10.1002/fam.2287.
92. Varona, F.B.; Baeza-Brotons, F.; Tenza-Abril, A.J.; Baeza, F.J.; Bañón, L. Residual compressive strength of recycled aggregate concretes after high temperature exposure. *Materials (Basel)*. **2020**, 13, doi:10.3390/MA13081981.
93. Hachemi, S.; Ounis, A. Performance of concrete containing crushed brick aggregate exposed to different fire temperatures. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* **2015**, 19, 805–824, doi:10.1080/19648189.2014.973535.
94. Pliya, P.; Hajiloo, H.; Romagnosi, S.; Cree, D.; Sarhat, S.; Green, M.F. The compressive behaviour of natural and recycled aggregate concrete during and after exposure to elevated temperatures. *J. Build. Eng.* **2021**, 38, 102214, doi:10.1016/j.jobe.2021.102214.
95. Tung, T.M.; Babalola, O.E.; Le, D.H. Investigation of Post Fire Mechanical Performance of Recycled Aggregate Concrete Containing Ground Granulated Blast

- Furnace Slag. *E3S Web Conf.* **2023**, 437, doi:10.1051/e3sconf/202343703003.
96. Yüksel, S.; Siddique, R.; Özkan, Ö. Influence of high temperature on the properties of concretes made with industrial by-products as fine aggregate replacement. *Constr. Build. Mater.* **2011**, 25, 967–972, doi:10.1016/j.conbuildmat.2010.06.085.
97. Ho, J.C.M.; Liang, Y.; Wang, Y.H.; Lai, M.H.; Huang, Z.C.; Yang, D.; Zhang, Q.L. Residual properties of steel slag coarse aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *Constr. Build. Mater.* **2022**, 316, doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.125751.
98. Tung, T.M.; Babalola, O.E.; Le, D.H. Experimental investigation of the performance of ground granulated blast furnace slag blended recycled aggregate concrete exposed to elevated temperatures. *Clean. Waste Syst.* **2023**, 4, 100069, doi:10.1016/j.clwas.2022.100069.
99. Seyam, A.M.; Nemes, R. Age influence on compressive strength for concrete made with different types of aggregates after exposed to high temperatures. *Mater. Today Proc.* **2023**, doi:10.1016/j.matpr.2023.06.403.
100. Gao, G.; Wen, B.; Li, Y.; Li, F.; Huo, D.; Hu, X. Effect of temperature on thermal properties and residual strength of coal gangue concrete. *Case Stud. Therm. Eng.* **2024**, 53, 103792, doi:10.1016/j.csite.2023.103792.
101. Fernandes, B.; Carré, H.; Mindeguia, J.C.; Perlot, C.; La Borderie, C. Effect of elevated temperatures on concrete made with recycled concrete aggregates - An overview. *J. Build. Eng.* **2021**, 44, doi:10.1016/j.jobbe.2021.103235.
102. Biró, A.; Lublőy, É. Classification of aggregates for fire. *Constr. Build. Mater.* **2020**, doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.121024.
103. Mindeguia, J.C.; Pimienta, P.; Carré, H.; La Borderie, C. On the influence of aggregate nature on concrete behaviour at high temperature. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* **2012**, 16, 236–253, doi:10.1080/19648189.2012.667682.
104. Xing, Z.; Beaucour, A.L.; Hebert, R.; Noumowe, A.; Ledesert, B. Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature. *Cem. Concr. Res.* **2011**, 41, 392–402, doi:10.1016/j.cemconres.2011.01.005.
105. Phan, L.T.; Carino, N.J. Effects of test conditions and mixture proportions on behavior of high-strength concrete exposed to high temperatures. *ACI Mater. J.* **2002**, 99, 54–66, doi:10.14359/11317.
106. Zega, C.J.; Di Maio, A.A. Recycled concrete exposed to high temperatures. *Mag. Concr. Res.* **2006**, 58, 675–682, doi:10.1680/macr.2006.58.10.675.
107. Zega, C.J.; Di Maio, A.A. Recycled concrete made with different natural coarse aggregates exposed to high temperature. *Constr. Build. Mater.* **2009**, 23, 2047–2052, doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.08.017.
108. Nadeem, A.; Memon, S.A.; Lo, T.Y. The performance of Fly ash and Metakaolin concrete at elevated temperatures. *Constr. Build. Mater.* **2014**, 62, 67–76, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.073.
109. Tanyildizi, H.; Coskun, A. The effect of high temperature on compressive strength and splitting tensile strength of structural lightweight concrete containing fly ash. *Constr. Build. Mater.* **2008**, 22, 2269–2275, doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.07.033.
110. Pathak, N.; Siddique, R. Properties of self-compacting-concrete containing fly ash subjected to elevated temperatures. *Constr. Build. Mater.* **2012**, 30, 274–280, doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.11.010.
111. Demirel, B.; Keleştemur, O. Effect of elevated temperature on the mechanical

- properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume. *Fire Saf. J.* **2010**, *45*, 385–391, doi:10.1016/j.firesaf.2010.08.002.
112. Behnood, A.; Ziari, H. Effects of silica fume addition and water to cement ratio on the properties of high-strength concrete after exposure to high temperatures. *Cem. Concr. Compos.* **2008**, *30*, 106–112, doi:10.1016/j.cemconcomp.2007.06.003.
113. Li, Q.; Li, Z.; Yuan, G. Effects of elevated temperatures on properties of concrete containing ground granulated blast furnace slag as cementitious material. *Constr. Build. Mater.* **2012**, *35*, 687–692, doi:10.1016/j.conbuildmat.2012.04.103.
114. Sadrmomtazi, A.; Gashti, S.H.; Tahmouresi, B. Residual strength and microstructure of fiber reinforced self-compacting concrete exposed to high temperatures. *Constr. Build. Mater.* **2020**, *230*, 116969, doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.116969.
115. Abid, M.; Hou, X.; Zheng, W.; Hussain, R.R. High temperature and residual properties of reactive powder concrete – A review. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *147*, 339–351, doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.04.083.
116. Maanser, A.; Benouis, A.; Ferhoune, N. Effect of high temperature on strength and mass loss of admixed concretes. *Constr. Build. Mater.* **2018**, *166*, 916–921, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.01.181.
117. AHMAD, A.H.; Abdulkareem, O.M. Effect of High Temperature on Mechanical Properties of Concrete Containing Admixtures. *AL-Rafdain Eng. J.* **2010**, *18*, 43–54, doi:10.33899/rengj.2010.31523.
118. Yermak, N.; Pliya, P.; Beaucour, A.L.; Simon, A.; Noumowé, A. Influence of steel and/or polypropylene fibres on the behaviour of concrete at high temperature: Spalling, transfer and mechanical properties. *Constr. Build. Mater.* **2017**, *132*, 240–250, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.11.120.
119. Poon, C.S.; Shui, Z.H.; Lam, L. Compressive behavior of fiber reinforced high-performance concrete subjected to elevated temperatures. *Cem. Concr. Res.* **2004**, *34*, 2215–2222, doi:10.1016/j.cemconres.2004.02.011.
120. Behnood, A.; Ghandehari, M. Comparison of compressive and splitting tensile strength of high-strength concrete with and without polypropylene fibers heated to high temperatures. *Fire Saf. J.* **2009**, *44*, 1015–1022, doi:10.1016/j.firesaf.2009.07.001.
121. Eidan, J.; Rasoolan, I.; Rezaeian, A.; Poorveis, D. Residual mechanical properties of polypropylene fiber-reinforced concrete after heating. *Constr. Build. Mater.* **2019**, *198*, 195–206, doi:10.1016/j.conbuildmat.2018.11.209.
122. Serrano, R.; Cobo, A.; Prieto, M.I.; González, M. de las N. Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers. *Constr. Build. Mater.* **2016**, *122*, 302–309, doi:10.1016/j.conbuildmat.2016.06.055.
123. Akca, A.H.; Özyurt, N. Deterioration and recovery of FRC after high temperature exposure. *Cem. Concr. Compos.* **2018**, *93*, 260–273, doi:10.1016/j.cemconcomp.2018.07.020.
124. Sideris, K.K.; Manita, P.; Chaniotakis, E. Performance of thermally damaged fibre reinforced concretes. *Constr. Build. Mater.* **2009**, *23*, 1232–1239, doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.08.009.
125. Düğenci, O.; Haktanir, T.; Altun, F. Experimental research for the effect of high temperature on the mechanical properties of steel fiber-reinforced concrete. *Constr. Build. Mater.* **2015**, *75*, 82–88, doi:10.1016/j.conbuildmat.2014.11.005.
126. Ghazy, M.F.; Abd Elaty, M.A.; Zalhaf, N.M. Mechanical Properties of HPC Incorporating Fly Ash and Ground Granulated Blast Furnace Slag After Exposure to

- High Temperatures. *Period. Polytech. Civ. Eng.* **2022**, 66, 761–774, doi:10.3311/PPci.19751.
127. Abdi Moghadam, M.; Izadifard, R.A. Effects of steel and glass fibers on mechanical and durability properties of concrete exposed to high temperatures. *Fire Saf. J.* **2020**, 113, 102978, doi:10.1016/j.firesaf.2020.102978.
128. Rudnik, E.; Drzymała, T. Thermal behavior of polypropylene fiber-reinforced concrete at elevated temperatures. *J. Therm. Anal. Calorim.* **2018**, 131, 1005–1015, doi:10.1007/s10973-017-6600-1.
129. Tung, T.M.; Babalola, O.E.; Le, D.H. Evaluation of the post fire mechanical strength properties of recycled aggregate concrete containing GGBS: optimization and prediction using machine learning techniques. *Asian J. Civ. Eng.* **2023**, 24, 1639–1666, doi:10.1007/s42107-023-00593-6.
130. Ho, C.M.; Doh, S.I.; Chin, S.C.; Li, X. Prediction of concrete residual compressive strength under elevated temperatures: Response surface methodology (RSM) approach. *Mater. Today Proc.* **2023**, doi:10.1016/j.matpr.2023.09.133.
131. Abed, M.; Mehryaar, E. A Machine Learning Approach to Predict Relative Residual Strengths of Recycled Aggregate Concrete after Exposure to High Temperatures. *Sustain.* **2024**, 16, doi:10.3390/su16051891.
132. Noman, M.; Ph, D.; Khattak, A.; Ph, D.; Alam, Z.; Ph, D.; Yaqub, M.; Ph, D.; Farsangi, E.N.; Ph, D. Predicting the Residual Compressive Strength of Concrete Exposed to Elevated Temperatures Using Interpretable Machine Learning. **2024**, 29, 1–16, doi:10.1061/PPSCFX.SCENG-1536.
133. Farhangi, V.; Moradi, M.J.; Daneshvar, K.; Hajiloo, H. Application of artificial intelligence in predicting the residual mechanical properties of fiber reinforced concrete (FRC) after high temperatures. *Constr. Build. Mater.* **2024**, 411, 134609, doi:10.1016/j.conbuildmat.2023.134609.
134. Kharrazi, H.; Toufigh, V.; Boroushaki, M. General and optimal 2D convolutional neural networks to predict the residual compressive strength of concretes exposed to high temperatures. *Eng. Appl. Artif. Intell.* **2024**, 131, 107901, doi:10.1016/j.engappai.2024.107901.
135. Shahraki, M.; Hua, N.; Elhami-Khorasani, N.; Tessari, A.; Garlock, M. Residual compressive strength of concrete after exposure to high temperatures: A review and probabilistic models. *Fire Saf. J.* **2023**, 135, 103698, doi:10.1016/j.firesaf.2022.103698.
136. PN-EN 12390-1: 2013-03, *Badania betonu. Część 1: Kształt, wymiary i inne wymagania dotyczące próbek do badań i form.*; 2021;
137. Schneider, U.; Felicetti, R.; Debicki, G.; Diederichs, U.; Franssen, J.M.; Jumpsanen, U.M.; Khoury, G.A.; Leonovich, S.; Millard, A.; Morris, W.A.; et al. Recommendation of RILEM TC 200-HTC: Mechanical concrete properties at high temperatures-modelling and applications : P relation. *Mater. Struct. Constr.* **2007**, 40, 855–864, doi:10.1617/s11527-007-9286-1.
138. PN-EN 12390-3: 2011/AC: 2012, *Badania betonu. Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.*;
139. PN-EN 12390-2:2019 *Badania betonu - Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych.*;
140. Shui, Z.; Xuan, D.; Chen, W.; Yu, R.; Zhang, R. Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. *Constr. Build. Mater.* **2009**, 23, 531–537, doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016.

141. Wang, G.; Zhang, C.; Zhang, B.; Li, Q.; Shui, Z. Study on the high-temperature behavior and rehydration characteristics of hardened cement paste. *Fire Mater.* **2015**, *39*, 741–750, doi:10.1002/fam.2269.
142. Vyšvařil, M.; Bayer, P.; Chromá, M.; Rovnaníková, P. Physico-mechanical and microstructural properties of rehydrated blended cement pastes. *Constr. Build. Mater.* **2014**, *54*, 413–420, doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.12.021.
143. Pasztetnik, M.; Wróblewski, R. A literature review of concrete ability to sustain strength after fire exposure based on the heat accumulation factor. *Materials (Basel)*. **2021**, *14*, doi:10.3390/ma14164719.
144. Sarhat, S.R.; Sherwood, E.G. Residual mechanical response of recycled aggregate concrete after exposure to elevated temperatures. *J. Mater. Civ. Eng.* **2013**, *25*, 1721–1730, doi:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000719.

STRESZCZENIE

Autor: Michał Pasztetnik

Tytuł: Wytrzymałość resztkowa betonu po ekspozycji na wysoką temperaturę

Słowa kluczowe: wytrzymałość resztkowa betonu, wysoka temperatura, współczynnik zakumulowanego ciepła, rehydratacja

Streszczenie:

Niniejsza rozprawa doktorska skupia się na wytrzymałości resztkowej betonu na ściskanie, rozumianej jako wytrzymałość, którą beton zachowuje trwale po ekspozycji na działanie wysokiej temperatury i powrocie do temperatury około 20°C.

Zagadnienie to jest istotne ze względów praktycznych i poznawczych, ponieważ pożary budynków są zjawiskiem występującym rzadko w ujęciu pojedynczego budynku, ale będącym powszechnym dla populacji. Aby zdecydować o działaniach, które mogą być przeprowadzane w obiekcie (wyburzenie, wzmocnienie, itp.) niezbędna jest znajomość stanu konstrukcji i parametrów materiałów. Dlatego też, zarówno ze względów bezpieczeństwa, jak i ekonomicznych, ważne jest poznanie wytrzymałości resztkowej betonu po pożarze.

W rozprawie przeprowadzono krytyczny przegląd literatury podsumowujący zagadnienia: wytrzymałości resztkowej i czynników potencjalnie na nią wpływających. Przy pomocy analizy statystycznej wyodrębniono czynniki istotnie i podsumowano wszystko zestawieniem. Przeanalizowano również proponowane w literaturze metody szacowania wytrzymałości resztkowej.

Na podstawie wniosków z analizy literatury określono cele naukowe rozprawy i zaplanowano eksperyment. W przeprowadzonych, dwuetapowych badaniach własnych sprawdzono wpływ temperatury i czasu wygrzewania na wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie. Zaproponowano również nową postać współczynnika zakumulowanego ciepła jako miary zniszczenia betonu opartą o zróżnicowany wpływ temperatury i czasu wygrzewania.

Efektem rozprawy było spełnienie celów naukowych i opracowanie własnej funkcji aproksymującej wytrzymałość resztkową betonu na ściskanie po 28 dniach rehydratacji. Jako alternatywną metodą szacowania wytrzymałości resztkowej użyto sztucznej sieci neuronowej. Wyniki obu modeli wykazały duże podobieństwo, co potwierdza ich użyteczność.

Rozprawę podsumowano wnioskami i zaproponowano kierunki dalszych badań.

ABSTRACT

Author: Michał Pasztetnik

Title: Residual strength of concrete after exposure to high temperature

Keywords: residual strength of concrete, high temperature, heat accumulation factor, rehydration

Abstract:

This dissertation focuses on the residual compressive strength of concrete, understood as the strength that concrete retains permanently after exposure to high temperature and return to a temperature of about 20°C.

This topic is important for practical and cognitive reasons, as building fires being a rare phenomenon in terms of a single building, but common to the population. In order to decide on the actions to be carried out on a building (demolition, reinforcement), it is necessary to know the condition of the structure and the parameters of the materials. Therefore, for both safety and economic reasons, it is important to know the residual strength of concrete after a fire.

The thesis conducted a critical literature review summarising the issues of: residual strength and the factors potentially affecting it. Using statistical analysis, significant factors were extracted and summarised. Methods proposed in the literature for estimating residual strength were also analysed.

Based on the conclusions of the literature analysis, the scientific objectives of the dissertation were defined and the experiment was planned. The effects of temperature and heating time on the residual compressive strength of concrete were tested in a two-stage own study. Heat accumulation factor was also developed as a measure of concrete damage based on the varying effects of temperature and heating time.

The dissertation resulted in the fulfilment of the scientific objectives and the development of a proprietary function approximating the residual compressive strength of concrete after 28 days of rehydration. An artificial neural network was used as an alternative method for estimating the residual strength. The results of both models showed a high similarity which confirms their usefulness.

The dissertation was summarised with conclusions and suggestions for further research.