



Politechnika Śląska

Wydział Budownictwa

Katedra Procesów Budowlanych i Fizyki Budowli

Rada dyscypliny Inżynieria Lądowa, Geodezja i Transport

ROZPRAWA DOKTORSKA

*Wpływ temperatury i czasu na właściwości
samozagęszczalnych mieszanek na spoiwach
cementowych*

mgr inż. Grzegorz Cygan

Promotor

Prof. dr hab. inż. Jacek Gołaszewski

Gliwice 2023

SPIS TREŚCI

Spis treści	0
1. Wstęp	2
2. Studium literaturowe	4
2.1 Wpływ temperatury na reakcję wiązania cementu	6
2.2 Wpływ temperatury na procesy adsorpcji domieszek	13
2.2.1 Charakterystyka procesu adsorpcji	13
2.2.2 Potencjał elektrokinetyczny ζ i czynniki go kształtujące	15
2.2.3 Procesy interkalacji	23
2.3 Wpływ temperatury na procesy absorpcji wody przez kruszywo i parowanie wody ..	25
2.4 Efekty związane z powierzchnią między fazową i spójnością	27
2.5 Metody projektowania składów zapraw	30
2.6 Wpływ temperatury na właściwości mechaniczne	34
2.7 Wpływ temperatury na urabialność mieszanek betonów samozagęszczalnych	35
2.7.1 Badania dotyczące wpływu temperatury – doświadczenia na zaczynach	35
2.7.2 Badania dotyczące wpływu temperatury – doświadczenia na zaprawach	43
2.7.3 Badania dotyczące wpływu temperatury – doświadczenia na mieszankach betonowych	52
2.8 Wpływ temperatury na parcie mieszanek betonu samozagęszczalnego na ściany deskowania pionowego	56
2.9 Rola dodatków mineralnych w kształtowaniu właściwości mieszanek betonowych ..	59
2.10 Podsumowanie studium literaturowego	62
3. Cel i zakres pracy	65
4. Badania własne	70
4.1 Metodyka badań	70
4.1.1 Procedura przygotowania składników i mieszania	70
4.1.2 Metodyka badań konsystencji mieszanek	71
4.1.3 Metodyka badań właściwości reologicznych	73
4.2 Wpływ temperatury na właściwości samozagęszczalnych mieszanek betonowych - BLOK I	77
4.2.1 Składy i właściwości składników mieszanek	77
4.2.2 Wpływ temperatury na urabialność samozagęszczalnych mieszanek betonu zwykłego	79
4.2.3 Wpływ temperatury na urabialność samozagęszczalnych mieszanek betonów wysokowartościowych	86
4.2.4 Wpływ temperatury na wytrzymałość na ściskanie betonów samozagęszczonych	90

4.2.5	Wpływ temperatury początkowej mieszanki betonowej na klasę betonu	97
4.2.6	Podsumowanie	98
4.3	Wpływ temperatury na urabialność betonów zagęszczanych wibracyjnie –	
BLOK II	100
4.3.1	Składy i właściwości składników mieszanek	100
4.3.2	Wyniki badań wpływu temperatury na konsystencję mieszanek i jej zmianę w czasie 101	
4.3.3	Wpływ temperatury na właściwości mieszanek betonowych z cementami z popiołem wapiennym	106
4.3.4	Wpływ temperatury na właściwości mieszanek betonowych z cementami z dodatkami mineralnymi	108
4.3.5	Wpływ domieszek chemicznych na kształtowanie odporności na zmianę temperatury mieszanek zagęszczanych mechanicznie	109
4.3.6	Właściwości cementu a retencja urabialności w zmiennych temperaturach	115
4.3.7	Podsumowanie	118
4.4	Wpływ temperatury na parcie mieszanek betonu samozagęszczalnego na ściany deskowania – BLOK III.	119
4.4.1	Składy i właściwości składników mieszanek	119
4.4.2	Metodyka badań parcia samozagęszczalnych mieszanek betonowych na ściany deskowania	121
4.4.3	Wpływ temperatury na właściwości reologiczne Samozagęszczalnych mieszanek betonowych w stanie płynięcia	123
4.4.4	Wpływ temperatury na efekt sztywnienia samozagęszczalnych mieszanek betonowych	129
4.4.5	Wpływ temperatury na parcie mieszanki samozagęszczalnej na deskowanie słupa	138
4.4.6	Parametry reologiczne mieszanki a wywierane przez nią parcie na deskowanie pionowe	145
4.5	Właściwości reologiczne zapraw modelowych a właściwości mieszanek betonowych BLOK IV	150
5.	Podsumowanie i wnioski	164
	Literatura	169

1. WSTĘP

Problem wpływu temperatury na właściwości mieszanki betonowej, odpowiadające za jej urabialność był zapewne przedmiotem zainteresowania od chwili powstania betonu. Nie było to zainteresowanie udokumentowane, ale musiało istnieć, bo nie dało się nie zauważyć wpływu temperatury. Początkowo mieszanka betonowa była prostą mieszaniną cementu, wody i kruszywa. Wzrost temperatury otoczenia i mieszanki betonowej prowadził do skrócenia czasu, w którym możliwe było „urabianie” mieszanki. Zmniejszenie temperatury przynosiło skutek odwrotny. Pogorszenie urabialności wywołane zmianą temperatury w przypadku mieszanek zagęszczanych mechanicznie można w stosunkowo łatwy sposób skompensować, chociażby przez dłuższe wibrowanie. Wraz z nastaniem ery domieszek chemicznych uzyskano nowe możliwości w kształtowaniu urabialności mieszanek. Domieszki chemiczne uplastyczniające czy upłynniające I generacji nie zmieniły zasadniczo mechanizmu wpływu temperatury na urabialność. Jest związany głównie z przyspieszeniem reakcji hydratacji wraz ze wzrostem temperatury. Tutaj również wpływu temperatury na urabialność mieszanek nie należy traktować jako krytycznego. Oprócz zmiany parametrów procesów związanych z zagęszczaniem, możemy redozować domieszki tak by uzyskać wymaganą konsystencję. Kolejnym krokiem było wdrożenie superplastyfikatorów, najpierw sulfonowonaftalenowych później opartych na technologii związków polimerowych. To one umożliwiły dynamiczny rozwój technologii betonu w ogóle, a technologii betonów samozagęszczalnych w szczególności. Okazało się jednak, że efektywność domieszek upłynniających, których głównym mechanizmem działania jest efekt steryczny, jest szczególnie wrażliwa na temperaturę. Co więcej wpływu temperatury nie da się uogólnić. Wzrost temperatury mieszanki betonu samozagęszczalnego wcale nie musi oznaczać wzrostu jej granicy płynięcia czy lepkości. Możliwa jest taka interakcja temperatury i działania domieszki, która spowoduje zmianę parametrów reologicznych właściwą dla polepszenia urabialności. Ten efekt paradoksalnie otwiera możliwości kształtowania odporności mieszanek na zmiany konsystencji wywołane zmianą temperatury. Można to osiągnąć poprzez odpowiedni dobór składników mieszanki, przy czym najistotniejszy jest układ superplastyfikator-cement.

Dobierając odpowiedni superplastyfikator możemy uczynić mieszankę niewrażliwą na zmiany temperatury. Pojawia się tutaj rozszerzone zagadnienie kompatybilności układu cement – superplastyfikator. Rozszerzone o ujęcie wpływu temperatury na układ o podstawowym znaczeniu w kształtowaniu urabialności mieszanek betonowych.

Wpływu temperatury na właściwości reologiczne mieszanek betonowych jest szczególnie ważny w przypadku mieszanek betonów samozagęszczalnych. Proces ich zagęszczenia odbywa się tylko dzięki naprężeniom pochodzącym od ciężaru mieszanki. Naprężenia te pokonawszy granicę płynięcia powodują płynięcie mieszanki z prędkością odwrotnie proporcjonalną do lepkości. Najmniejsza zmiana w wielkości granicy płynięcia lub lepkości może powodować nieprawidłowe zagęszczenie mieszanki. W przypadku mieszanek betonów samozagęszczalnych, które z jakiegoś względu utraciły

zdolność do samozagęszczenia, należy unikać zagęszczania mechanicznego. Może ono doprowadzić do rozsegregowania mieszanki betonowej, do wycieku zaczynu cementowego w kierunku powierzchni ale również przez nieszczelności deskowania. Skutkuje to niższą jakością betonu lub całkowitą jego dyskwalifikacją. Wibrowanie mieszanki samozagęszczalnej prowadzi również do wyraźnego wzrostu parcia mieszanki betonowej na deskowanie. Ma ono z reguły charakter lokalny, mieszczący się w obrębie oddziaływania buławy wibratora, ale jest na tyle duże, że może przekroczyć nośność deskowania. Będący antidotum na utratę urabialności betonów zagęszczanych wibracyjnie zabieg redozowania domieszki na miejscu wbudowania mieszanki, w przypadku mieszanek betonów samozagęszczalnych jest trudny. Potrzeba znacznego doświadczenia w stosowaniu domieszek by prawidłowo ten zabieg przeprowadzić. Bardzo łatwo jest doprowadzić mieszankę do segregacji składników, co może skutkować bardzo niejednorodną strukturą betonu. Należy przy tym pamiętać, że znaczne ilości domieszek upłynniających są w stanie znacznie opóźnić proces wiązania spoiwa. Z tych względów problem wpływu temperatury na konsystencję mieszanek betonu samozagęszczalnych ma zdecydowanie większe znaczenie niż w przypadku mieszanek zagęszczanych mechanicznie. Jest to również jeden z powodów dla których udział mieszanek betonów samozagęszczalnych w ogólnej produkcji betonów towarowych jest nie wielki.

Rozprawa składa się z części literaturowej oraz badań doświadczalnych. W studium literaturowym omówiono uzyskane rezultaty badań wpływu temperatury na właściwości mieszanek na spoiwach cementowych, z podziałem na badania na zaczynach, zaprawach i mieszankach betonowych. Scharakteryzowano mechanizmy kształtujące urabialność mieszanek, które są przede wszystkim związane z procesami adsorpcji domieszek na ziarnach cementu i produktach jego hydratacji. Ocena wpływu temperatury na procesy adsorpcji domieszek ma charakter spekulacyjny z uwagi na nikłą ilość danych dotyczących wpływu temperatury na mechanizm adsorpcji nowoczesnych superplastyfikatorów polimerowych.

Badania doświadczalne zostały podzielone na cztery bloki: Pierwszy dotyczy badań wpływu temperatury i czasu na właściwości mieszanek betonów samozagęszczalnych. Drugi dotyczy badań wpływu temperatury i czasu na właściwości mieszanek betonów zagęszczanych wibracyjnie. W trzecim badano mieszanki betonu samozagęszczalnego, w ujęciu wpływu właściwości reologicznych mieszanek na wywierane przez nie parcie na deskowanie. Czwarty blok dotyczy badań wpływu temperatury na właściwości reologiczne zapraw modelowych, których skład jest wynikiem korekty składu zaprawy wchodzącej w skład mieszanki betonowej.

2. STUDIUM LITERATUROWE

Z punktu widzenia wpływu temperatury na urabialność mieszanek betonowych istotna jest wczesna faza reakcji uwodnienia cementu. Jej początkiem jest czas w którym dochodzi do kontaktu cementu z wodą. Koniec nie powinien być utożsamiany z końcem wiązania cementu gdyż wcześniej następuje czas w którym mieszanka jest już wbudowana w konstrukcję, wtedy urabialność przestaje być istotna. Co więcej proces zagęszczania, który jest zwieńczeniem technologicznych prac z mieszanką betonową jest przeprowadzany przed początkiem wiązania spoiwa. Czyli nawet on nie determinuje ram czasowych, które z punktu widzenia urabialności są istotne. Maksymalne czasy transportu betonu towarowego w różnych warunkach klimatycznych określone są w [1]. Czas ten nie przekracza 120 minut dla temperatury 5-10 °C i 30 minut w warunkach temperatur podwyższonych. Jeżeli wymagany jest dłuższy czas to wiąże się to zazwyczaj ze stosowaniem domieszek opóźniających wiązanie, które wydłużają okres indukcji.

Tablica 1. Maksymalny czas transportu betonu towarowego w różnych warunkach klimatycznych [1]

Temperatura mieszanki betonowej [°C]	Dopuszczalny czas transportu t_{dop} [min]	
	rodzaj środka transportowego	
	bez mieszadła	z mieszadłem
5-10	70	120
10-20	50	90
20-25	30	60
25-30	20	30

Według [2] na terenie jednego z miast północnej Polski i okolic czas transportu mieszanki betonowej zazwyczaj nie przekracza 60 minut. Określając wpływ czasu na zmianę urabialności możemy rozpatrywać okres pierwszych 60-120 minut licząc od chwili kontaktu z wodą.

Wpływ temperatury jest skomplikowanym zagadnieniem z uwagi na to, że wiele zjawisk, reakcji zachodzących w mieszance betonowej jest uzależnionych od temperatury, w myśl prawa Arrheniusa. Pierwszymi są reakcje hydratacji i hydrolizy cementu, które przyspieszają wraz ze wzrostem temperatury. Należy pamiętać również o tym, że nie chodzi o samą kinetykę reakcji, ale również o produkty reakcji, których rodzaj i ilość są zależne od temperatury. To prowadzi do zmian w działaniu domieszek, które są związane ze stopniem ich zaadsorbowania na powierzchniach ziaren cementu i produktach ich hydratacji.

Relatywnie nie wiele prac jest poświęconych zagadnieniu wpływu temperatury na właściwości mieszanek na spoiwach cementowych. „Właściwości betonu” A.M. Neville’a zagadnieniu temu poświęcają raptem kilka stron.

Badania wpływu temperatury mają głównie przyczynkowy charakter, nie często o ile w ogóle się zdarza, że wraz z określeniem wpływu temperatury na właściwości reologiczne zaprawy czy mieszanki betonowej, próbuje się określić co właściwie tym wpływem

rzędzi. Zazwyczaj jest tak, że sięga się do wyników badań o podstawowym charakterze prowadzonych na zaczynach cementowych, próbując za pomocą procesów w nich zachodzących wyjaśnić zachowanie mieszanek betonowych czy zapraw.

Zasadniczą różnicą w składach mieszanek zagęszczanych wibracyjnie i samozagęszczalnych jest odmienna relacja ilościowa składników. Z reguły stopień przepelnienia stosu okruszowego zaczynem spoiwowym jest większy w przypadku mieszanek samozagęszczalnych. Udział piasku w stosie okruszowym kruszywa również jest wyższy w przypadku mieszanek BSZ. Najbardziej istotną różnicą, jest większa w przypadku mieszanek betonu samozagęszczalnego ilość domieszek upłynniających. Zazwyczaj też odmienny jest ich rodzaj, choć domieszki upłynniające II i III generacji mogą być stosowane w obydwu technologiach. W związku z tym, z rodzajem i ilością domieszki upłynniającej należy wiązać różnice we wpływie temperatury na urabialność mieszanek betonu samozagęszczalnego i mieszanek zagęszczanych mechanicznie. Jakościowo składy mieszanek betonu zagęszczanego wibrowaniem i samozagęszczalnego są zbliżone, to i mechanizmy kształtujące urabialność będą w zasadzie te same. Z tego względu charakteryzując stan wiedzy na temat wpływu temperatury na mieszanki na spoiwach cementowych zrezygnowano z podziału na mieszanki zagęszczane mechanicznie i na mieszanki samozagęszczalne. Skupiając się na tych drugich i procesach odpowiedzialnych za kształtowanie urabialności mieszanek na spoiwach cementowych w aspekcie zmiennej temperatury.

Utrata urabialności mieszanek na spoiwach cementowych następuje w wyniku, występujących jednocześnie zjawisk, procesów i reakcji chemicznych. Są to:

- Reakcja hydratacji i hydrolizy cementu
- Mechanizm działania domieszek
- Procesy absorpcji wody przez ziarna kruszywa
- Utrata wody przez parowanie

Każde z nich jest uzależnione od temperatury, poza tym wzajemnie na siebie oddziałują. Co sprawia, że zmiany właściwości mieszanek a później stwardniałych kompozytów, wywołane zmianą temperatury mogą mieć odmienny charakter.

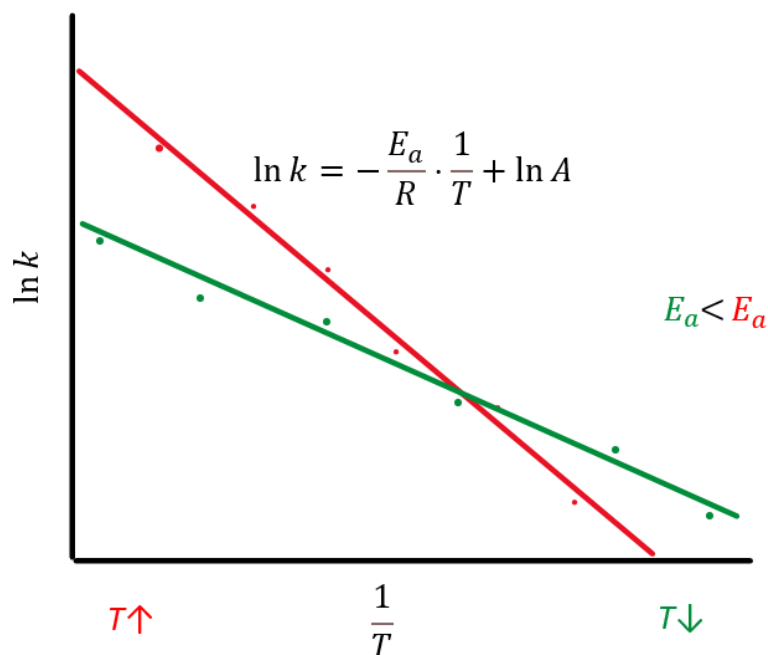
2.1 WPŁYW TEMPERATURY NA REAKCJĘ WIĄZANIA CEMENTU

Reakcje chemiczne są uzależnione od temperatury w której przebiegają. Opisuje to znane prawo Arrheniusa, które opisuje zależność stałej szybkości reakcji k od temperatury T :

$$k = k^{\circ} e^{-E_a/RT}$$

w którym: k - stała szybkości reakcji
 k° - stała zależna od prawdopodobieństwa wystąpienia skutecznych zderzeń między czasteczkami
 T - temperatura
 E_a - energia aktywacji

W przedziale temperatur 4,4 – 110 °C [3], prędkość reakcji hydratacji cementu również jest dobrze opisywana tym prawem. Zależność stałej reakcji od temperatury jest wykładnicza, czyli małym zmianom temperatury odpowiadają znaczne zmiany prędkości reakcji. Wpływ temperatury wyrażony prawem Arrheniusa dobrze przedstawia graficzne ujęcie na rys widoczne jest, że stała reakcji k wzrasta wraz ze wzrostem temperatury.



Rys. 1. Graficzne ujęcie prawa Arrheniusa

Zwiększenie szybkości reakcji można oszacować za pomocą empirycznej reguły podanej przez Jacobusa van't Hoffa, która dla reakcji heterogenicznej ma postać:

$$v_{T_2} = v_{T_1} (1,2 \div 1,4)^{\Delta T/10}$$

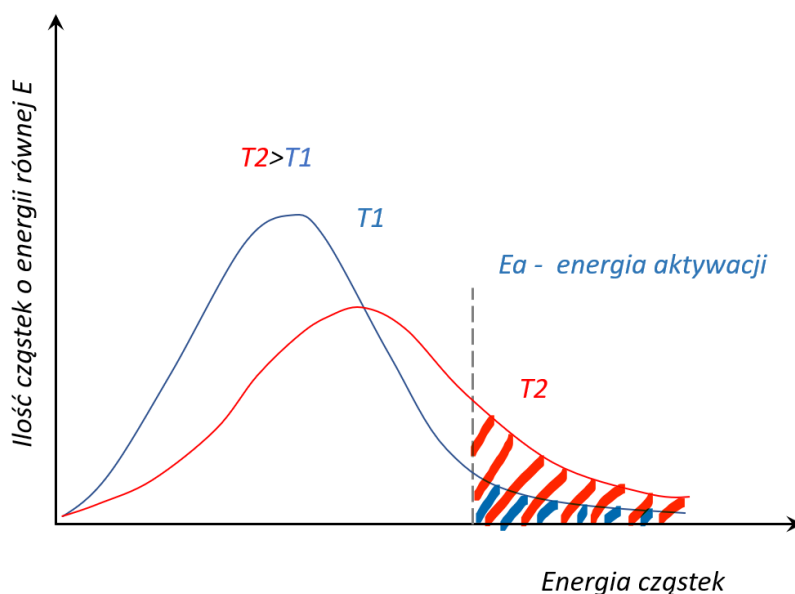
Wraz ze wzrostem temperatury rośnie energia cząstek. Stają się one bardziej ruchliwe i wzajemne zderzenia mogą być na tyle silne by pokonać barierę energetyczną. Jest to niezbędne by powstały aktywne kompleksy przejściowe, będące stanem pośrednim pomiędzy substratami a produktami reakcji.

Reakcja wiązania cementu zachodzi przez roztwór, najpierw w wodzie dodanej do cementu muszą pojawić się jony, które będą wchodziły we wzajemne reakcje, czego skutkiem będzie wytrącanie się nowych produktów.

Temperatura wpływa na kinetykę rozpuszczania i rozpuszczalność składników cementu kształtuje tym samym rodzaj i liczbę aktywnych cząstek w układzie. Wyraża to równanie Maxwella - Boltzmana określające liczbę aktywnych cząstek w układzie [4]:

$$N_A = N_0 \cdot e^{-E_a/RT}$$

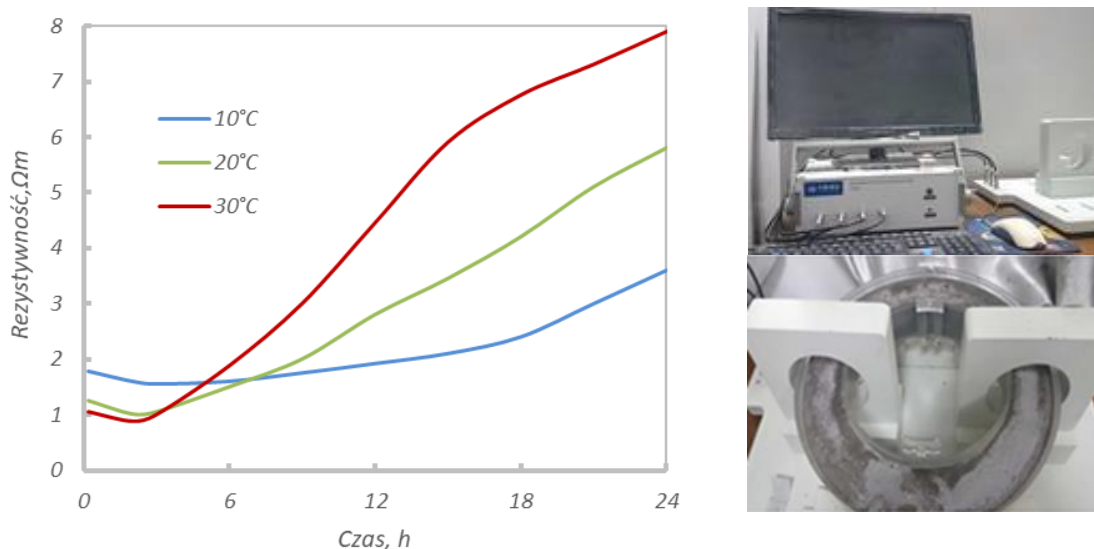
w którym: N_A - liczba aktywnych cząstek w układzie
 N_0 - ogólna liczba cząsteczek
 T - temperatura
 E_a - energia aktywacji



Rys. 2. Rozkłady energii cząstek w dwóch różnych temperaturach (Prawo Maxwella-Boltzmana)

Wraz ze wzrostem temperatury rośnie liczba cząstek, które są w stanie pokonać barierę energetyczną przy rozpuszczaniu. W rezultacie wraz ze wzrostem temperatury wzrasta rozpuszczalność faz cementowych. Proces rozpuszczania składa się z dwóch procesów cząstkowych endotermicznego niszczenia sieci krystalicznej i egzotermicznej hydratacji. Zgodnie z regułą przekory Le'Chatelier'a – Brauna wzrost temperatury w procesach endotermicznych powoduje wzrost stałej równowagi i stałej szybkości reakcji, stan równowagi przesuwa się w stronę produktów reakcji. Powoduje to, że w roztworze pojawia się większa ilość jonów. W wyższej temperaturze stopień hydratacji, czy ogólnie solwatacji jonów będzie się zmniejszał, gdyż wpływ temperatury na reakcję

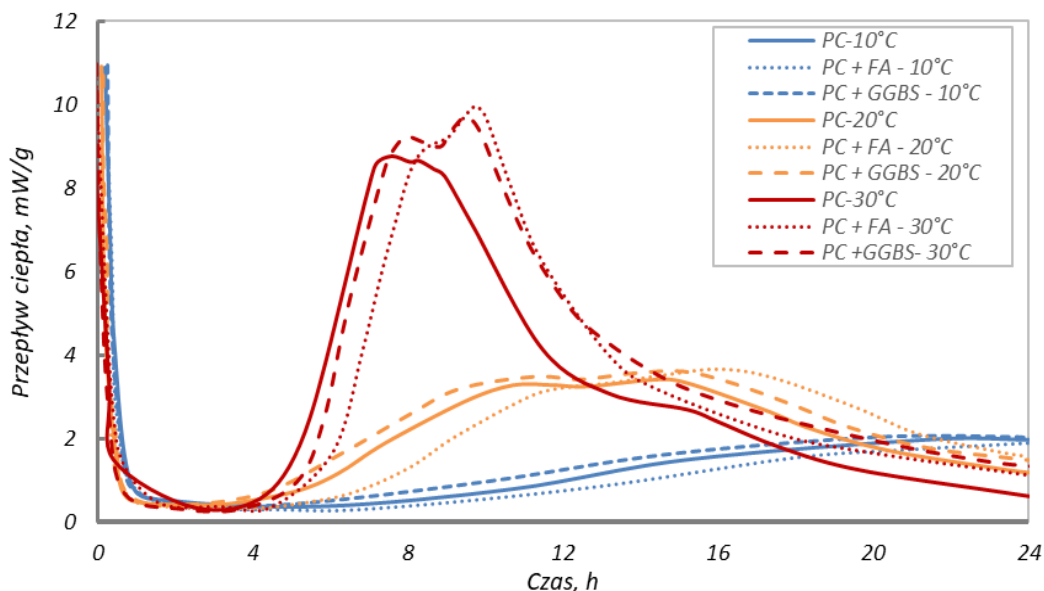
egzotermiczną objawia się zmniejszeniem stałej równowagi, przeniesieniem stałej równowagi w kierunku substratów i wzrostem stałej szybkości reakcji. Innymi słowy kluczowym będzie wpływ temperatury na rozpuszczalność faz cementowych która wzrasta wraz ze wzrostem temperatury. Zwiększa się tym samym stężenie reagentów co sprawia, że reakcja przyspiesza. Choć z reguły przekory można wysnuć wniosek przeciwny. W [5], [6] stosując obliczenia termodynamiczne wykazano bardzo dużą wrażliwość hydratyzującego zaczynu cementowego na temperaturę w której ten proces przebiega. Wrażliwość nie jest przypisana tylko ekstremalnym temperaturom właściwym procesom naporzania. Zaobserwowano również, że temperatury w zakresie 0-40°C prowadzą do znacznej redystrybucji anionów OH^- , SO_4^{2-} i CO_3^{2-} w fazach. Prowadzi to do zmian w stabilności produktów hydratacji, przez co zmiana temperatury hydratacji prowadzi zawsze do zmian ilościowych i jakościowych w strukturze zaczynu cementowego. Ma to swoje konsekwencje zarówno we wczesnej fazie, gdy mieszanki muszą mieć odpowiednią urabialność, jak i w fazie gdy kompozyt jest już ciałem stałym. Istotne są wtedy właściwości mechaniczne i trwałościowe. Należy pamiętać, że ujęcie termodynamiczne ujmuje końcowy stan reakcji, nie uwzględnia natomiast drogi dojścia do tego stanu. Wpływ temperatury w odniesieniu do zaczynu można najprościej badać określając czas początku i końca wiązania metodą Vicata, dochodząc do oczywistych wniosków, że wraz ze wzrostem temperatury szybciej one następują. Jak wykazano w [7] można również badać rezystywność twardniejących zaczynów cementowych – która wzrasta wraz z postępem reakcji hydratacji.



Rys. 3. Rezystywność elektryczna zaczynów cementowych w temperaturach 10, 20 i 30 °C w czasie 24 h (po lewej). Bezkontaktowy aparat do pomiaru oporności elektrycznej (po prawej) [7]

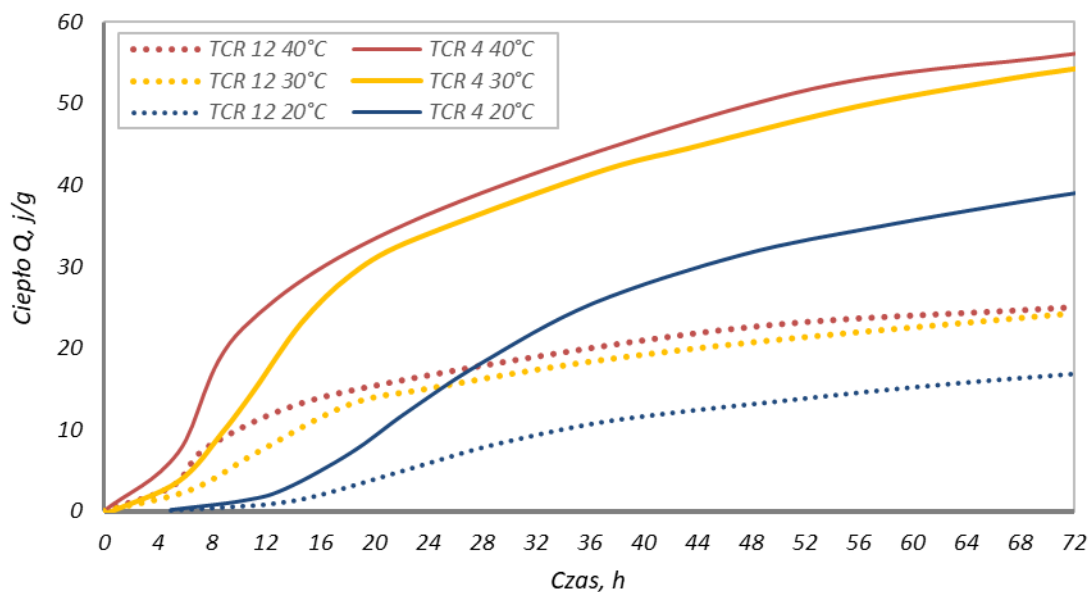
Przebieg reakcji hydratacji wygodnie jest obserwować za pomocą pomiarów mikrokalorymetrycznych. Są to pomiary prowadzone z reguły na zaczynach cementowych w kalorymetrach różnicowych. Szybkość reakcji hydratacji jest obrazowana przez ilość wydzielonego ciepła a sumaryczna ilość wydzielonego ciepła

obrazuje nam stopień hydratacji. Pomiary mikrokalorymetryczne uwidaczniają wyraźny związek szybkości reakcji hydratacji z temperaturą w jakiej ona zachodzi. Szybkość i stopień reakcji hydratacji wzrasta wraz ze wzrostem temperatury. Wpływ temperatury na reakcję wiązania cementu, a ściślej na efekty cieplne jej towarzyszące był tematem badań [8],[9]. Na wykresach przedstawionych za [8] na rysunku 4 widoczne są krzywe kalorymetryczne zaczynów cementowych z dodatkami mineralnymi. Były to popiół lotny (FA), żużel wielkopiecowy (GGBS). Badania przeprowadzono na zaczynach o $w/s=0,30$. Cement zastępowano masowo popiołem lotnym i żużlem w ilości 30 %. Zaczyny cementowe upłynnione były superplastyfikatorem o nie znanej bazie. Wyraźnie jest widoczny wpływ temperatury na reakcje hydratacji, skróceniu ulega okres indukcji, szybciej następuje moment w którym następuje maksymalny efekt cieplny, który rośnie wyraźnie wraz ze wzrostem temperatury, w której reakcja przebiegała. Niezależnie od temperatury po intensywnym pierwszym pikie następuje okres uśpienia, który nie wdając się w rozważania na temat wpływu stosowanych dodatków jest tym krótszy im wyższa temperatura.



Rys. 4. Krzywe kalorymetryczne zaczynów cementowych z dodatkami popiołu lotnego (FA), żużla wielkopiecowego (GGBS) [8]

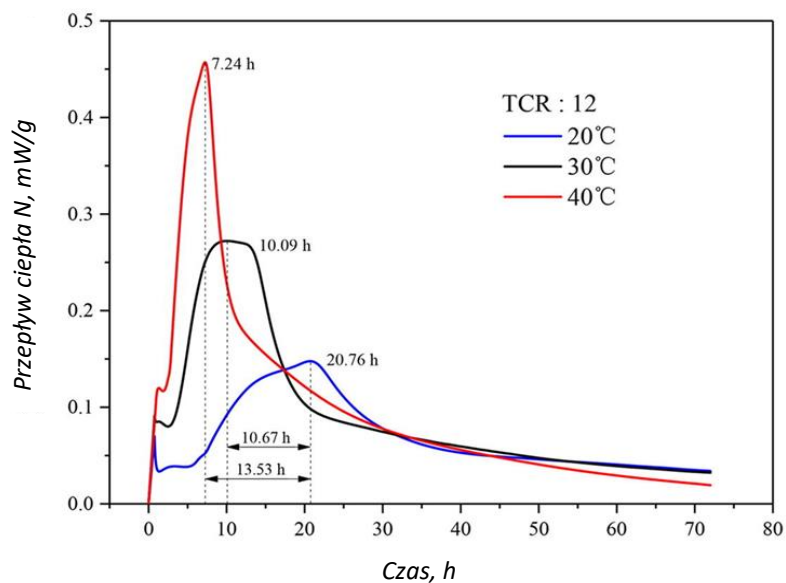
Podobne wyniki dotyczące wpływu temperatury na kinetykę reakcji hydratacji przedstawione są w [9]. Badano wpływ temperatury na ciepło hydratacji zaczynów cementowo pyłowych służących do wypełniania kopalnianych wyrobisk. Były to zaczyny o różnym stosunku pyłów do cementu (tailing cement ratio) równym 4,6,8,10 i 12. Odpowiada to stosunkom w/c równym 1,58, 2,20, 2,86, 3,43 i 4,14. Ciepło hydratacji określono w temperaturach 20,30 i 40 °C.



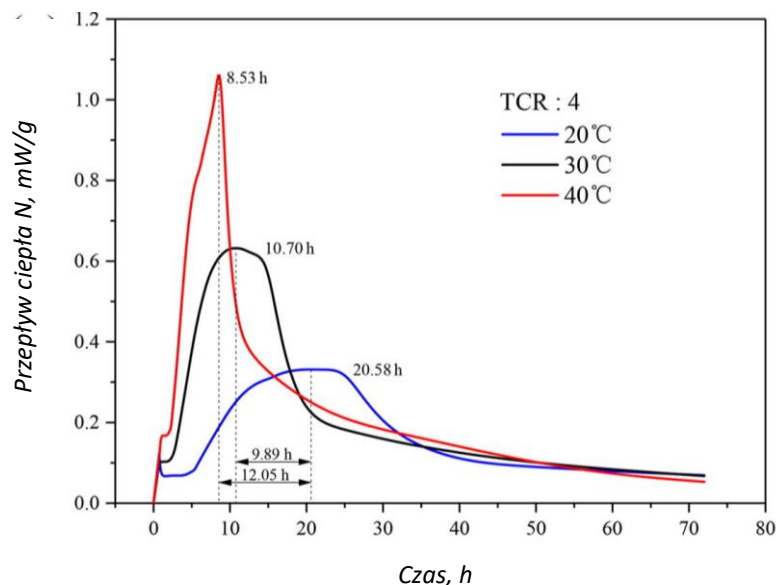
Rys. 5. Wpływ temperatury na ilość wydzielonego ciepła zaczynów cementowych o różnym stosunku pyłu do cementu (Tailings cement ratio) równym 4 i 12 [9]

Oczywistą konkluzją jest to, że kinetyka i ilość wydzielanego ciepła rośnie wraz ze wzrostem ilości cementu (dla mniejszych wielkości wskaźnika TCR lub mniejszego w/c). Okres uśpiania jest krótszy. Wzrost temperatury hydratacji zwiększa kinetykę wydzielania ciepła, przyspiesza moment w którym jest ona maksymalna (rys.5). Wzajemne relacje ilości ciepła i kinetyki jego wydzielania dla różnych wielkości TCR są zbliżone. Dla przykładu dla TCR równego 12 N_{max} w 40 °C jest 3 razy większy od N_{max} w 20 °C, podobnie jak dla zaczynów o TCR równym 4.

Prezentowane wyniki sugerują, że wpływ temperatury jest prawie niezależny od TCR.

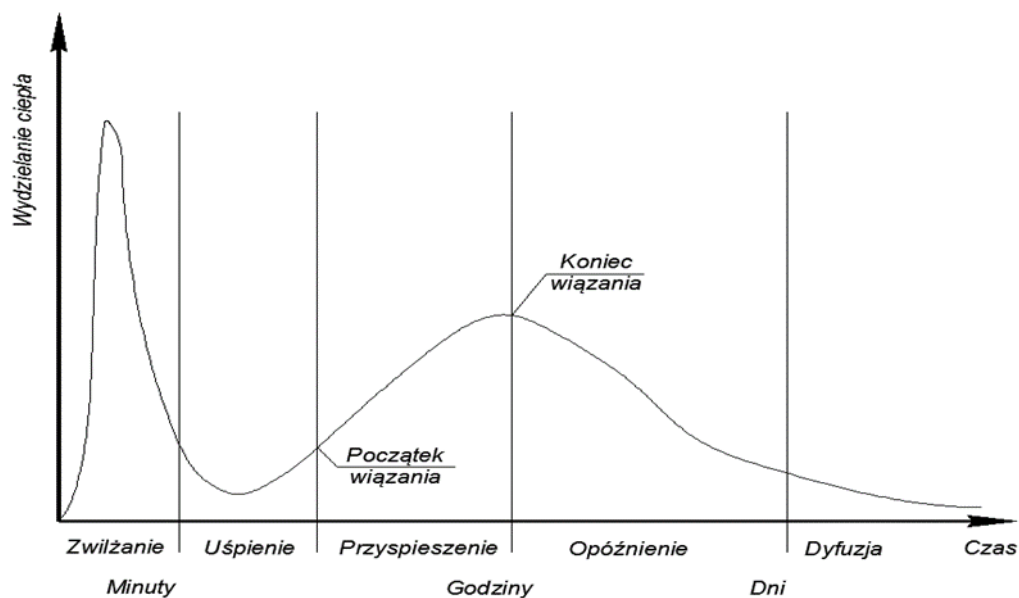


Rys. 6. Wpływ temperatury na przepływ ciepła N zaczynów cementowych o TCR=12



Rys. 7. Wpływ temperatury na przepływ ciepła N zaczynów cementowych o TCR=4

Widoczne na rys 4,5,6 wykresy są typowe dla przebiegu reakcji hydratacji. Można wyszczególnić na nich kilka etapów, które wyraźnie różnią się ilością i szybkością wydzielanego ciepła. Ogólna krzywą przepływu ciepła podczas hydratacji cementu przedstawia rys. 8.



Rys. 8. Krzywa mikrokalorymetryczna hydratacji cementu.

Za [10] na krzywej kalorymetrycznej wyróżnić można pięć okresów:

- I - intensywny pierwszy pik, któremu towarzyszy jednak mała ilość ciepła związany z ciepłem zwilżania - początkiem hydratacji
- II - okres uśpienia (indukcji), zahamowania wydzielania ciepła

- III - okres wzrastającej szybkości wydzielania ciepła
- IV - okres malejącej szybkości wydzielania ciepła
- V - okres bardzo małej szybkości wydzielania ciepła.

Pierwszy pik na wykresie wywołany jest ciepłem zwilżania wodą ziaren cementu i wczesnych reakcji w wyniku których powstaje żelowa otoczka i faza Aft. Za efekt termiczny widoczny w postaci drugiego pik odpowiada hydratacja C3S i wytworzenie fazy CSH i $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Trzeci pik to ponowna hydratacja glinianu trójwapniowego C3A wtedy na powierzchni tej fazy jest formowany etryngit w postaci igieł. Ostatni pik 4 jest związany z reakcją faz ferrytowych lub też z konwersją fazy Aft w AFm.

Największy udział w kreowaniu wyraźnego efektu cieplnego podczas zwilżania cementu mają alit i fazy glinianowe. Chemiczne analizy roztworu porowego przeprowadzone w [11] [12] [13] wykazały, że Alit rozpuszcza się kongruentnie bardzo szybko w pierwszych sekundach po kontakcie z wodą. Glinian trójwapniowy po kontakcie z wodą reaguje równie gwałtownie, w obecności źródła siarczanów etryngit jest głównym produktem początkowego stadium reakcji. Reakcja ta podobnie jak w przypadku alitu ulega szybkiemu zahamowaniu. Sprawą otwartą są mechanizmy wywołujące to spowolnienie. Powszechny pogląd, że to kryształ etryngitu formują na powierzchni C3A warstwę blokującą dostępu jonów i spowalniającą reakcję [14] [15] jest poddany w wątpliwość z uwagi na morfologię kryształów etryngitu, które według [16] [17] nie są w stanie wytworzyć szczelnej blokującej warstwy. Autorzy sugerują, że za opóźnienie reakcji C3A odpowiada adsorpcja jonów siarczanowych w miejscach defektów struktury faz glinianowych spowalniając tym samym proces ich rozpuszczania. Jakikolwiek mechanizm by nie był, istnieje zgoda co do tego, że to etryngit jest ostatecznie głównym produktem wczesnej fazy hydratacji glinianu trójwapniowego w obecności źródła siarczanów [16]. Obecność etryngitu odgrywa kluczową rolę w kształtowaniu właściwości reologicznych zaczynów cementowych [18].

Spowolnienie reakcji C3S przypisywane jest ciągłej warstwie hydratów formujących się na powierzchni ziaren, które spowalniają dalszą reakcję. Hipoteza o metastabilnej warstwie tworzonej przez CSH postawiona była stosunkowo dawno, zastosowanie metody nuklearnego rezonansu [19] pozwoliło znaleźć pośrednie dowody, że na powierzchni C3S tworzy się taka warstwa. Jej defekty pozwalają na migracje jonów. Jony OH^- mogą przenikać do wnętrza, jony wapnia z kolei mogą przenikać do roztworu. Koniec okresu indukcji a początek okresu przyspieszenia, jest tłumaczony rozerwaniem otoczki. Następuje ono z powodu ciśnienia jakie się pojawia z uwagi na to, że gęstość powstającej fazy CSH jest znacznie mniejsza niż krzemianu trójwapniowego.

Niektórzy badacze stawiają tezę, że za spowolnienie jest odpowiedzialna warstwa hydroksylowa [20] z której dysocjacja jonów zachodzi znacznie wolniej prowadząc do spowolnienia reakcji. Z tą warstwą Garrault i Nonat [21] wiążą delikatną równowagę pomiędzy rozpuszczaniem a stężeniem jonów w cieczy porowej, oraz wyraźny wpływ rodzaju jonów przesycających roztwór na pojawienie się lub rozwój defektów strukturalnych na powierzchniach faz cementowych.

Przedstawiony wyżej krótki opis hydratacji podstawowych faz cementu uwidacznia jak skomplikowaną jest reakcja wiązania spoiw opartych na klinkierze portlandzkim. Jest to proces bardzo wrażliwy na temperaturę. Wzrost temperatury prowadzi do szybszej reakcji co skutkuje szybszym sztywnieniem mieszanek co utrudnia prawidłowe ich wykorzystanie. Temperatura wpływa na hydratację w sensie nie tylko ilościowym, ale i jakościowym, co wywołuje istotne zmiany w działaniu domieszek chemicznych począwszy od plastyfikatorów i superplastyfikatorów po domieszki zwiększające lepkość. Kluczem do wyjaśnienia wpływu temperatury na działanie domieszek upłynniających jest stopień ich zaadsorbowania na powierzchniach hydratyzujących ziaren cementu. Na stopień adsorpcji wpływa wielkość potencjału ζ produktów hydratacji cementu. Generalnie jest tak aby domieszki upłynniające efektywnie dyspergowwały ziarna cementu w wodzie muszą zostać zaadsorbowane na ich powierzchniach. By to nastąpiło konieczne jest pojawienie się odpowiednich pól adsorpcji. Są to miejsca o dodatnim potencjale na których adsorbują domieszki chemiczne których łańcuchy główne mają potencjał ujemny. Za kluczowy uznaje się układ glinian trójwapniowy i źródło siarczanu wapnia a ściślej będące produktem ich reakcji etryngit i AFm. Anionowe łańcuchy domieszek chemicznych dobrze adsorbują na powierzchniach o dodatnim potencjale, a takim są obdarzone Aft i AFm [22] [23].

2.2 WPLYW TEMPERATURY NA PROCESY ADSORPCJI DOMIESZEK

2.2.1 CHARAKTERYSTYKA PROCESU ADSORPCJI

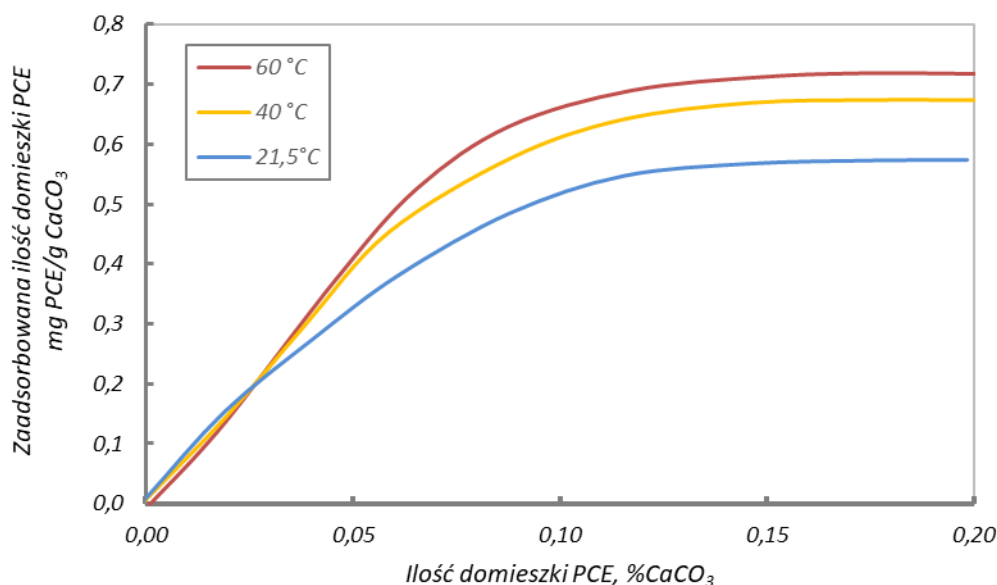
Adsorpcja jest procesem samorzutnym i wiąże się ze zmianą wartości funkcji termodynamicznych. Aby opisać efekty energetyczne związane z adsorpcją definiuje się szereg wielkości termodynamicznych takich jak entalpia swobodna adsorpcji, entropia adsorpcji czy entalpia adsorpcji. Współ określały one energię swobodną adsorpcji, którą wyraża równanie Gibbsa-Helmholtza:

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S$$

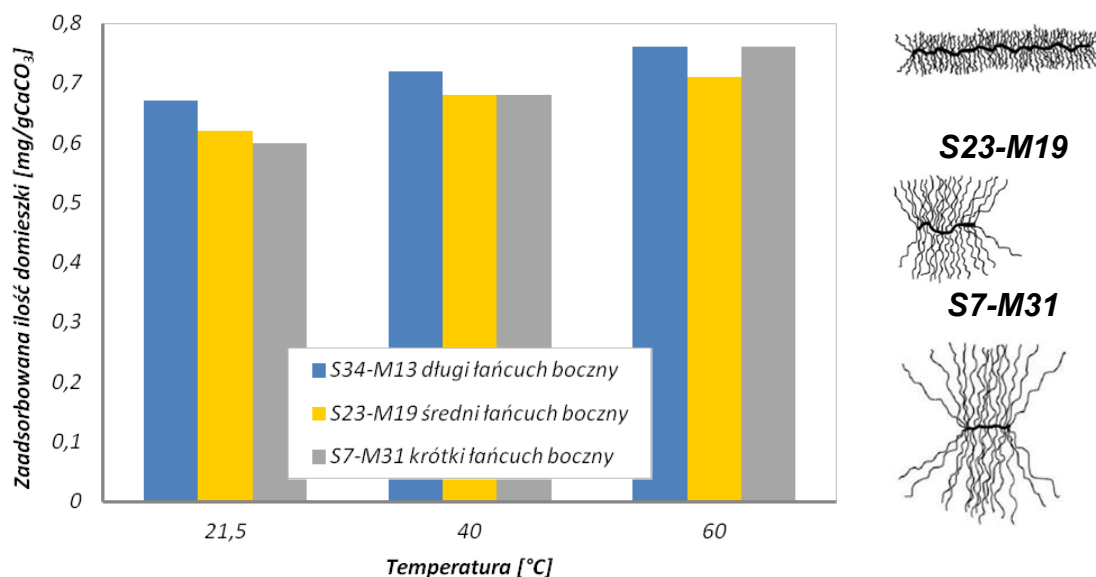
w którym: ΔG - zmiana energii swobodnej układu
 ΔH - zmiana entalpii układu
 T - bezwzględna temperatura układu
 ΔS - zmiana entropii układu

Według [24] adsorpcja domieszek na powierzchniach o przeciwnym znaku jest rezultatem działania czterech mechanizmów. Pierwszy z nich to przyciąganie między atomami na powierzchni mineralnej i cząstkami domieszki. Drugim jest odpychanie elektrostatyczne pomiędzy segmentami zaadsorbowanej już domieszki i domieszki pozostającej w roztworze. Trzecim jest zmniejszenie elastyczności konformacyjnej adsorbowanego polimeru, zmniejsza się wtedy entropia. Czwarty jest związany z pojawieniem się znacznej ilości jonów w roztworze, gdy domieszka jest adsorbowana poprzez wymianę jonową. Wtedy entropia układu ulega zwiększeniu. Pierwszy i czwarty

mechanizm ma charakter sprzyjający adsorpcji, drugi i trzeci natomiast działa przeciwko niej. Adsorpcja zachodzi wówczas, gdy mechanizmy sprzyjające adsorpcji będą silniejsze niż te które ją utrudniają. Wyznaczając wielkości funkcji stanu i dzięki nim zmianę energii swobodnej układu możemy określić skłonność domieszki do adsorpcji oraz co nią steruje czy będzie to zmiana entropii czy entalpii. Takie podejście prezentowane jest w [25]. Autorzy wyznaczyli wielkości entalpii i entropii adsorpcji domieszek PCE o różnej formacji na węglanie wapnia w roztworach o pH 9 i 12,6 bez i z dodatkiem jonów wapniowych. Wariant roztworu o pH 12,6 i 1g Ca²⁺/l ma symulować roztwór porowy zaczynu cementowego, a powierzchnia węglanu wapnia ma odpowiadać powierzchni klinkieru cementowego. Zasadniczym wnioskiem jest ten, że proces adsorpcji jest bardzo wrażliwy na zmianę pH roztworu i obecność dodatkowych jonów. Dzieje się tak dlatego, że zmianie ulegają entalpia i entropia adsorpcji, przez co ulega zmianie mechanizm wywołujący adsorpcję. Początkowo za adsorpcję odpowiada przyciąganie elektrostatyczne tym większe im bardziej będzie ujemna entalpia adsorpcji. Z biegiem czasu wraz z zapełnianiem się dostępnej powierzchni domieszką siły elektrostatyczne się zmniejszają (entalpia rośnie i proces staje się endotermiczny) i proces adsorpcji mógłby ulec zahamowaniu. Tak się jednak często nie dzieje, ponieważ w wyniku adsorpcji uwalniane są do roztworu jony, przez co zwiększa się entropia układu. Wzrost entropii napędza wtedy adsorpcję sprawiając, że energia swobodna w dalszym ciągu jest ujemna i proces adsorpcji dalej jest spontaniczny. Autorzy sugerują, że rzeczywistym zaczynie cementowym, którego roztwór porowy jest bardzo bogaty w różnorodne jony to entropia będzie w znacznej mierze napędzała adsorpcję. To z kolei sugeruje dużą temperaturową zależność adsorpcji. Tak w istocie jest, co jest widoczne na rysunku 8, przedstawiającym izotermy adsorpcji domieszki PCE określone w temperaturach 21,5, 40 i 60°C.



Rys. 9. Izotermy adsorpcji dla domieszki PCE S23-M19 na węglanie wapnia w roztworze o pH 12,6 z dodatkiem 1g/L Ca²⁺ w temperaturze 20,40 i 60 °C [24]

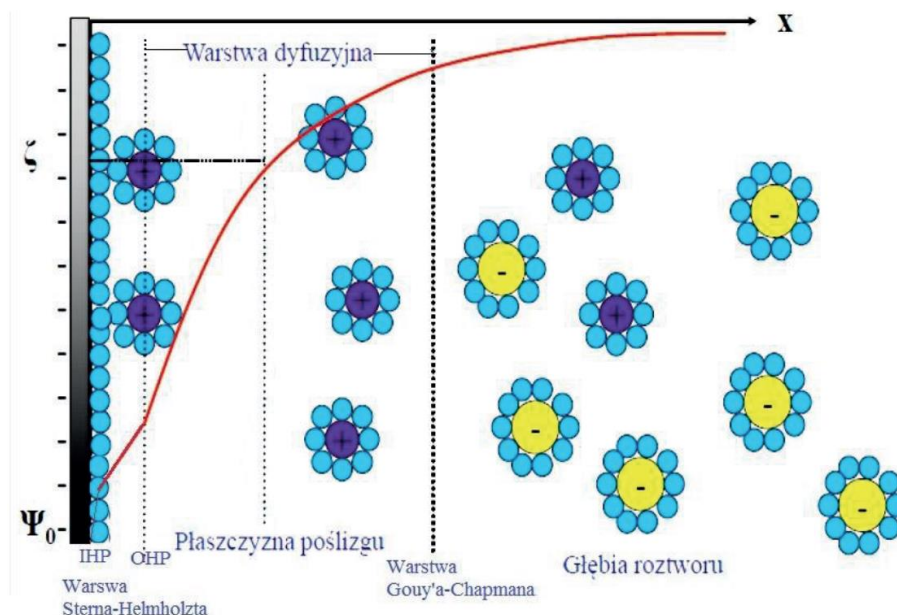


Rys. 10. Wpływ temperatury na masę zaadsorbowanej domieszki na podstawie [25]

Wspomniano wcześniej, że wzrost entropii układu jest czynnikiem napędzającym adsorpcję. Entropia układu jakim jest zaczyn cementowy również jest zależna od temperatury. Entropia wzrasta, bo wraz ze wzrostem temperatury pojawia się więcej obdarzonych większą energią jonów, poza tym wzrost temperatury sprawia, że energia swobodna ma bardziej ujemną wartość co proces adsorpcji ułatwia. Mnogość zmian zachodzących w zaczynie cementowym i ich bardzo duża wrażliwość na czynniki wpływające na reakcję hydratacji sprawiają, że efekt działania domieszki może być trudny do przewidzenia a priori. Ustawiczny rozwój domieszek chemicznych [26],[27],[28],[29],[30] tę sytuację jeszcze bardziej komplikuje wprowadzając kolejnych zmiennych do i tak bardzo dynamicznego układu jakim jest hydratyzujący zaczyn cementowy. Sugestia zawarta w [25], że w układzie rzeczywistego zaczynu cementowego siłą napędowa adsorpcji będzie głównie wzrost entropii może nie być do końca słuszna. Klinkier portlandzki wraz z innymi dodatkami mineralnymi jest układem polimineralnym, kształtowanie się ładunku powierzchniowego jest znacznie bardziej skomplikowane niż w przypadku stosunkowo prostego węgla wapnia zanurzonego w roztworze o pH 12,6 z dodatkiem jonów wapniowych. Dlatego też udział entalpii adsorpcji nie może być pomijany. Kluczem do oceny czy to entalpia adsorpcji odgrywa mniejszą lub większą rolę jest pomiar potencjału elektrokinetycznego ζ .

2.2.2 POTENCJAŁ ELEKTROKINETYCZNY I CZYNNIKI GO KSZTAŁTUJĄCE

Potencjał elektrokinetyczny ζ tworzy się na powierzchni ciała stałego zanurzonego w elektrolicie. Tworzy się na granicy poślizgu, czyli w miejscu, gdzie stykają się jony znajdujące się na powierzchni fazy stałej z jonami fazy płynnej (rys.11). Potencjał zeta jest miarą oddziaływania elektrostatycznego między cząstkami, które mogą się przemieszczać względem siebie.



Rys. 11. model podwójnej warstwy elektrycznej według Sterna Heilmoltza za [31]

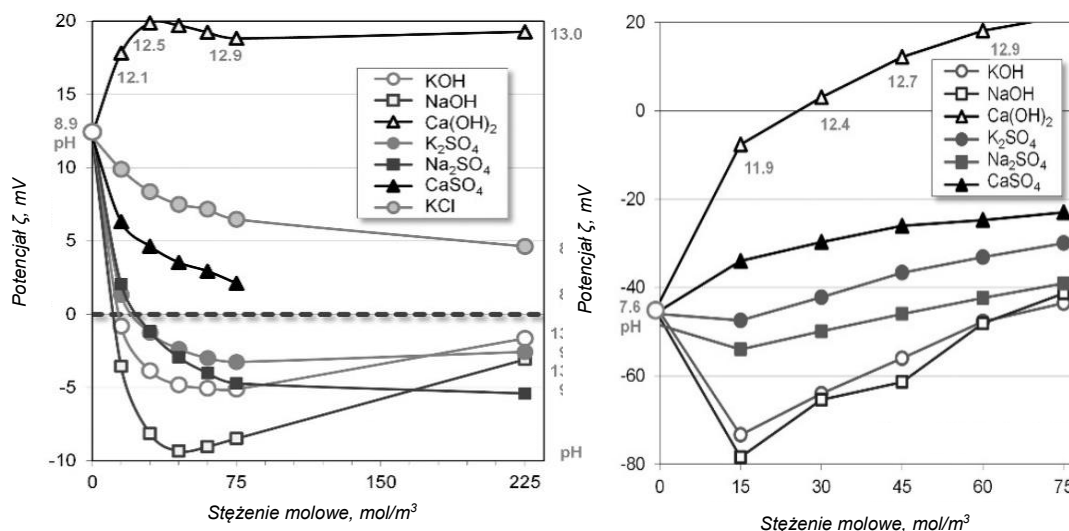
Potencjał zeta bardzo zależy od składu chemicznego rozpuszczalnika. Kluczowe są odczyn pH, rodzaj jonów w roztworze ich siła jonowa i wartościowość. Dlatego znajomość składu roztworu jest niezmiernie istotna, stąd również wynikają znaczne różnice w wielkościach potencjału zeta faz cementowych, produktów ich hydratacji i dodatków mineralnych wynikające z warunków przeprowadzania doświadczeń [22],[32],[33],[34],[35],[23]. Sugeruje to bardzo dużą wrażliwość procesu hydratacji na zmianę warunków, w których przebiega. W tabelicy 2 zestawiono wyniki badań potencjału elektrokinetycznego ζ faz klinkieru, hydratów i dodatków mineralnych używanych w technologii betonu.

Przyjęto się sądzić że fazy krzemianowe posiadają potencjał ujemny, a fazy glinianowe (C3A etryngit i monosiaraczany) dodatni w związku z czym za efekty upłynnienia odpowiedzialne będą procesy zachodzące pomiędzy fazami glinianowymi i domieszkami o anionowym charakterze [23],[23],[45]. W badaniach [46] wykazano, że w roztworze o składzie zbliżonym do rzeczywistego roztworu porowego potencjał elektrokinetyczny faz cementowych może przyjmować inne wartości. Powodem tego są jony pojawiające się w zaczynie cementowym wprowadzające inwersję potencjału, dlatego też adsorpcja domieszek może zachodzić na wszystkich fazach cementu [47]. Inwersja potencjału zachodzi również na powierzchniach dodatków mineralnych, dlatego i one wykazują się różnym powinowactwem względem domieszek [42]. Powinowactwo faz cementowych i dodatków mineralnych względem domieszek jest konsekwencją potencjału zeta a jego wielkość (wartość) jest bardzo zależna od składu roztworu w jakim potencjał się kształtuje.

Tablica 2. Potencjał zeta faz klinkierowych, hydratów i dodatków mineralnych

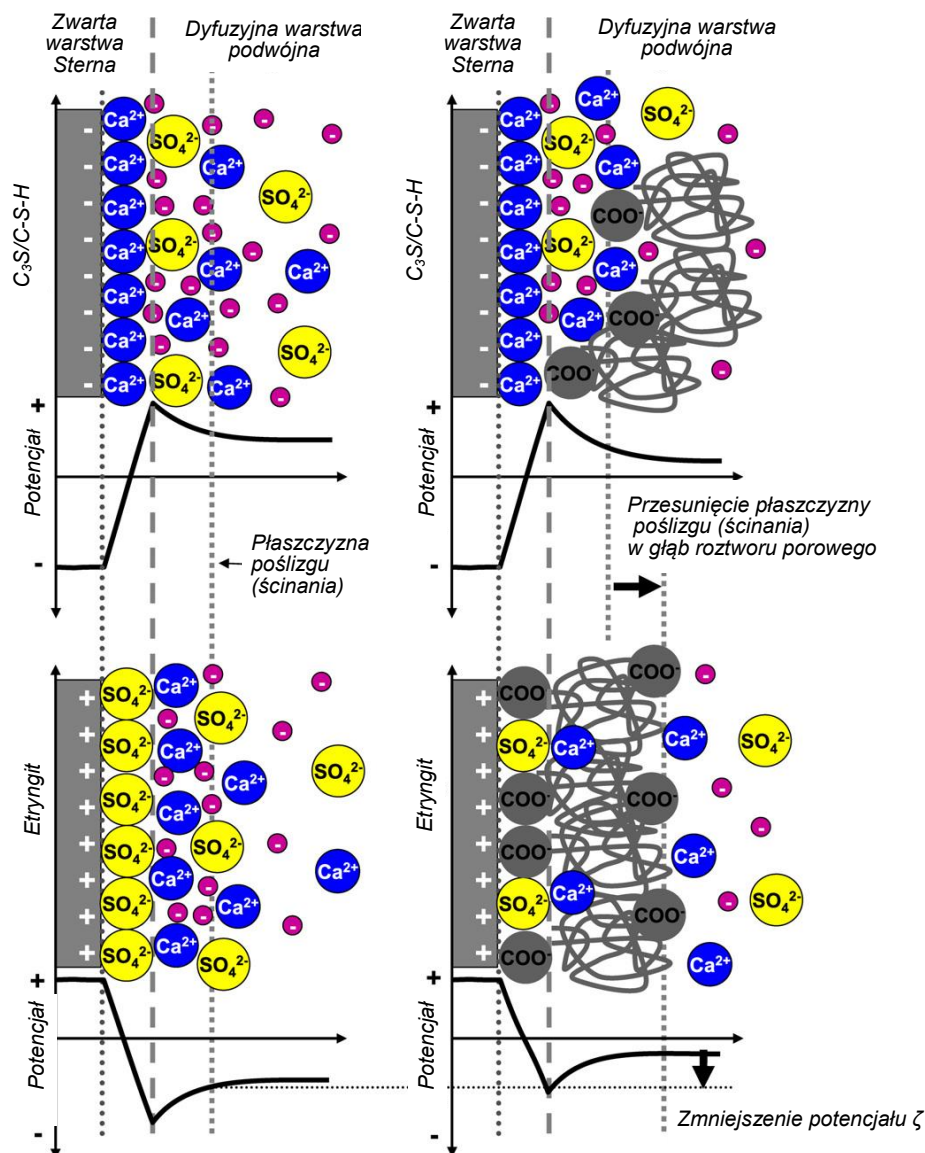
Źródło	Roztwór	CEM I 42,5 R	Fazy klinkieru				Hydraty				Dodatki mineralne						
			C3S	C2S	C3A	C4AF	GIPS	CSH	CH	Etryngit	PLW	PLK	ŻW	MW	MQ		
K. Suzuki et al. [36]	10 mmol/L Ca (OH) ₂		30 do 50														
Chen i Mehta [33]	H ₂ O +1 mmol/L Ca (OH) ₂										-11,6						
Nachbaur et al. [34]	0,02 mmol CaO		-35						-40								
	4 mmol/L CaO		20						30								
Vialiiis-Terisse et al.[37]	>2mmol/L CaO								+								
	<2mmol/L CaO								-								
Yoshioka et al. [23]	H ₂ O		-5	-9	10	5											
Peng et al. [38]	Woda/gips=0,63						20										
Pointeau et al. [39]																	
Hirsch [40]								-0,06		-4,40	4,15						
Zhang et al.[41]	20 mmol/L Ca (OH) ₂ i 50 mmol/L K ₂ SO ₄	-7,3										-8,8	-9,5	-12,4	20,2		
Lowke i Gehlen [42]	H ₂ O														12,2	-45,9	
	H ₂ O + 45 mmol/L Ca (OH) ₂														18,9	14,6	
	H ₂ O + 45 mmol /L CaSO ₄														3,4	-28,2	
	H ₂ O + 45 mmol/L NaOH														-9,3	-61,2	
	H ₂ O + 45 mmol/L KOH														-4,8	-58,3	
	H ₂ O wyekstrachowana z zaczynu cementowego														-3,3	-2,7	-5,2
Pourchet et al. [43]	H ₂ O + 0 mmol /L SO ₄ ²⁻ +3 mmol /L Ca ²⁺															18,0	
	H ₂ O + 18,5 mmol /L SO ₄ ²⁻ +3 mmol /L Ca ²⁺															-2	
Medala et al. [44]	H ₂ O + 0 mmol /L SO ₄ ²⁻ +3 mmol /L Ca ²⁺										26,5						
	H ₂ O + 18,5 mmol /L SO ₄ ²⁻ +3 mmol /L Ca ²⁺										-17,5						

PLW-popiół lotny wapienny, PLK-popiół lotny krzemionkowy, ŻW-żużel wielkopiecowy, MW-mączka wapienna, MQ-mączka kwarcowa.



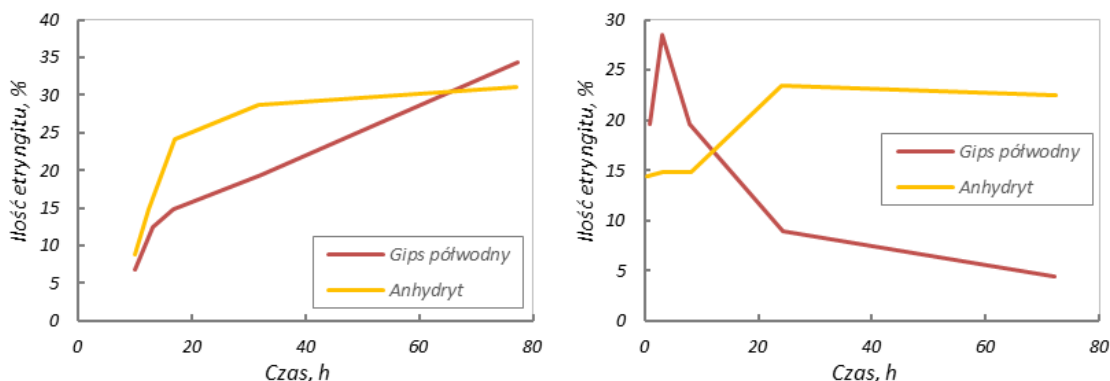
Rys. 12. Zmiana potencjału ζ mączki wapiennej (po lewej) i kwarcowej (po prawej) w zależności od rodzaju i stężenia roztworu [42]

Rysunek 13 przedstawia schematycznie proces inwersji potencjału zeta C3S/CSH oraz ettryngitu w obecności domieszki i bez niej. Pojawiające się w wyniku rozpuszczania jony SO_4^{2-} , Ca^{2+} pokrywają właściwe sobie powierzchnie, prowadząc do zmiany potencjału. Dzięki temu domieszka adsorbuje również na C3S/CSH, ale na etryngicie i fazie C3A proces adsorpcji nastąpi najszybciej. Szybkość z jaką proces inwersji potencjału się odbywa powinna być zależna od temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury wzrasta kinetyka rozpuszczania. Temperatura wpływa na rozpuszczalność związków będących źródłem jonów wprowadzających inwersję potencjału. W przypadku cementów źródłem tych jonów są przede wszystkim regulatory wiązania. Ta temperaturowa zależność nie jest jednoznaczna. Rozpuszczalność gipsu półwodnego maleje wraz ze wzrostem temperatury, podobnie jak anhydrytu i tlenku wapnia. Gips wykazuje w zakresie temperatur 0-50°C niewielki wzrost rozpuszczalności w wodzie. Gips w suchym cemencie nie występuje, jest on fazą hydratową tworzącą się w podczas pierwszego kontaktu z cementu z wodą. Jednak o ile rozpuszczalność anhydrytu, gipsu półwodnego i tlenku wapnia jest zbliżona to rozpuszczalność gipsów półwodnych jest wyraźnie niższa w zakresie temperatur 0-50°C.



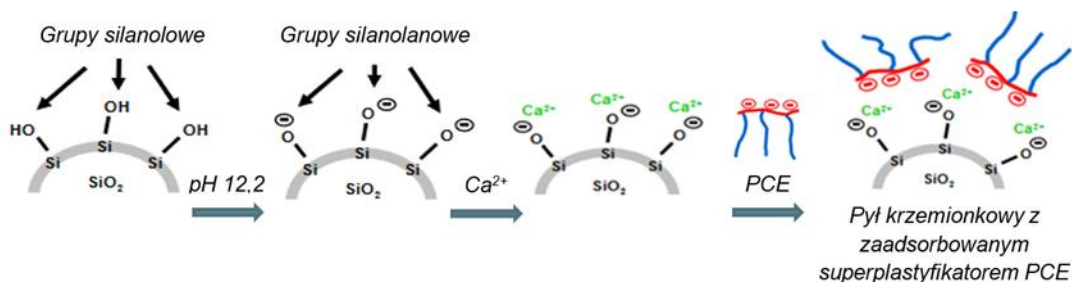
Rys. 13. Schematyczne ujęcie powierzchni C3S i CSH (góra) i etryngitu (dół) w interakcji z syntetycznym roztworem porowym bez (lewa kolumna) i w obecności domieszki PCE (prawa kolumna) [22]

Rozpuszczalność i szybkość rozpuszczania związków używanych jako regulatory wiązania ma swoje konsekwencje dla właściwości zaczynów cementowych, które są kształtowane przez ilość etryngitu. Ograniczając rozważania do efektów działania domieszek, powierzchnia pól adsorpcji będzie związana z jego ilością. Według [46] we wczesnej fazie reakcji hydratacji ilość etryngitu rośnie wraz ze wzrostem temperatury, w której reakcja hydratacji przebiega. Jest również zależna od rodzaju zastosowanego regulatora wiązania. Wpływ ten jest wyraźny w temperaturze 20 °C, kiedy to etryngitu w początkowej fazie powstaje znacznie więcej, gdy regulatorem wiązania jest gips półwodny zamiast anhydrytu (rys.14).



Rys. 14. Zawartość etryngitu w zaczynie cementowym z anhydrytem lub gipsem półwodnym jako regulatorem wiązania w temperaturze 0°C (po prawej) i 20 °C (po lewej) [46].

Wykorzystywana zwłaszcza w technologii betonów wysokowartościowych mikrokrzemionka w alkalicznym środowisku ma anionowy charakter, pochodzący od deprotonowanych grup silanolanowych. W środowisku zaczynu cementowego dochodzi do inwersji potencjału mikrokrzemionki w wyniku przyłączenia jonów wapnia Ca^{2+} , przez co mikrokrzemionka również staje się dogodnym miejscem do adsorpcji domieszki [48],[49]. Z uwagi na jej znacznie większą powierzchnię właściwą niż cementu, zaczyny cementowe z dodatkiem mikrokrzemionki wymagają większej ilości domieszek. Efekt inwersji potencjału pyłu krzemionkowego wykorzystano w [50]. Autorzy stosując sekwencję mieszania zaczynu: roztwór $Ca(OH)_2 + SF$ następnie domieszka PCE, woda i cement uzyskali znacznie lepsze upłynnienie i właściwości mechaniczne niż miało to miejsce, gdy nie był stosowany roztwór wodorotlenku wapnia. Pozytywny wpływ na wytrzymałość stwardniałego zaczynu cementowego tłumaczony jest zarodkowaniem fazy CSH na powierzchni mikrokrzemionki, które jest wprowadzone przez jony wapnia. Korzystne działanie jonów wapnia, jako pewnego rodzaju pomostu dla domieszki dzięki któremu może adsorbować na powierzchniach o mniejszej wobec niej powinowatości, może nie nastąpić bądź może być utrudnione w rzeczywistym zaczynie cementowym [51]. Gdzie obecność znacznej ilości jonów może powodować ich chelatowanie przez łańcuchy domieszki, przez co i one mogą być poddane inwersji potencjału. Domieszka nie adsorbując nie wzbudza blokady sterycznej. Zawada steryczna jest najskuteczniejszym mechanizmem deflokacji zaczynów cementowych.

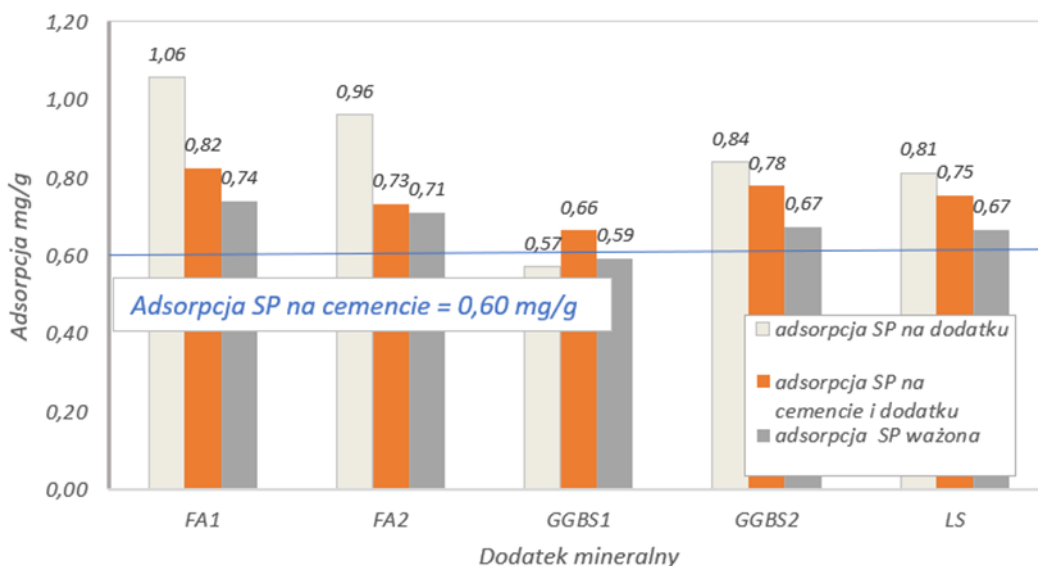


Rys. 15. Schemat inwersji potencjału pyłu krzemionkowego [50]

Dane w tabelicy 2 jednoznacznie wskazują, że potencjał dodatków mineralnych w środowisku zaczynu cementowego może się zmieniać w dość szerokim zakresie. Co sprawia, że trudno przewidzieć, który dodatek mineralny będzie np. polepszał urabialność mieszanek w interakcji z superplastyfikatorem. Co więcej dodatki mineralne są często mielone w celu osiągnięcia dużych powierzchni właściwych, co sprawia, że ich aktywność pucolanowa lub hydrauliczna wzrasta. Tym samym nie tylko wielkość potencjału, ale i powierzchnia determinowała będzie adsorpcję domieszki. O tym, że proces inwersji potencjału powierzchni dodatków mineralnych zachodzi świadczą wyniki badań [41] [42] [52] [50]. W [41] Określono adsorpcje domieszki PCE w dwojaki sposób. Najpierw z wodnej zawiesiny o stosunku wody do proszku 1:3, a później środowiskiem był zaczyn cementowy, w którym część cementu zastąpiono dodatkiem w ilości 30 %. Cechy fizyczne cementu i dodatków przedstawia tabela 3. Potencjał zeta określony był w roztworze symulującym ciecz porową w zaczynie cementowym. Był to roztwór składający się z 20 mmol/L Ca(OH)₂ i 50 mmol/L K₂SO₄

Tabela 3. Właściwości cementu i dodatków mineralnych badanych w [41]

Właściwość	CEM I 42, R	Popiół lotny		Żużel wielkopieczowy		Mączka wapienna
		wapienny	krzemionkowy	1	2	
Gęstość, g /cm ³	3,13	2,35	2,26	2,85	2,81	2,70
Potencjał ζ, mV	-7,3	-8,8	-9,5	-12,4	-10,8	20,2
Powierzchnia właściwa, m ² /kg	327,4	672,6	483,5	419,9	410,4	366
Powierzchnia właściwa, m ² /cm ³	1,026	1,581	1,094	1,197	1,153	0,988

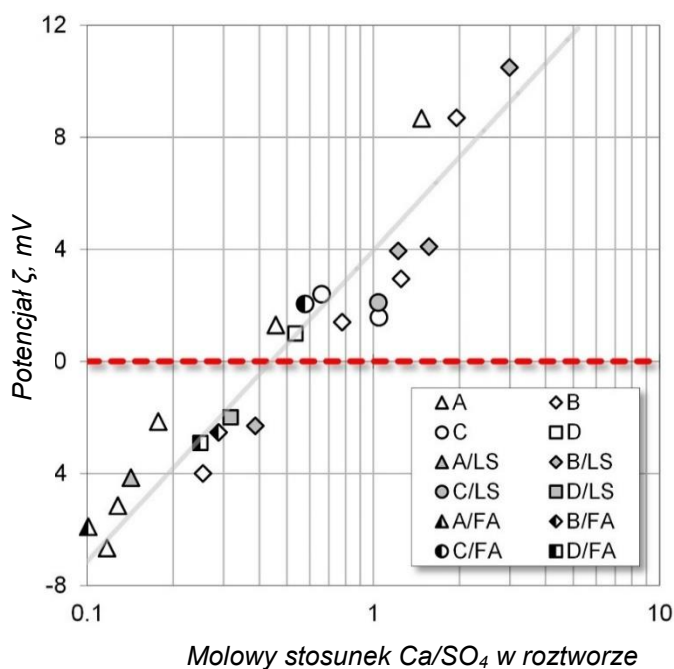


Rys. 16. Adsorpcja domieszki upłynniającej PCE na dodatkach mineralnych [41]

Wyniki badań potencjału Sterna sugerują, że wszystkie dodatki oprócz mączki wapiennej będą wykazywały niskie powinowactwo wobec anionowej domieszki upłynniającej. Ich potencjały zeta są bardziej ujemne niż cementu, a wyniki badań przedstawione na rys 16

wskazują, że adsorbują domieszkę lepiej niż cement (poza żużlem GGBS1). Zapewne odgrywa tutaj rolę większa powierzchnia właściwa dodatków. Adsorpcja określona w zaczynach cementowych z objętościowym zastąpieniem 30 % cementu dodatkami jest zawsze większa niż adsorpcja domieszki na samym cemencie. Adsorpcja wyliczona jako średnia ważona jest niższa niż ta uzyskana doświadczalnie. Według autorów jest to związane z tym, że jony pojawiające się zaczynie cementowym zmieniają potencjał zeta, promując adsorpcję.

Szereg dodatków mineralnych takich jak popioły lotne krzemionkowe, mączka kwarcowa czy mielony kamień wapienny, wykazuje bardzo dużą zmienność potencjału zeta w zależności od roztworu w jakim są zanurzone [42]. W środowisku rzeczywistego zaczynu cementowego wykazują one zbliżone wielkości potencjału zeta. Spowodowane jest to również inwersją potencjału. Mogą za to odpowiadać zarówno jony wapnia jak i jony siarczanowe, adsorbując na odpowiednich sobie miejscach. Potencjał mielonego kamienia wapiennego i popiołu lotnego krzemionkowego w środowisku zaczynu cementowego jest zależny od relacji Ca/SO_4 , która jest zależna od rodzaju cementu ale i od warunków w jakich przebiega hydratacja. Z wykresu na rys 17 wynika, że potencjał zeta badanych zawiesin wyraźnie wzrasta wraz z logarytmem stosunku Ca/SO_4 . Rośnie wraz ze wzrostem ilości kationów wapnia a maleje gdy więcej będzie w roztworze anionów siarczanowych.



Rys. 17. Potencjał zeta w zależności od stosunku molowego Ca/SO_4 w fazie wodnej różnych zawiesin cementów portlandzkich (A, B, C, D) i cementów z dodatkiem mączki wapiennej LS i popiołów lotnych krzemionkowych FA. Symbole otwarte: zawiesiny cementowe. Symbole szare: zaczyny cementowe z mączką wapienną. Symbole czarno-białe: zaczyny cementowe z popiołem lotnym krzemionkowym [42]

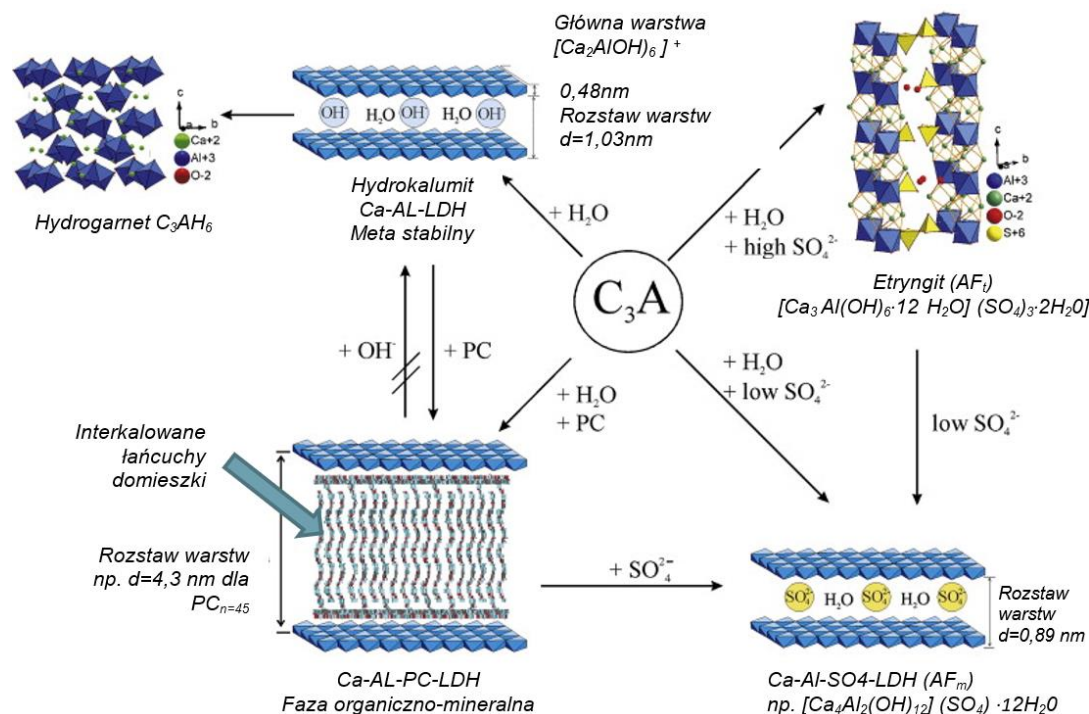
W rzeczywistości potencjał Sterna zależy od właściwości wczesnych produktów hydratacji zgromadzonych na powierzchniach cząstek oraz od adsorpcji jonów nieorganicznych dostarczonych przez cement. Można go oszacować na podstawie stosunku Ca/SO_4 w roztworze. Autorzy zauważyli również, że potencjał zeta zawiesin cementowych wzrasta wraz ze wzrostem w/c. Generalizując, wykazano, że stosunek stężenia jonów wapniowych do siarczanowych w fazie wodnej decyduje o potencjale zeta cząstek w zawiesinach czystego cementu portlandzkiego, jak również w zawiesinach zawierających cement portlandzki i dodatki mineralne.

Proces inwersji potencjału czy mostkowanie może następować w tylko w pewnym zakresie stężeń jonów, zależały będą również od ładunku i struktury domieszki a także od warunków roztwarzania [53]. Wspomniane warunki roztwarzania, są bardzo zależne od temperatury. Temperatura wpływając na kinetykę rozpuszczania, na rozpuszczalność faz cementowych, regulatorów wiązania, dodatków mineralnych wpływa na stężenia poszczególnych jonów w zaczynie cementowym, a to powoduje zmiany w układzie jonów wywołujących inwersję. W przypadku domieszek o grzebieniowej budowie jony wapnia mogą wywołać wielowarstwową adsorpcję domieszki co jest sygnalizowane w [47]. Tłumaczone jest to tym, że jony wapnia Ca^{2+} ulegają kompleksowaniu z grupami COO^- łańcucha domieszki dzięki czemu powstać może kolejna warstwa adsorpcyjna. Domieszka zaadsorbowana w drugiej warstwie nie przyczynia się do zwiększenia płynności zaczynu cementowego, ale będzie odpowiadała za utrzymanie efektu upłynnienia co widoczne jest po znacznie wydłużonym okresie indukcji. Wpływ obecności jonów siarczanowych na efektywność działania domieszek jest potwierdzony w [54]. Jony te pojawiające się w zaczynie cementowym powodują one zmniejszenie adsorpcji superplastyfikatorów PCE. Ich szybkość pojawiania się w roztworze porowym zaczynu cementowego jest zależna m.in. od temperatury. Ich źródłem w cemencie są siarczany alkaliczne oraz regulator wiązania w postaci anhydrytu lub półwodzianu gipsu. Najszybciej pojawiają się siarczany pochodzące z rozpuszczania regulatora wiązania i jeśli pozostaną w fazie wodnej mogą powodować zmniejszenie adsorpcji superplastyfikatora. To jest powodem, dla którego domieszki wykazują większą skuteczność, gdy są dozowane z opóźnieniem. Ten efekt jest szczególnie wyraźny dla domieszek starszej generacji, domieszki o budowie grzebieniowej są na moment dozowania mniej wrażliwe [55]. Z obecnością siarczanów jest związany proces interkalacji inaczej zwany chemisorpcją.

2.2.3 PROCESY INTERKALACJI

Chemisorpcja jest niekorzystnym zjawiskiem które powoduje konieczność dozowania większej ilości domieszek. Domieszka w jej wyniku tworzy organiczno mineralne fazy na powierzchni glinianu trójwapniowego dochodzi do tego w chwili gdy w roztworze jest niewystarczająca ilość jonów siarczanowych. Gdy w roztworze pojawiają się wystarczające ilości siarczanów, których źródłem są gips lub alkalia to na C3A pojawia się faza Afm lub Aft [56] [55]. Na tych fazach adsorbują superplastyfikatory i interkalacja domieszki nie zachodzi. Tutaj dotykamy problemu kompatybilności

domieszki z cementem a ściślej rzecz ujmując z C3A i etryngitem, które są kluczowe w tym aspekcie [57]. Nie korzystnym z punktu widzenia efektywności domieszek upłynniających zjawiskiem jest chemisorpcja. W odróżnieniu do adsorpcji powierzchniowej nie skutkuje polepszeniem płynności zawiesin, ale odpowiada za znacznie większą ilość domieszki potrzebną do uzyskania założonego stopnia dyspersji. Stosowane w cementach wieloskładnikowych dodatki w postaci mielonego kamienia wapiennego czy kalcynowanej gliny, często powodują problemy w działaniu domieszek, które są optymalizowane dla cementu portlandzkiego. Odpowiednia formuła domieszki sprawia, że również mogą one być adsorbowane na cząstkach materiałów ilastych i wapiennych [58] bez negatywnej interkalacji. Tutaj należy zauważyć, że sama adsorpcja domieszki nie gwarantuje dobrego jej działania. Określenie ilości zaadsorbowanej domieszki na przykład metodą TOC nie daje możliwości rozróżnienia czy jest to adsorpcja powierzchniowa skutkująca dobrą zawadą steryczną czy jest to interkalacja, skutkująca mniejszą efektywnością superplastyfikatora [59]. Zagadnienie chemisorpcji badane było przez Planka et al. [56] [60] [55]. Autorzy określają dwa różne mechanizmy interkalacji łańcuchów domieszki polikarboksylowej. Pierwszy to bezpośrednia synteza hydratyzującego glinianu trójwapniowego i domieszki. Drugi to przebiegający z udziałem hydratów glinianu wapnia jako prekursorów, które ulegają wymianie anionowej z domieszką, uwalniając pierwotne interkalowane aniony OH⁻. Ale co najważniejsze interkalacja jest możliwa tylko w układach „niewysiarczonych”, gdzie dostępność siarczanów jest mniejsza niż wymagana do ilościowej konwersji całego obecnego glinianu trójwapniowego do monosiarczanu i/lub etryngitu.



Rys. 18. Schematyczne przedstawienie potencjalnych schematów reakcji hydratacji C3A przy różnych stężeniach SO₄²⁻ oraz w obecności i przy braku superplastyfikatora PC [55]

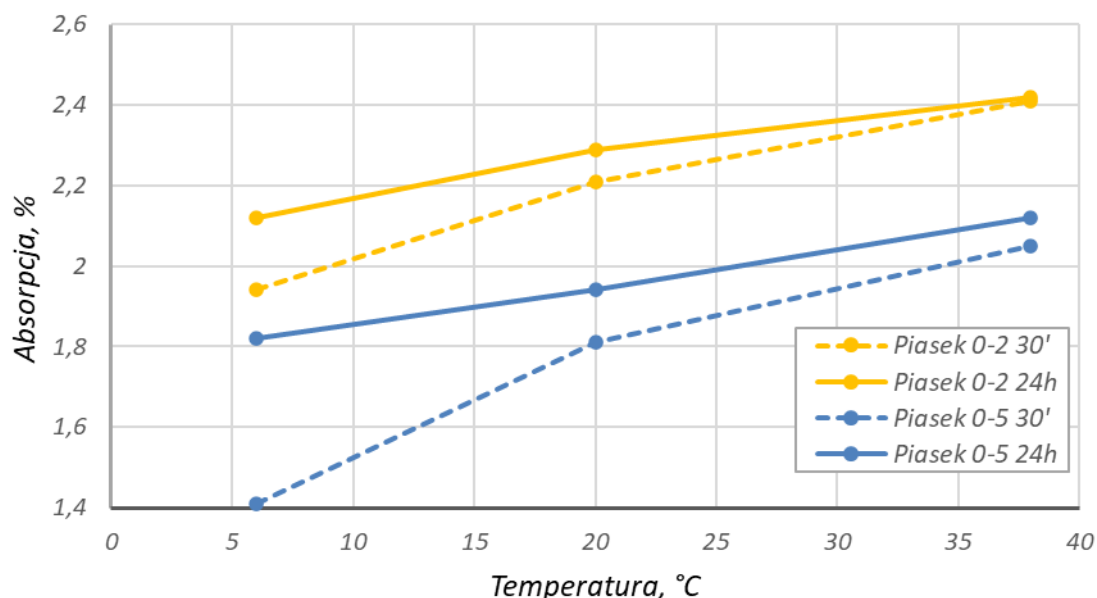
Wyniki uzyskane w odniesieniu do czystego glinianu trójwapniowego znalazły potwierdzenie w przypadku cementów portlandzkich CEM I [55]. Co szczególnie

interesujące by interkalacja nie zachodziła konieczna jest właściwa relacja ilościowa siarczanów alkalicznych SO_4^{2-} i C3A, jeśli stosunek molowy alk. $SO_4^{2-} / C3A \geq 2$ to nie korzystny efekt chemisorpcji nie nastąpi. Jeśli będzie mniejszy to domieszka będzie interkalowana tym bardziej im krótsze będą jej łańcuchy boczne. W blokowaniu chemisorpcji domieszek kluczową rolę odgrywają właśnie siarczany alkaliczne, a nie całkowita zawartość siarczanów w cemencie. Jest to związane z tym, że siarczany alkaliczne rozpuszczają się znacznie szybciej niż siarczany wapnia, które stosowane są jako regulatory wiązania. Zaczyny z cementów w których ilość siarczanów alkalicznych i glinianu trójwapniowego jest taka, że stosunek molowy alk $SO_4^{2-}/C3A > 2$, nie wykazują różnic w średnicach rozplywu przy opóźnionym i wczesnym dozowaniu domieszek upłynniających.

2.3 WPLYW TEMPERATURY NA PROCESY ABSORPCJI WODY PRZEZ KRUSZYWO I PAROWANIE WODY

Wpływ temperatury na proces parowania wody jest rozpoznawany przez nas w niemalże intuicyjny sposób. Rzeczą oczywistą jest stwierdzenie, że ze wzrostem temperatur prędkość parowania wody będzie rosła. Parowanie jest procesem zachodzącym na granicy fazy ciekłej i gazowej, cząsteczki wody po osiągnięciu jakiegoś poziomu energetycznego, będą przechodziły w stan gazowy. Następstwem jest zmniejszenie masy wody w stanie ciekłym i obniżenie jej temperatury. Wpływ temperatury na parowanie wody z zaczynu, jest zapewne w pewnym stopniu zmniejszony ze względu na to, że zaczyn cementowy jest heterogenicznym podlegającym ciągłym zmianom układem. W układzie tym woda jest wiązana fizycznie i chemicznie z powierzchnią ziaren cementu i z jonami pojawiającymi się w roztworze. Również związki powierzchniowo czynne jakimi są np. superplastyfikatory nie pozostają bez wpływu na kinetykę parowania wody [61]. Mnogość czynników kształtujących kinetykę parowania wody z mieszanki betonowej sugeruje by poprzestać jedynie na jakościowej charakterystyce wpływu temperatury, bez doszukiwania się ilościowych zależności.

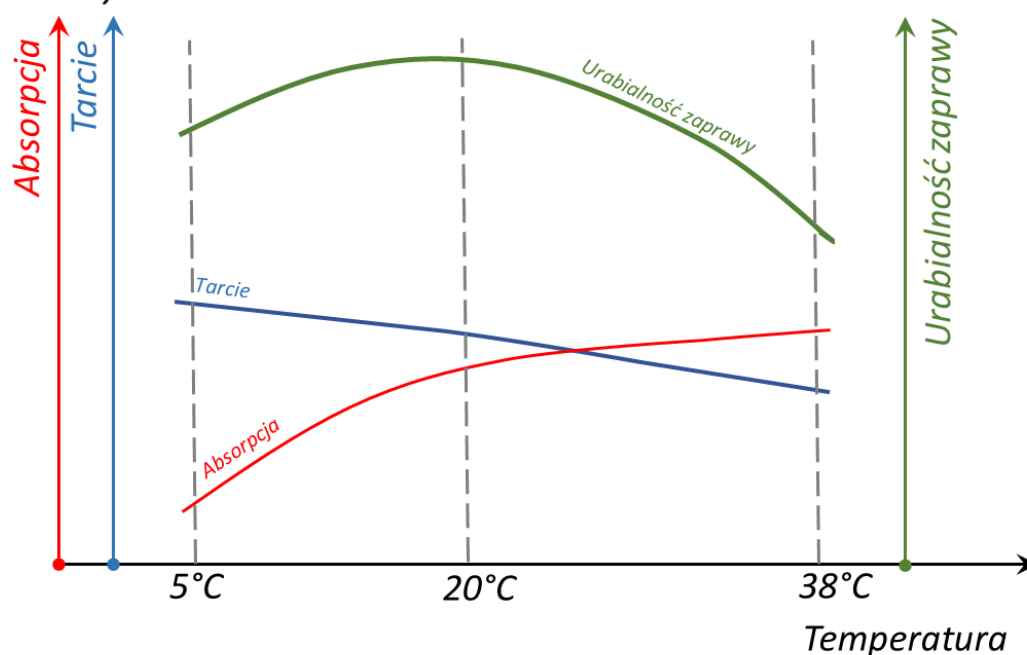
W opozycji do parowania wody z mieszanki, jest absorpcja wody przez kruszywo. W opozycji dlatego, że zachodzi na granicy ciecz ciało stałe i nie powoduje zmniejszenia masy wody w mieszance, choć rzeczywisty wskaźnik w/c ulega z powodu tej absorpcji zmniejszeniu. Norma PN-EN 206:2014 wprowadza pojęcie wskaźnika w/c pod postacią w_{eff}/c . Ilość wody w_{eff} jest definiowana jako różnica pomiędzy ilością wody wprowadzonej do mieszanki a ilością wody zaabsorbowanej przez kruszywo. Aby oznaczyć ilość tej wody należy oznaczyć wskaźniki adsorpcji kruszyw W_{24} według PN co pozwala określić ile wody masowo jest wstanie wchłonać kruszywo i o tę wartość skorygować ilość wody służącej do określenia w/c. Woda która jest wchłonięta przez kruszywo nie będzie dostępna do rozpraszania ziaren cementu, będą one bliżej siebie zaczyn będzie bardziej lepki i czas wiązania cementu również ulegnie skróceniu. To wszystko prowadzi do szybszej utraty urabialności mieszanek. Procesy absorpcji wody przez kruszywo są również zależne od temperatury, ściślej ich szybkość [62].



Rys.19. Wpływ temperatury na wskaźnik adsorpcji piasków o różnym uziarnieniu

W wymienionej pracy badano wpływ temperatury na wielkość i szybkość absorpcji piasków różnym uziarnieniu. Piasek o uziarnieniu 0-2 absorbował więcej wody niż piasek o uziarnieniu 0-5, jest to konsekwencją jego większej powierzchni. Współczynniki absorpcji piasku wzrastają wraz ze wzrostem temperatury. Z punktu widzenia urabialności mieszanek najistotniejsza jest jednak relacja pomiędzy współczynnikiem absorpcji określonym w 30 minucie i w 24 godzinie zanurzenia piasku w wodzie. Widoczne jest że w temperaturach przedziału 20-38 °C współczynnik absorpcji wody po 30 minutach jest zbliżony do tego określonego po 24 godzinach. W okresach letnich po ok. 30 minutach od zamieszania składników zaprawy czy mieszanki betonowej prawie cała woda, którą jest w stanie wchłonąć kruszywo, nie będzie dostępna do dyspergowania ziaren cementu, tym samym mieszanki będą traciły urabialność szybciej. Efekt ten jest bardziej wyraźny dla piasku o większej powierzchni właściwej o ziarnie do 5 mm. Zwiększenie absorpcji wody przez kruszywo jest związane z powiększaniem się ziaren wraz ze wzrostem temperatury. Woda ma do pokrycia większą powierzchnię, pory na powierzchni ziaren się otwierają także woda łatwiej może w nie wnikać. Po wtóre lepkość, gęstość i napięcie powierzchniowe wody również są zależne od temperatury, dzięki czemu woda w wyższych temperaturach łatwiej penetruje w głąb ziaren kruszywa. Wpływ temperatury jest również widoczny nie tylko w przypadku absorpcji kruszywa, ale również w innych właściwościach. Autorzy wykazali wpływ temperatury na kąt tarcia wewnętrznego czy podatność na zagęszczanie poprzez wibrowanie piasku. Generalnie konkluzja sprowadza się do stwierdzenia, że w niższych temperaturach piasek, czy generalnie materiały ziarniste stawiają większe opory podczas przemieszczania się ziaren. Wyżej wymienione efekty kształtują wpływ temperatury na urabialność zapraw, który ogólnie według [62] przedstawia rys. 20.

Wpływ kruszywa



Rys. 20. Wpływ temperatury na urabialność zapraw i efekty go kształtujące.

Ci sami badacze w [63] nie zaobserwowali wyraźnego wpływu temperatury na właściwości zaczynu upłynnionego superplastyfikatorem. Wniosek z tego jest taki, że kruszywo może wzmacniać lub osłabiać wpływ temperatury na urabialność. Trudno tym samym oceniać wpływ temperatury na urabialność, na podstawie zaczynu cementowego. Kruszywo wprowadza do mieszanki dodatkowe oddziaływania nie tylko związane z absorpcją wody, ale również z tarciem między ziarnami i spójnością.

2.4 EFEKTY ZWIĄZANE Z POWIERZCHNIĄ MIĘDZY FAZOWĄ I SPÓJNOŚCIĄ

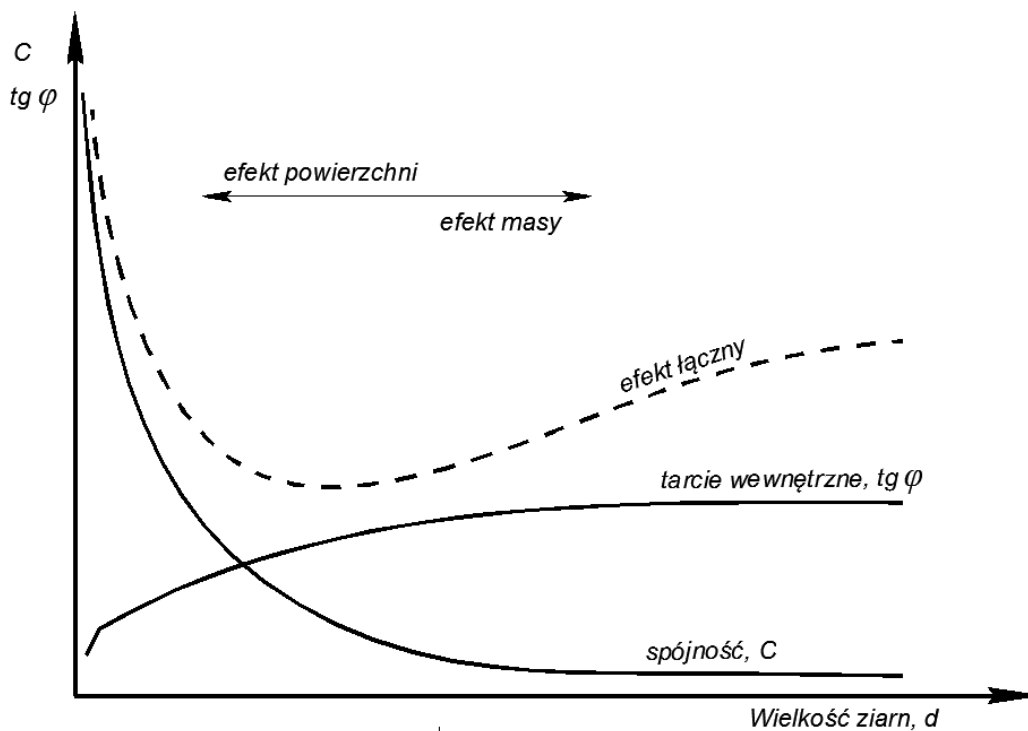
Mieszanka betonowa to materiał kompozytowy składający się z kruszywa o odpowiedniej granulacji, które jest rozproszone w fazie ciągłej, którą jest zaczyn spoiwowy.

Za [64] przytoczyć można model reologiczny mieszanki betonowej

$$\tau < \tau_0 = c + (\sigma - \sigma_c)$$

W którym naprężenia τ jeśli będą mniejsze od naprężeń τ_0 to mieszanka pozostawała będzie w spoczynku. Naprężenia τ_0 przyjęło się utożsamiać z granicą płynięcia. Po przekroczeniu tych naprężeń nastąpi lepkie płynięcie mieszanki mieszanka. Są one zależne od spójności, współczynnika tarcia wewnętrznego i modułu sprężystości postaciowej. Wszystkie wymienione wyżej parametry są zależne od właściwości kruszyw wchodzących w skład mieszanki betonowej.

Spójność jest związana ze zjawiskami powierzchniowymi na styku trzech faz stałej ciekłej i gazowej. Spójność zanika jeżeli przestrzenie międzyziarnowe będą w całości wypełnione wodą (sytuacja znana z mechaniki gruntów) Mieszanka może mieć zerową spójność jeżeli przestrzenie międzyziarnowe będą przepełnione zaczynem cementowym ale pod warunkiem, że jego kohezja będzie również mała. Rozpatrując piasek 0-2 będący kruszywem zaprawy i mieszankę kruszyw np. 0-16 mm to ta druga z uwagi na ziarna kruszywa grubego będzie się charakteryzowała spójnością mniejszą. Biorąc pod uwagę tarcie wewnętrzne to większym będzie się charakteryzowała mieszanka o grubszym uziarnieniu. Dobrze obrazuje to rys. 21 zaczerpnięty z [64].



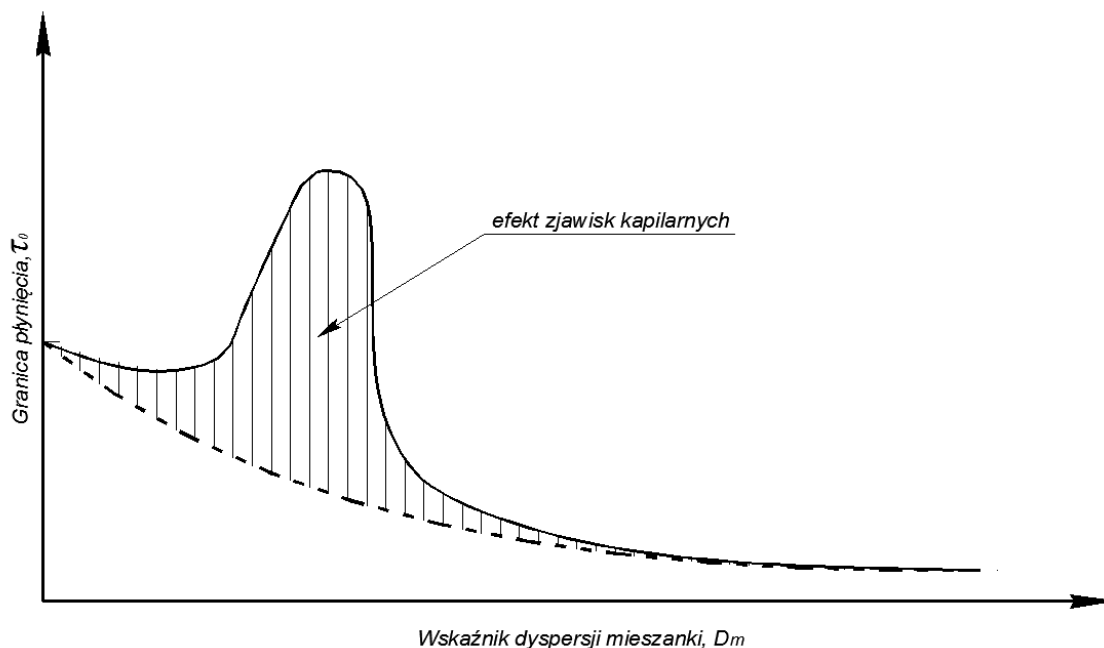
Rys. 21. Spójność i tarcie wewnętrzne w funkcji wielkości ziaren.

Zjawiska zachodzące w stosie okrucowym, sprawiają, że uziarnienie kruszywa odgrywa znaczącą rolę w kształtowaniu urabialności. Choć ustawiczny rozwój domieszek chemicznych pozwala na pewne błędy w doborze stosu okrucowego.

W [64] przedstawiona jest również koncepcja wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem cementowym. Wskaźnik ten definiowany jako stosunek objętości zaczynu cementowego do objętości przestrzeni międzyziarnowych w kruszywie. Wykres przedstawiony na rysunku 22 przedstawia ogólny wpływ wskaźnika φ_{kz} na kształtowanie granicy płynięcia.

Gdy w stosie okrucowym nie będzie zaczynu granica płynięcia będzie równa granicy ścinania samego stosu okrucowego, jeżeli stos okrucowy będzie odpowiednio przepełniony zaczynem cementowym to granica mieszanki będzie dążyła do wielkości granicy płynięcia zaczynu cementowego. Z technologicznego punktu widzenia niezmiernie istotny jest przedział 0,8-1 wielkości wskaźnika φ_{kz} , dla których obserwowany jest wyraźny wzrost granicy płynięcia. Jest on wywołany zjawiskami

kapilarnymi w stosie okruszowym. Zaczyn cementowy wprowadzony do kruszywa sprawia, że na ziarnach kruszywa pojawia się woda błonkowa wprowadzając spójność kapilarną. Osiąga ona swoje maksimum w momencie gdy pustki między ziarnowe będą całkowicie wypełnione zaczynem cementowym. Po tym momencie granica płynięcia gwałtownie maleje, gdyż zmniejsza się spójność i tarcie między ziarnowe. Zmniejszenie spójności i tarcia jest związane ze zwiększającym się rozproszeniem ziaren w mieszance



Rys. 22. Wpływ zjawisk kapilarnych na wielkość granicy płynności mieszanki betonowej [64].

Z tego krótkiego opisu zjawisk zachodzących w mieszance betonowej wynika, że zaczyn cementowy ze swej natury, jest wolny od wpływów mechanizmów, za które odpowiada kruszywo. Wykorzystanie zaczynu cementowego do określenia zmian urabialności mieszanek betonowych w aspekcie zmiennych czynników technologicznych może być całkowicie chybione. Znacznie lepszą powinna być tutaj zaprawa, gdyż udział w jej składzie piasku wprowadza efekty związane ze zjawiskami kapilarnymi. Choć należy pamiętać, że i ona jest pewnym uproszczeniem, gdyż pominięcie ziaren większych od 2 mm ma również swoje konsekwencje. Po drugie problemem jest relacja cementu do piasku. Powszechnie stosowana zaprawa normowa, o stosunku masowym cementu, piasku i wody 1:3:0,5, nie pokrywa nawet w nie wielkiej części szerokiego spektrum składów zapraw będących składnikami mieszanek betonowych, lub zapraw funkcjonujących w budownictwie samodzielnie. Nie wspominając już o bardzo wysublimowanym i kosztownym piasku normowym. Dlatego też, by osiągnąć jak największą zgodność jakościową a być może i ilościową pomiędzy zachowaniem się mieszanki zaprawy i mieszanki betonowej pod wpływem czynników technologicznych, konieczne jest opracowanie metody projektowania zaprawy. Zaprawa, która możliwe

dobrze przybliżała by zachowanie mieszanki betonowej i była by podstawą do zaprojektowania tejże.

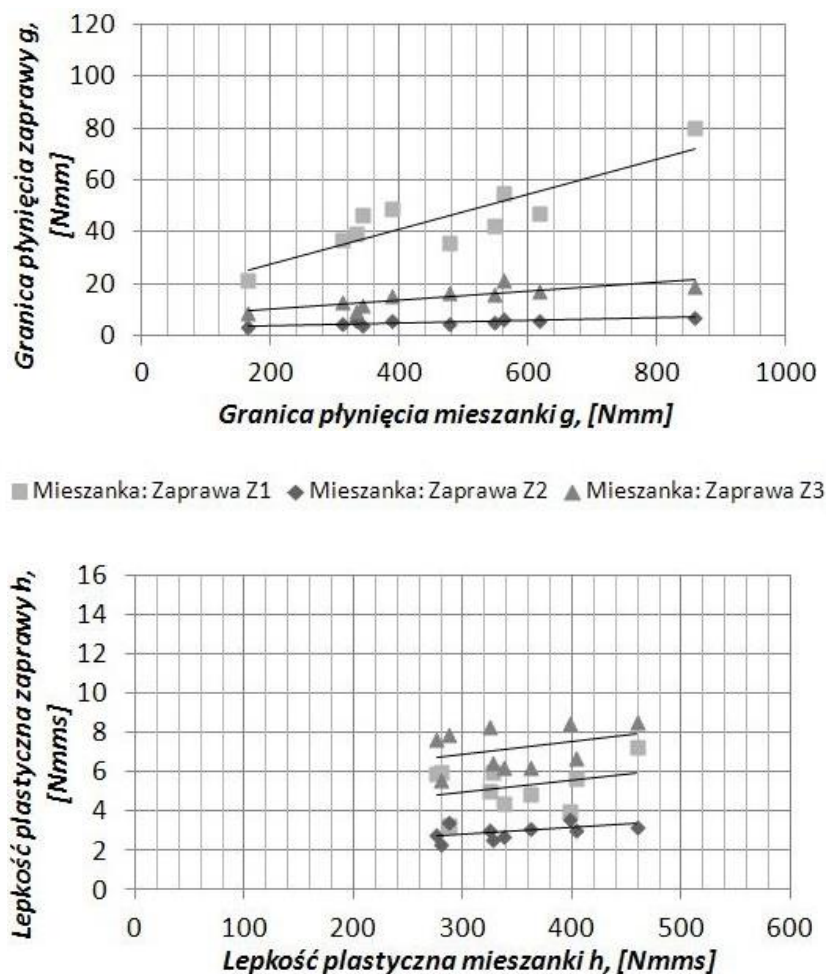
2.5 METODY PROJEKTOWANIA SKŁADÓW ZAPRAW

Koncepcje korekt składu zaprawy wchodzącej w skład mieszanki betonowej były przedmiotem badań w pracy [65]. Sprawdzono w niej przydatność korekt opartych na różnych założeniach do prognozowania zachowania mieszanek betonowych. Uzyskano zadowalające wyniki, które jednoznacznie uzasadniają konieczność korekt składu zaprawy. Rysunek 17 przedstawia zależności pomiędzy parametrami reologicznymi mieszanek betonowych i odpowiadającym im zapraw badanych w temperaturach 10, 20 i 30 °C. Zaprawa Z2 to zaprawa z mieszanki betonowej bez korekt. Zaprawy Z1 i Z3 to skorygowany skład zaprawy Z2. Korekta zaprawy Z1 polegała na ujęciu objętości zaczynu cementowego niezbędnego do zapewnienia na kruszywie grubym otoczki o grubości, zależnej od jamistości stosu okruszowego w stanie zagęszczonym i objętości zaczynu cementowego w mieszance. Główne założenia korekty oparto na metodzie obliczenia odległości między ziarnami kruszywa w mieszance betonowej opisanej w pracy [66]. Korekta zaprawy Z3 polegała na ujęciu wody z zaprawy ze względu na wodożądność kruszywa grubego obliczonej według Sterna. Metodyka obliczania wodożądności kruszywa jest szczegółowo opisana w pracy [67]. Badania obejmowały pomiary właściwości reologicznych mieszanek i wykonanych na bazie analogicznych składników zapraw, ale o różnych proporcjach, w zależności od metody projektowania. Właściwości reologiczne określano dla 3 różnych temperatur. W tabelicy 4 zestawiono wartości współczynnika korelacji R dla granicy płynięcia g i lepkości plastycznej h dla układu mieszanka betonowa z zaprawą (Z1, Z2, Z3). Z zestawienia wynika, że najlepsze dopasowanie wyników parametrów reologicznych dla układu mieszanka - zaprawa posiada zaprawa Z1.

Tablica 4. Współczynnik korelacji R dla granicy płynięcia g i lepkości plastycznej h dla układu mieszanka betonowa z zaprawą (Z1, Z2, Z3) [65]

Temperatura	Współczynnik korelacji, R					
	Granica płynięcia g, [Nmm]			Lepkość plastyczna h, [Nmms]		
	Mieszanka: Zaprawa Z1	Mieszanka: Zaprawa Z2	Mieszanka: Zaprawa Z3	Mieszanka: Zaprawa Z1	Mieszanka: Zaprawa Z2	Mieszanka: Zaprawa Z3
10°C	0,76	0,68	0,32	0,55	0,64	0,43
20°C	0,87	0,79	0,82	0,32	0,49	0,35
30°C	0,94	0,71	0,89	0,5*	0,84	0,64

*(mała liczba danych)



Rys. 19. Zależność właściwości reologicznych mieszanek betonowej odpowiadającym im zapraw w temperaturze 20 °C [65]

Metodyka korekty zaproponowana w pracy [68] jest kolejnym etapem badań, który prowadzi do zaprawy najlepiej odpowiadającej mieszance betonowej. Taka zaprawa może służyć do oceny kompatybilności domieszek, do określenia ilości domieszki bliskiej punktowi saturacji czy innych badań, które są bardzo pracochłonne jeżeli są wykonywane na mieszankach betonowych. Drogą do jego uzyskania był szereg prac weryfikujących przydatność korekt składu zapraw podobnych do przedstawionych w [65] i nowych założeniach. Nowe podejście projektowania zapraw oparte jest na równości wskaźnika dyspersji mieszanki betonowej i zaprawy (zaprawa Z4, rys 24). Proponowana zaprawa oddaje najlepiej zachowanie mieszanki betonowej w układzie zmiennych czynników technologicznych. W niniejszej pracy jest poddana ocenie przydatność zaprawy o skorygowanym składzie w aspekcie wpływu temperatury.

Korekta opiera się na założeniu równości wskaźnika dyspersji mieszanki betonowej D_C i wskaźnika dyspersji zaprawy D_M . Aby był on równy z uwagi na różnice w powierzchni fazy rozpraszanej mieszanki i zaprawy, konieczne jest odjęcie pewnej objętości zaczynu cementowego którą można analitycznie określić. W tym celu należy określić wskaźniki

dyspersji zaprawy i mieszanki betonowej. Wskaźnik dyspersji mieszanki betonowej D_C określa wzór:

$$D_C = \frac{V_{cp,mix}}{S_a \cdot K}, m$$

w którym:

- $V_{cp,mix}$ - objętość zaczynu cementowego w mieszance betonowej, m^3
- S_a - powierzchnia ziaren kruszywa stosu okruszowego mieszanki m^2/kg
- K - masa kruszywa w mieszance, kg

Wskaźnik dyspersji zaprawy D_M określa wzór:

$$D_M = \frac{V_{cp,mix}}{S_s \cdot K_s}, m$$

w którym:

- $V_{cp,mix}$ - objętość zaczynu cementowego w mieszance betonowej, m^3
- S_s - powierzchnia ziaren piasku, m^2/kg
- K_s - masa kruszywa w mieszance, kg

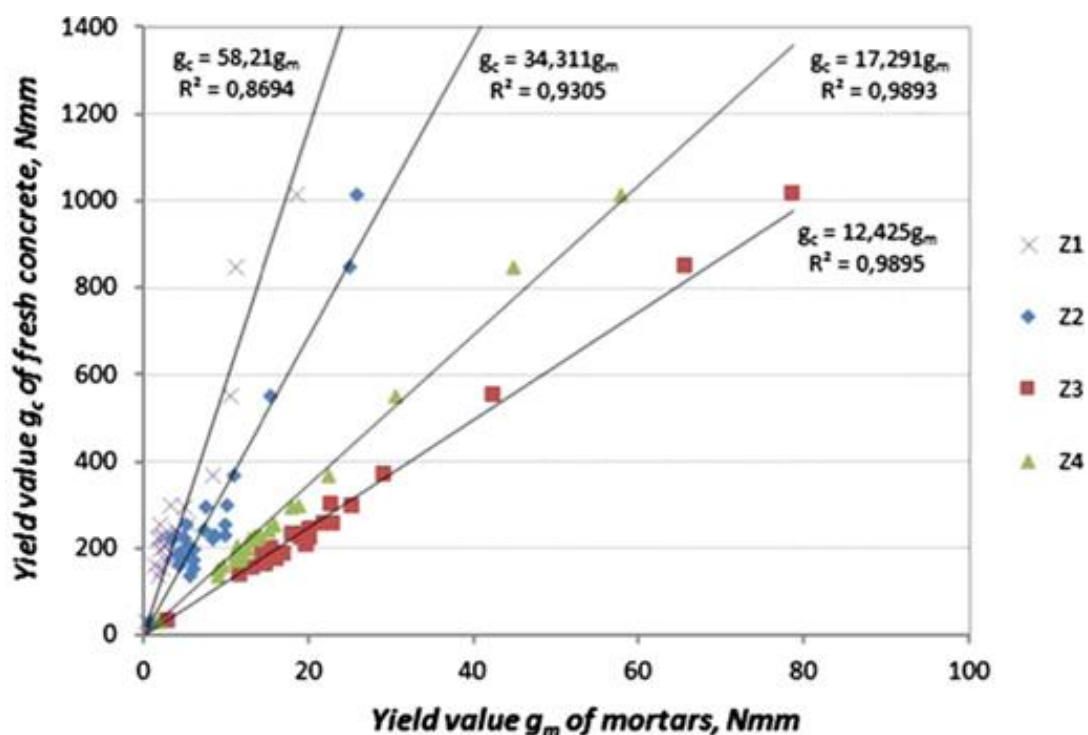
Z założenia równości wskaźników dyspersji D_M i D_C wynika wzór, wyznaczający ilość zaczynu cementowego w skorygowanym składzie zaprawy cementowej

$$V_{cp,m} = V_{cp,mix} \cdot \frac{S_s \cdot K_s}{S_a \cdot K_a}, m^3$$

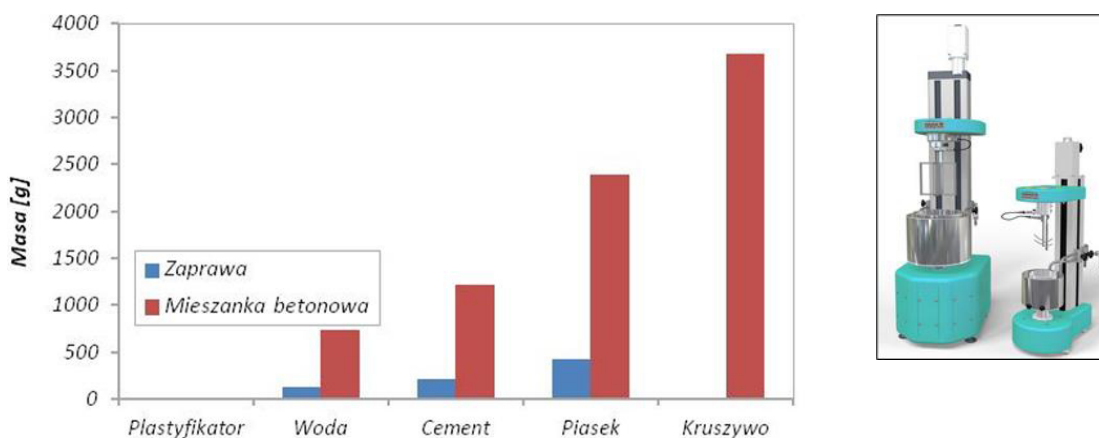
Dla tej ilości zaczynu cementowego i ilości piasku w mieszance betonowej należy wyliczyć skład zaprawy na $1 m^3$. Najwygodniej procedurę korekty składników zaprawy jest przeprowadzać w arkuszu kalkulacyjnym.

Tak skorygowany skład zaprawy, pozwala wykorzystać ją do badania właściwości reologicznych, które z pomocą zależności przedstawionej na rys. 20 określają właściwości reologiczne mieszanki betonowej w tym przypadku granicę płynięcia g.

Projektowanie i kształtowanie właściwości reologicznych betonu samozagęszczalnego jest ważnym zagadnieniem technologii betonu. Przewidywanie tych zmian na podstawie właściwości zapraw jest mniej czasochłonne, może być drogą do jego racjonalizacji. Wykres na rys.21 przedstawia ilość materiałów które są niezbędne do przygotowania $0,36 dm^3$ zaprawy i $3,5 dm^3$ mieszanki betonowej. Tyle wynoszą pojemności pojemników w reomertrach NT i XL. Składy określone są dla mieszanek o $w/c=0,6$ z 350 kg cementu na $1m^3$ z 1% plastyfikatora. Do wykonania reometrycznego testu urabialności mieszanki betonowej potrzeba masowo ponad 10 krotnie więcej składników .



Rys. 20. Relacje parametrów reologicznych zapraw i odpowiadającym im mieszanek betonowych. Z 4 oznacza zaprawę zaprojektowaną w oparciu o założenie $(D_C/D_M)=1$



Rys. 21. Zużycie materiałów niezbędnych do przeprowadzenia reometrycznego testu urabialności zaprawy i mieszanki betonowej, po prawej reometr XL i NT.

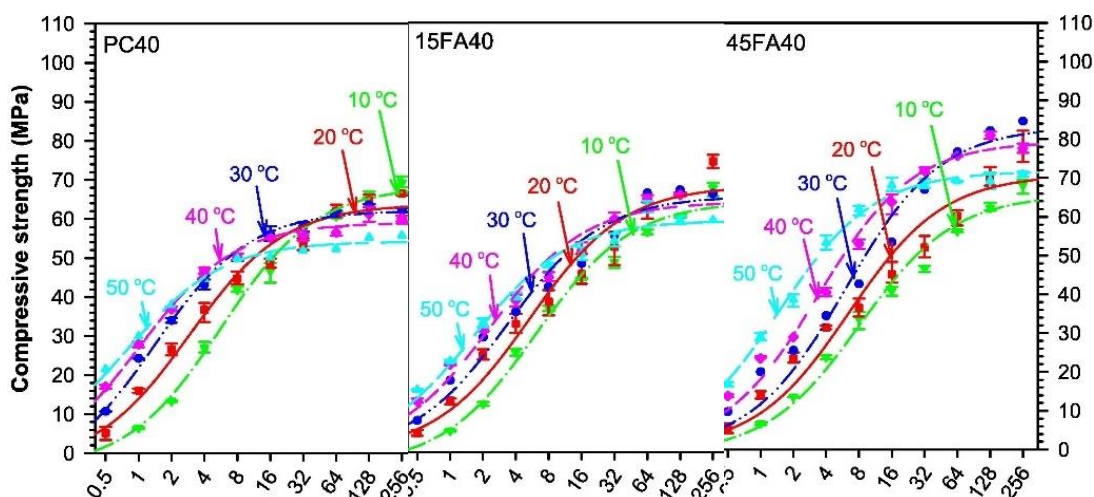
Przedstawione wyniki wskazują generalnie, że istnieje zgodność pomiędzy właściwościami reologicznymi zapraw i mieszanek betonu samozagęszczalnego. Niemniej jednak zaprawy te powinny być odpowiednio zaprojektowane. Zaprawa Z4 charakteryzuje się najlepiej przybliża zachowanie się mieszanki betonowej w funkcji czasu i temperatury reologiczną pomiędzy zaprawą a świeżym betonem samozagęszczalnym w funkcji czasu i temperatury. W pracy [69] wykazano również przydatność tej zaprawy do określenia wpływu innych czynników na właściwości mieszanek. Ponadto zastosowanie zaprawy Z 4 nie ogranicza się tylko do predykcji granicy płynięcia czy lepkości plastycznej mieszanki betonowej, można również ją

wykorzystać do określenia granicy płynięcia statycznej g_{stat} , czy wskaźnika A_T mieszanki betonowej.

2.6 WPŁYW TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE

Jakościowy i ilościowy wpływ temperatury na proces hydratacji cementu kształtuje również właściwości mechaniczne betonu. Jest to zagadnienie dosyć dobrze rozpoznane [70] [63] [71] [72]. Generalnie jest tak, że wyższa temperatura mieszanki a później pielęgnacji betonu przekłada się na większe wytrzymałości zwłaszcza w początkowym stadium. Jest to związane ze strukturą hydratujującego zaczynu cementowego. W niższych temperaturach początkowo produkty reakcji hydratacji tworzą bardziej porowatą strukturę. Jej właściwości mechaniczne są na niższym poziomie niż struktury dojrzewającej w wyższych temperaturach, która jest bardziej szczelna. Większa porowatość jednak w późniejszym czasie stwarza korzystniejsze warunki do dojrzewania, wywołane łatwiejszą dyfuzją zachodzącą w roztworze stałym [73]. Stopień hydratacji kompozytów dojrzewających w temperaturach obniżonych jest wyższy niż tych dojrzewających w zakresie temperatur 20 - 30 °C [74]. To może wywołać tak zwany crossover effect, czyli większe wytrzymałości kompozytów dojrzewających w niższych temperaturach. Pojawia się to z reguły po 56-90 dniu dojrzewania, a w przypadku betonów ultrawysokowartościowych nawet po roku lub jeszcze później [75]. Efekt ten jest najlepiej udokumentowany w przypadku wytrzymałości na ściskanie betonu. Z uwagi na to, że jest ona powiązana z szeregiem innych cech mechanicznych to w ich przypadku również to zjawisko zachodzi.

Z uwagi na to, że temperatura bardzo wpływa na reaktywność żużli wielkopieczowych [76], to betony z ich dodatkiem szczególnie wyraźnie wykazują wspomniany „cross over effect”. W przypadku popiołów lotnych efekt cross over efekt nie jest tak wyraźny i występuje później [77].



Rys. 22. Rozwój wytrzymałości dla betonu klasy C32/40 z popiołem lotnym [77]

2.7 WPŁYW TEMPERATURY NA URABIALNOŚĆ MIESZANEK BETONÓW SAMOZAGĘSZCZALNYCH

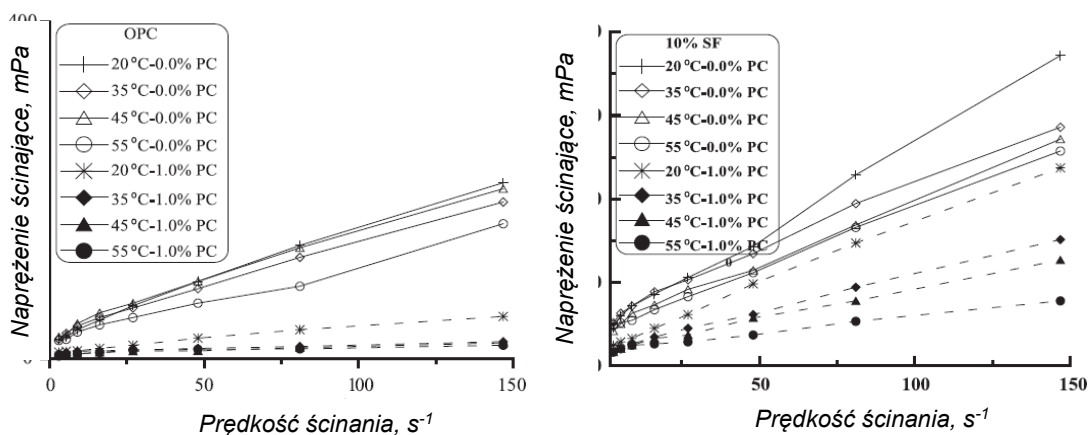
Scharakteryzowane w poprzednich rozdziałach mechanizmy, kształtujące właściwości mieszanek na spoiwach cementowych, są wrażliwe na zmianę temperatury. Proces wiązania cementu ulega przyspieszeniu wraz ze wzrostem temperatury. Temperatura wpływając na kinetykę i rozpuszczalność składników cementu sprawia, że pojawiające się w roztworze jony mogą w różnorodny sposób kształtować wytrącane minerały. Wpływa to na strukturę, morfologię i czas pojawienia się produktów hydratacji. Kształtują one układ pól adsorpcji dla domieszek upłynniających, które by efektywnie działać musiały ulec zakotwiczeniu na fazie stałej zaczynu cementowego. Tylko zadsorbowana domieszka jest w stanie rozwinąć zawadę steryczną, która jest najefektywniejszym jak dotąd sposobem dyspergowania ziaren cementu. Z punktu widzenia adsorpcji domieszek o anionowym charakterze najbardziej istotne są fazy i produkty hydratacji cementu o dodatnim potencjale. Są to glinian triwapnia i żelazoglinian tetrawapnia oraz etryngit. Na tych minerałach adsorpcja domieszek o grzebieniowej budowie zachodzi najszybciej i jest bezpośrednia. Nie należy zapominać o zjawisku inwersji potencjału. Zachodzi wtedy gdy w roztworze pojawiają się jony potencjałotwórcze, zdolne do związania się z powierzchniami o odmiennym wobec nich ładunku. Dzięki czemu inerta wobec domieszki powierzchnia staje się dogodnym miejscem adsorpcji. Na proces inwersji wpływała będzie temperatura, wpływając na szybkość i rodzaj pojawiających się jonów w roztworze. Z uwagi na to, że cement jest układem polimineralnym, a w technologii betonu stosowanych jest wiele dodatków mineralnych, przewidywanie wpływu temperatury na właściwości mieszanek jest trudne o ile w ogóle możliwe. Możemy na podstawie znajomości pewnych mechanizmów domniemywać jak zachowywać powinna się dana mieszanka. Nigdy jednak nie możemy być pewni. Wskazują na to badania wpływu temperatury na właściwości mieszanek opartych na spoiwach cementowych, które są przedstawione w następnych punktach. Dla czytelności podzielono je na badania wpływu temperatury prowadzone na zaczynach, zaprawach i mieszankach betonowych.

2.7.1 BADANIA DOTYCZĄCE WPŁYWU TEMPERATURY – DOŚWIADCZENIA NA ZACZYNACH

Zaczyn cementowy lub gdy są stosowane inne dodatki mineralne spoiwowy jest często wybierany jako mieszanka służąca do określenia wpływu zmian temperatury na jej właściwości. Przyczyną ku temu jest co najmniej kilka. Najważniejszymi są łatwość jego sporządzenia i łatwość kontroli jego temperatury. Jeśli chodzi o składniki determinujące jego temperaturę to jest układem trójskładnikowym, domieszki których ilość relatywnie jest niewielka nie odgrywają znaczącej roli w kształtowaniu wyjściowej temperatury zaczynu. Łatwo jest doprowadzić składniki do założonych temperatur tak by uzyskać temperaturę mieszanki zgodną z planem badań. Również dogrzewanie bądź schładzanie przygotowanego zaczynu następuje stosunkowo szybko, a takie metody przygotowania zaczynu o odpowiedniej temperaturze są również stosowane.

Joliceur et al. [78]. badał wpływ temperatury i ilości superplastyfikatora PNS na właściwości reologiczne i utrzymywanie płynności zaczynów o $w/s=0,35$. Płynność definiowana jest jako odwrotność lepkości. Zmiany urabialności obserwowane były przez 50 minut, kryterium była średnica rozpląwu zaczynu i dodatkowo jego powierzchnia. Dość szeroki był przedział badanych temperatur od 0 do 40 °C. Stwierdzono wyraźny wpływ temperatury w przypadku zaczynów cementowych z pyłem krzemionkowym, średnice rozpląwu zaczynów wyraźnie się zmniejszały wraz ze wzrostem temperatury. W przypadku zaczynów cementowych bez mikrokrzemionki wpływ temperatury na średnice rozpląwu był wyraźnie mniejszy zmniejszenie średnic rozpląwu zaczynów bez i z mikrokrzemionką w czasie 50 minut malało wraz ze wzrostem temperatury. W niskich temperaturach zmniejszenie średnic rozpląwu było znacznie większa w przypadku zaczynów bez mikrokrzemionki. Płynność (definiowana w pracy jako odwrotność lepkości) zaczynów bez mikrokrzemionki wyraźnie zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury, odwrotny efekt jest obserwowany po dodaniu mikrokrzemionki. Autorzy wyciągnęli wniosek, że w przypadku dodania PNS w nadmiarze (powyżej dawki saturacji) właściwości reologiczne zaczynów i ich zmiany w czasie są związane ze stężeniem PNS w zaczynie cementowym.

Odmienne wpływ temperatury na płynność zaczynu cementowego z mikrokrzemionką sygnalizowany jest w [79]. Dodatek mikrokrzemionki w ilości 10 % do zaczynu cementowego z cementu portlandzkiego upłynnionego 1 % m.c superplastyfikatora na bazie kwasów polikarboksyłowych, zwiększa granicę płynięcia i lepkość, ale wzrost temperatury wyraźnie zmniejsza wielkość tych dwóch parametrów (rys.23). Widoczny jest jakościowo odmienny wpływ temperatury na właściwości zaczynu w porównaniu do wyników uzyskanych w [78] w zależności od rodzaju zastosowanego superplastyfikatora. Tutaj odgrywa rolę zwiększona przez wzrost temperatury adsorpcja domieszki upłynniającej na bazie kwasów polikarboksyłowych.

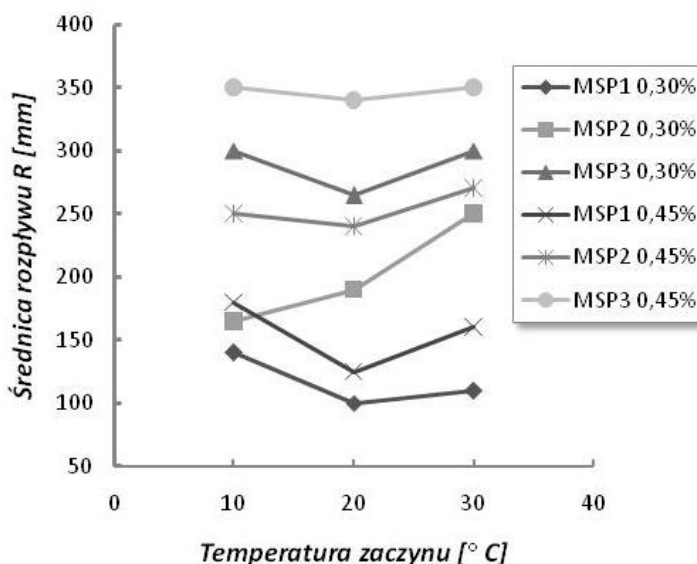


Rys. 23. Opór ścinania zaczynów cementowych z i bez superplastyfikatora określony w temperaturach 20-55 °C. Po lewej zaczyny cementowe bez mikrokrzemionki po prawej z mikrokrzemionką [79]

W pracy [80] badano wpływ temperatur na płynność zaczynów cementowych. Zaczyny wykonano na cemencie portlandzkim, użyto superplastyfikatorów PE o trzech

długościach łańcuchów bocznych. Widoczne są znaczne różnice w efektywności działania domieszek, odmienny może być również charakter wpływu temperatury. Możemy obserwować znikomy wpływ temperatury na średnicę rozptywu zaczynu cementowego z domieszką MSP3 w ilości 0,45 %, z tą samą domieszką ale w ilości 0,30 % wpływ temperatury jest większy. Najmniejszą średnicę rozptywu uzyskujemy w temperaturze 20 podczas gdy w temperaturze 10 i 30 jest ona porównywalna. Taki wpływ temperatury przeważa w prezentowanych badaniach, choć jest możliwy wyraźny wzrost średnicy rozptywu wywołany wzrostem temperatury - zaczyn z superplastyfikatorem MSP 2 w ilości 0,30 %. Średnice rozptywu badane były zaraz po przygotowaniu zaczynów cementowych, wraz z upływem czasu następowało zmniejszenie płynności tym większe im większa była temperatura.

Superplastyfikatory o długich łańcuchach bocznych MSP2 i MSP3, najlepiej upłynniają zaczyn cementowy.



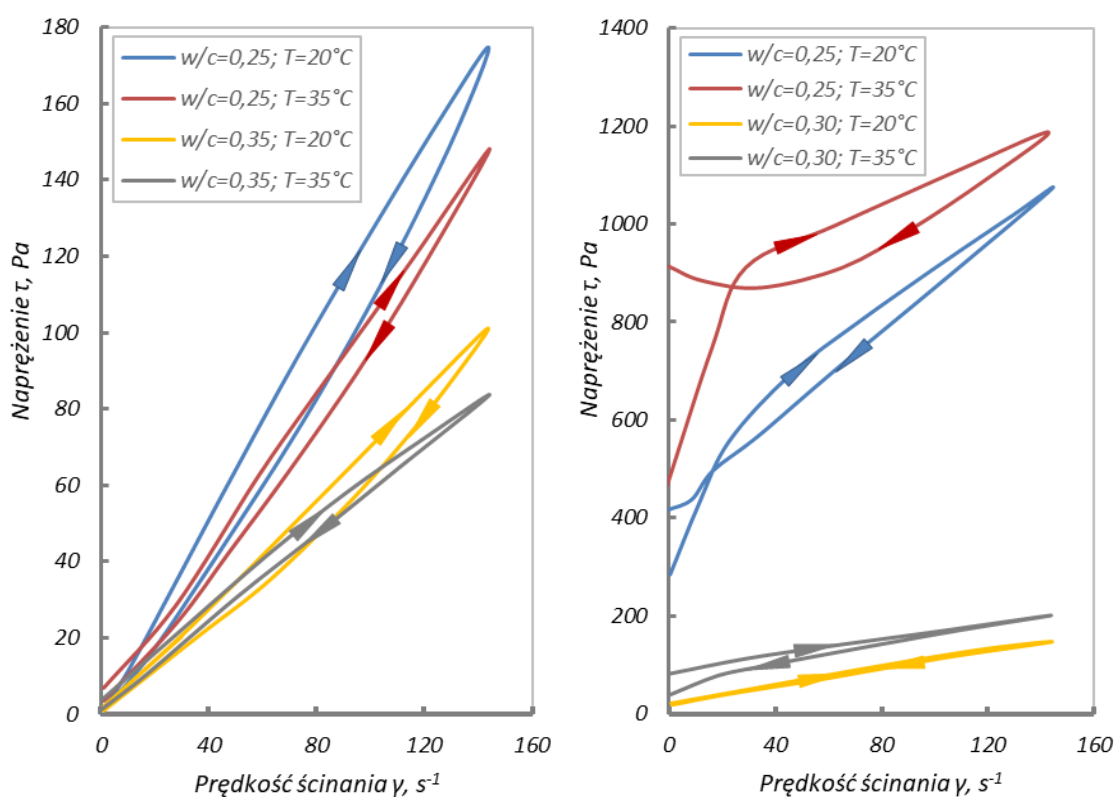
Rys. 24. Wpływ temperatury zaczynu na średnicę rozptywu [80]

Wpływ budowy superplastyfikatora na efekty działania temperatury badano w pracy [81], były to dwa superplastyfikatory akrylowe, zbudowane z takich samych grup merów. Różna były ich ilość i rozmieszczenie w polimerze. Wchodzenie w zagadnienia inżynierii chemicznej przekracza zakres pracy. Dlatego też rozważania zostaną ograniczone do skutków modyfikacji struktury domieszek. Zasadniczy wniosek jest taki, że odpowiednio modyfikując rozmieszczenie i ilość segmentów budujących domieszkę możemy kształtować jej skuteczność w zależności od np. temperatury. Superplastyfikator A, zawierającego w swoim składzie więcej segmentów akrylanu n – oksyetylenu oraz mniej hydrofobowych segmentów akrylanu metylu w prównaniu do superplastyfikatora B wykazuje większą skuteczność działania - mniejsze granice płynięcia i lepkości plastyczne zaczynów. Co szczególnie interesujące wzrost temperatury z 20 na 35 °C nie wpływa znacząco na granicę płynięcia, zmniejszając lepkość plastyczną. Wzrost

temperatury wpływa znacząco na płynność zaczynu z superplastyfikatorem B, wyraźnie zwiększając granicę płynięcia przy relatywnie małym zmniejszeniu lepkości pozornej.

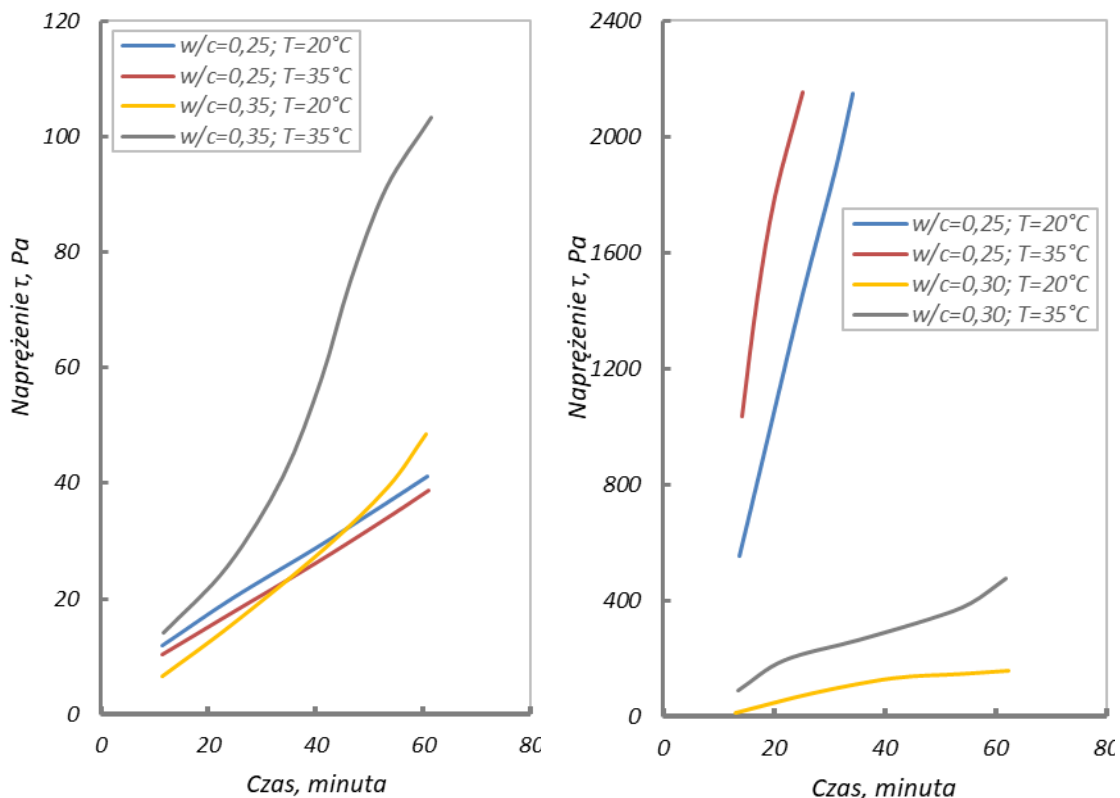
Tablica 5. Granice płynięcia i lepkości plastyczne zaczynów cementowych z 1 %m.c. Superplastyfikatora A lub B określone w temperaturze 20 °C [81]

Superplastyfikator	w/c	Granica płynięcia τ_0 ,	Lepkość plastyczna η_{pl} ,
		Pa	Pa·s
A	0,25	brak	0,50
	0,30	brak	0,36
B	0,25	250	1,58
	0,30	44	0,72



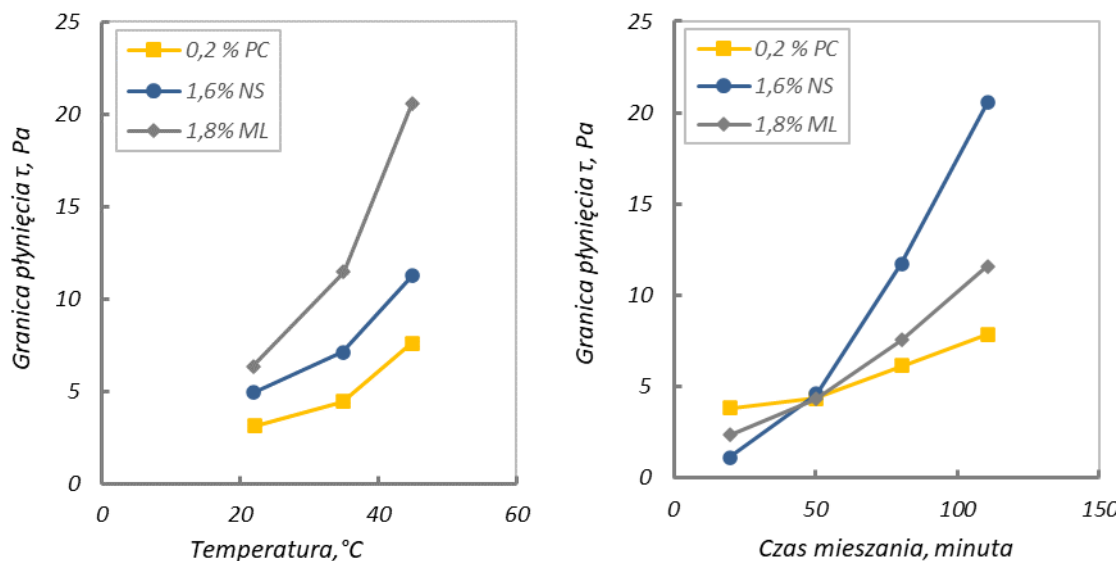
Rys. 25. Krzywe płynięcia zaczynów cementowych zawierających 1 % m.c. superplastyfikatora A (z lewej) i B (z prawej) określone w temperaturach 20 i 35 °C [81]

Efektywność działania superplastyfikatorów akrylowych zależy od ilościowego udziału poszczególnych bloków w strukturze łańcucha domieszki. Wpływ temperatury autorzy wiążą ze zmianą stopnia hydratacji łańcuchów polieterowych w systemie polimerowym superplastyfikatora i związaną z tym zmianą zasięgu blokady sterycznej na ziarnach cementu ze wzrostem temperatury. W zależności od budowy domieszki lepkość zaczynu cementowego może zmniejszać się ze wzrostem temperatury



Rys. 26. Zmiany naprężeń ścinających w czasie dla zaczynów cementowych 1 % m.c superplastyfikatora A (z lewej) i B (z prawej) określone w temperaturach 20 i 35 °C [81]

Wpływ temperatury na działanie superplastyfikatorów o różnych mechanizmach działania był badany w [82]. Zasadniczym celem było opracowanie modelu służącego do predykcji parametrów reologicznych zaczynów cementowych na podstawie wyników pomiarów uzyskanych za pomocą reometru oscylacyjnego. Jednym ze zmiennych czynników była temperatura. Zaczyn cementowy z CEM I 32,5 R o $w/c=0,38$, był modyfikowany domieszkami upłynniającymi. Były to trzy rodzaje superplastyfikatorów: superplastyfikator polikarboksylowy (PC), na bazie sulfonowanych żywic melaminowych (ML) i na bazie sulfonowanych żywic naftalenowych (NS). Ich ilość wynosiła 0,2% w przypadku PC, 1,8% dla ML i 1,6 % masy cementu dla domieszki NS. Znaczne różnice w ilościach sugerują już odmienną efektywność stosowanych domieszek ściśle związaną z mechanizmem ich działania. Z mechanizmem działania, związana jest również siła wpływu temperatury na zmianę granicy płynięcia. Granica płynięcia zaczynu cementowego z superplastyfikatorem PC jest najmniej wrażliwa na wzrost temperatury, wzrost temperatury zwiększa ją w najmniejszym stopniu. Superplastyfikatory działające w oparciu o odpychanie elektrostatyczne wykazują większą wrażliwość na działanie temperatury. Stopniując pod względem odporności na zmiany wywołane temperaturą najbardziej odporny jest superplastyfikator polikarboksylowy, pośrednią odpornością charakteryzuje się superplastyfikator naftalenowy a najgorszą melaminowy.



Rys. 27. Wpływ temperatury (po lewej) i czasu (po prawej) na granice płynięcia zaczynów z różnymi rodzajami domieszki upłynniającej [82]

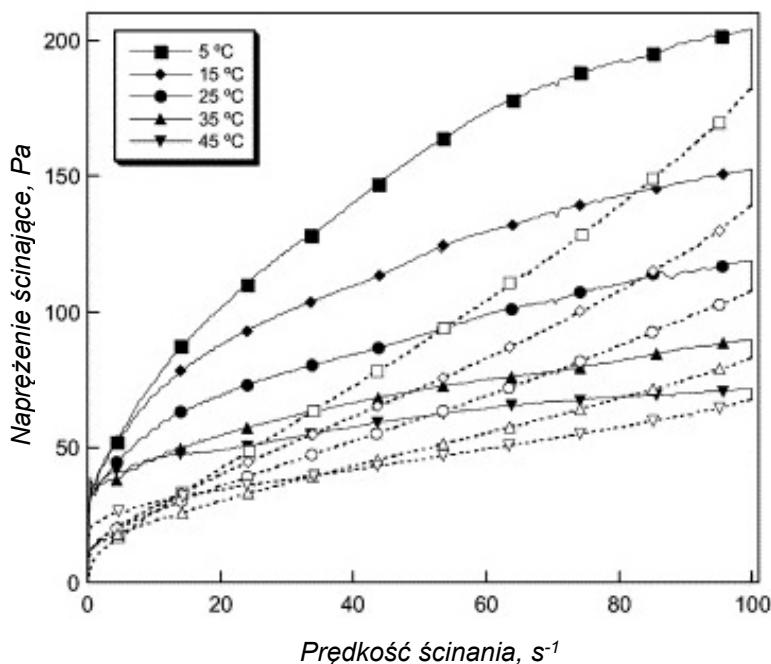
Efekt opóźnionego dozowania domieszki i jego interakcja z wpływem temperatury badany był w [83]. Określono wpływ zmian temperatury (5-45 °C) na granicę płynięcia i lepkość plastyczną zaczynów z CEM I 52,5R upłynnionych superplastyfikatorem SIKA Viscocrete 5 -700. Zaczyny przygotowywane były w temperaturze 21°C, po czym badano ich właściwości reologiczne w temperaturach 5,15,25,35 i 45°C. Przyjęto dwie procedury dozowania domieszki: wraz z wodą zarobową i opóźnioną – po 2 minutach od momentu dodania wody. Właściwości mineralogiczne i chemiczne cementu przedstawia tablica 6.

Tablica 6. Skład chemiczny i mineralogiczny cementu użytego w [83]

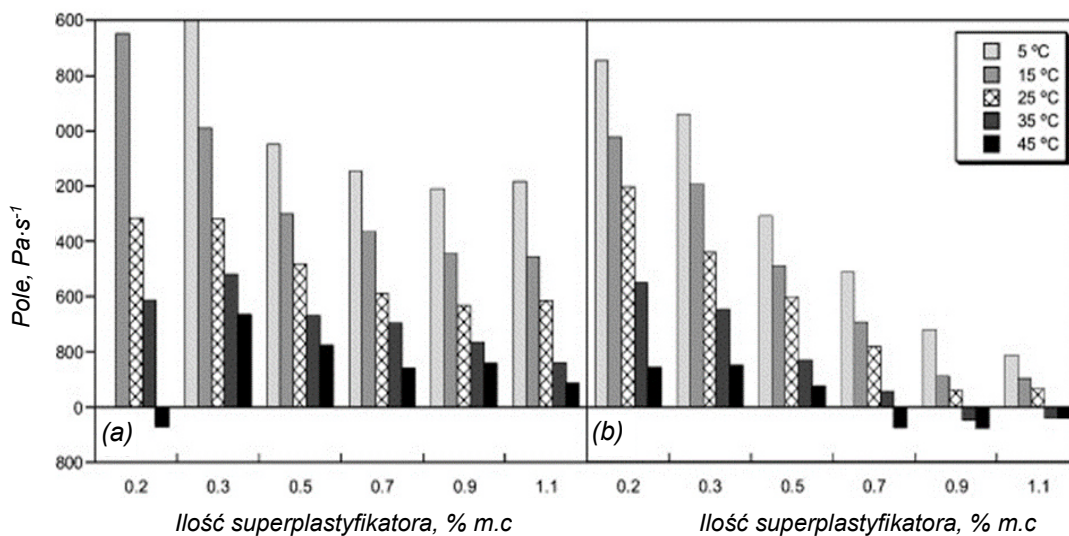
Skład chemiczny									
składnik	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	Na ₂ O _{eq}
[%]	19,86	5,61	3,40	62,38	2,14	3,36	0,97	0,15	0,78
Skład mineralogiczny									
minerał	C3S		C2S		C3A		C4AF		
[%]	50,86		18,57		9,13		10,34		

Badania właściwości reologicznych współosiowym reometrem rotacyjnym VT 550, pozwoliły uzyskać krzywe płynięcia widoczne na rys.28.

Widoczny jest wyraźny wpływ temperatury na opór zaczynów podczas ścinania, który jest tym większy im niższa jest temperatura. Krzywe płynięcia rejestrowane podczas rosnących prędkości ścinania są charakterystyczne dla zachowania pseudoplastycznego, przez niektórych badaczy uważane jest za szczególny przypadek tiksotropii [84]. To zachowanie może mieć wpływ na obserwowaną często redukcję parcia mieszanek betonu samozagęszczalnego na deskowanie. Miarą tiksotropii bądź sztywnienia mieszanek w ogóle, może być pole zawarte pomiędzy krzywą płynięcia dla rosnących i malejących prędkości ścinania (rys. 29).



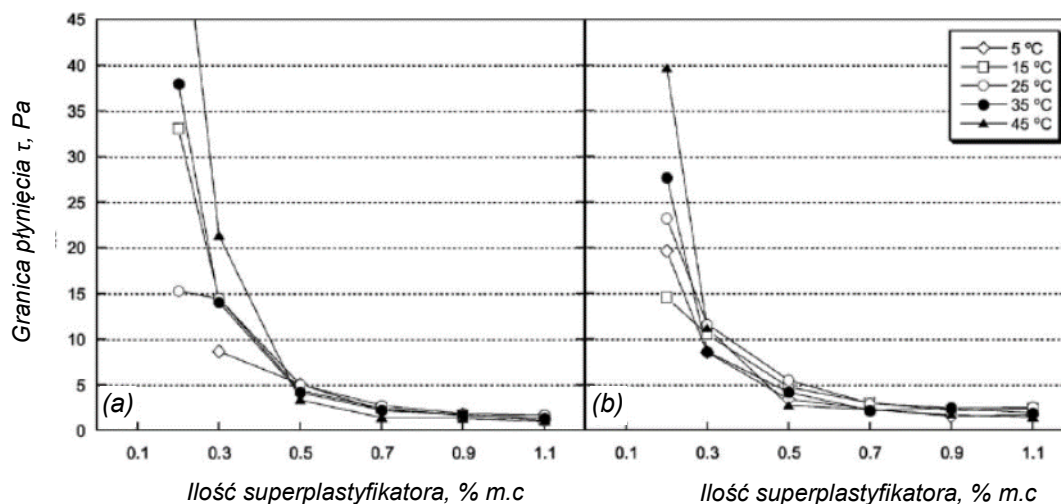
Rys. 28. Krzywe płynięcia zaczynów cementowych z 0,3 % m.c superplastyfikatora w temperaturach 5-45 °C. Linie ciągłe odpowiadają rosnącej prędkości ścinania, a kropkowane malejącej [83]



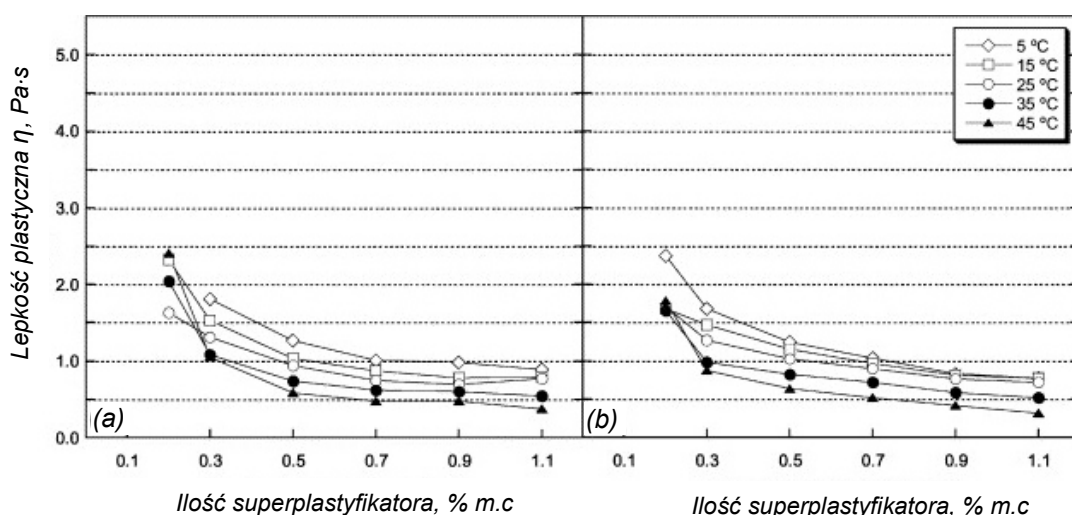
Rys. 29. Zależność pola pomiędzy krzywymi płynięcia zaczynów od temperatury dla dozowania superplastyfikatora wraz z wodą zarobową (a) i dozowania opóźnionego (b) [83]

Widoczna jest silna zależność wielkości pola od temperatury, szczególnie w przypadku dozowania domieszki razem z wodą zarobową na początku mieszania. Wpływ temperatury jest wyraźniejszy w zaczynach z ilością domieszki poniżej dawki saturacji. Dawka ta jest definiowana jako ilość superplastyfikatora powyżej której nie uzyskujemy znaczącej poprawy właściwości reologicznych. Z rysunku 30 wynika, że jest to ilość

superplastyfikatora 0,7 % masy cementu, niezależnie od temperatury i sposobu dozowania. W przypadku gdy superplastyfikatora będzie mniej niż 0,7 % m.c, obserwowany jest wyraźny wpływ temperatury na dynamiczną granicę płynięcia. Wpływ jest tym większy im mniej jest domieszki upłynniającej. Opóźnione dodanie domieszki upłynniającej sprawia, że zmiany dynamicznej granicy płynięcia są mniejsze, ale co do trendu są zgodne z tymi obserwowanymi gdy superplastyfikator dodawany był na początku mieszania. Lepkość plastyczna zaczynów zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury i nie stwierdzono wpływu procedury mieszania na jej wielkość (rys.31).



Rys. 30. Zależność granicy płynięcia od temperatury dla dozowania superplastyfikatora wraz z wodą zarobową (a) i dozowania opóźnionego (b) [83]



Rys. 31. Zależność lepkości od temperatury dla dozowania superplastyfikatora wraz z wodą zarobową (a) i dozowania opóźnionego (b) [83]

Pewnym niedostatkim cytowanych badań jest zastosowana procedura badawcza, w której bada się wpływ ogrzewania bądź schładzania zaczynu przygotowanego w

temperaturze 21°C. W praktyce raczej spotykamy się, że mieszanki przygotowane ze składników o temperaturze bliskiej temperaturze otoczenia. Jeżeli jest to temperatura powyżej 25 °C (okres letni) to możliwa jest temperatura mieszanki w okolicach 30 stopni a to już może wprowadzić istotne różnice w zachowaniu mieszanki odbiegające od tych przedstawionych w cytowanej pracy. Nie mniej opóźnione dozowanie, które uważane jest jako bardziej efektywne wymaga rozpatrzenia w kontekście wpływu temperatury. Może być środkiem zmniejszającym wrażliwość mieszanek na zmiany temperatury. W cytowanej pracy autorzy zwracają uwagę również na „nieczułość” modeli reologicznych służących do aproksymowania granicy płynięcia i lepkości plastycznej badanych zaczynów cementowych. Podobna sytuacja może mieć miejsce również w przypadku zapraw cementowych o składzie takim samym jak zaprawa w mieszance betonowej. Zaprawa taka z uwagi na dużą ilość zaczynu cementowego będzie miała charakterystyki zbliżone bardziej do zaczynu cementowego niż mieszanki betonowej. Wywołuje to konieczność korekty składu mieszanki zaprawy tak by większą rolę w kształtowaniu jej właściwości reologicznych odgrywało kruszywo, podobnie jak to dzieje się w mieszance betonowej. Możemy ją traktować jako układ kompozytowy, w którym fazą rozpraszaną jest kruszywo a fazą rozpraszającą zaczyn cementowy.

2.7.2 BADANIA DOTYCZĄCE WPLYWU TEMPERATURY – DOŚWIADCZENIA NA ZAPRAWACH

Podstawową przewagą zaprawy nad zaczynem cementowym jest obecność piasku, dzięki czemu lepiej oddaje zachowanie mieszanki betonowej. Ziarna piasku wprowadzają siły spójności kapilarnej, które mają znaczenie w kształtowaniu urabialności. Idąc dalej przygotowanie zaprawy wymaga znacznie mniej nakładów (pracy, materiałów itp.) niż przygotowanie mieszanki betonowej. Kontrola temperatury składników zaprawy również nie jest tak problematyczna jak kontrola składników mieszanki betonowej.

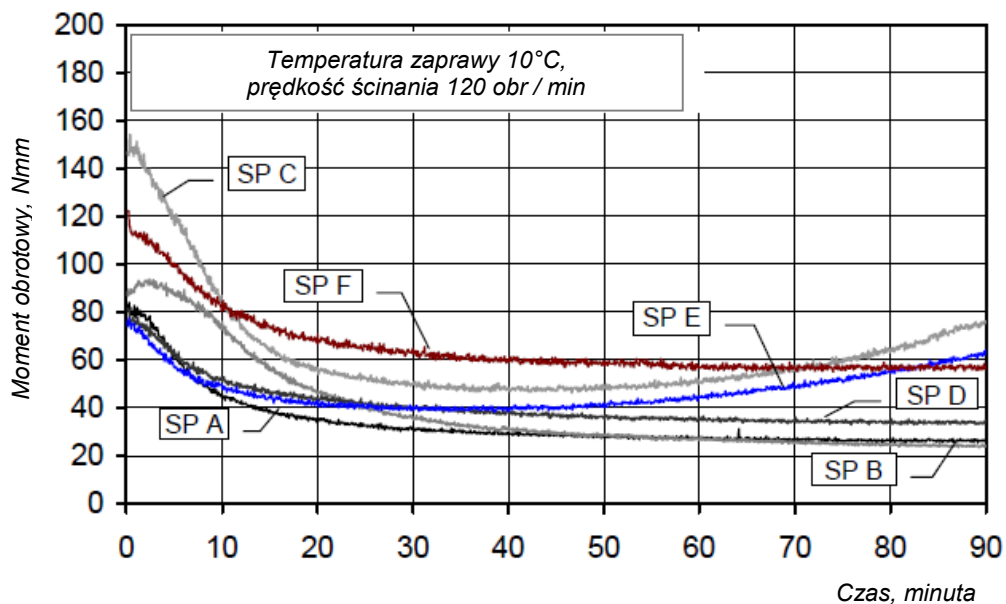
Bramesuber et al. [85]. przeprowadził badania wpływu temperatury na właściwości zapraw, które są zalecane przez niemieckie wytyczne do wykonywania mieszanek betonu samozagęszczalnego. Proporcje podano w tablicy 7, jest to zaprawa z cementu portlandzkiego CEM I 32,5 R z dodatkiem mączki wapiennej. Zaprawy upłynniano 6 odmiennymi superplastyfikatorami PCE. Ilość domieszki dobierano tak by uzyskać średnicę rozplywu w granicach 265-275 mm. Domieszki różniły się budową polimeru, zmienne były długości łańcuchów głównych i bocznych. Odmienna była również zawartość polimeru w roztworze. Nie przekłada się ona na ilość domieszki niezbędnej do uzyskania założonego upłynnienia. W przypadku SP A, B, C, D widoczne jest nawet to, że potrzeba większej ilości domieszki im bardziej ta jest skoncentrowana. Tablica 8 przedstawia właściwości domieszek. Brak jest informacji z jakich grup są zbudowane polimery. Domieszki SP A i B mają te same łańcuchy boczne i główne różnią się jedynie gęstością łańcucha bocznego. Łańcuch superplastyfikatora B jest bardziej gęsty. Superplastyfikator C jest superplastyfikatorem do stosowania przy produkcji prefabrykatów mającym zapewnić wysoką wczesną wytrzymałość Superplastyfikatory E i F to gotowe dostępne na rynku domieszki stąd stężenie polimeru jest najniższe.

Tablica 7. Skład i właściwości zapraw

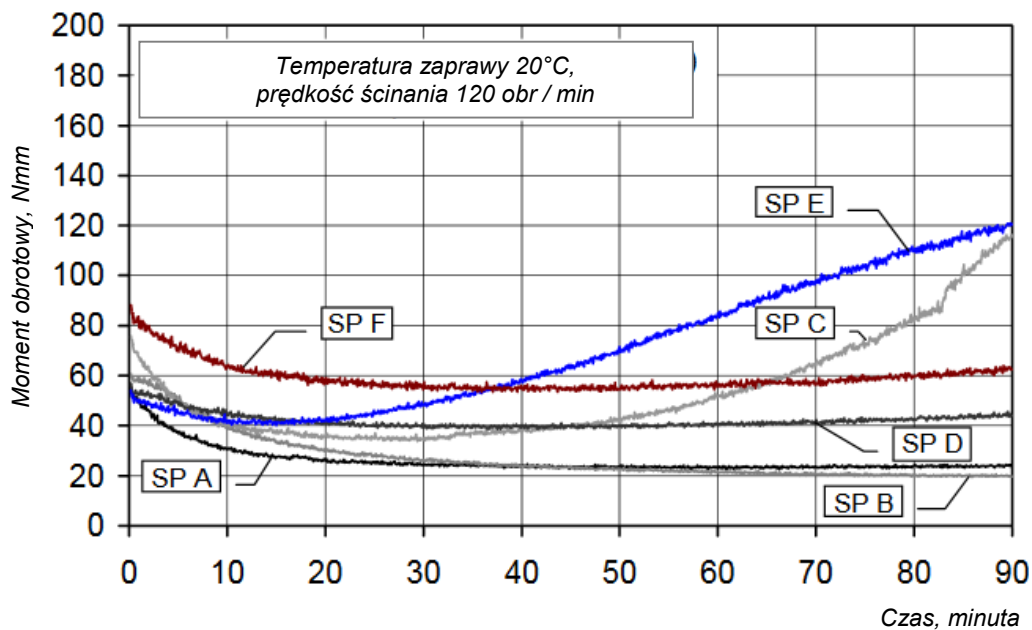
Składnik	Masa, kg
Cement	463
Mączka wapienna	432
Woda	255
Piasek 0-2 mm	1097
Zawartość powietrza	1,5%
w/c	0,55
w/s(<125 μ m)	0,28

Tablica 8. Charakterystyka domieszek upłynniających

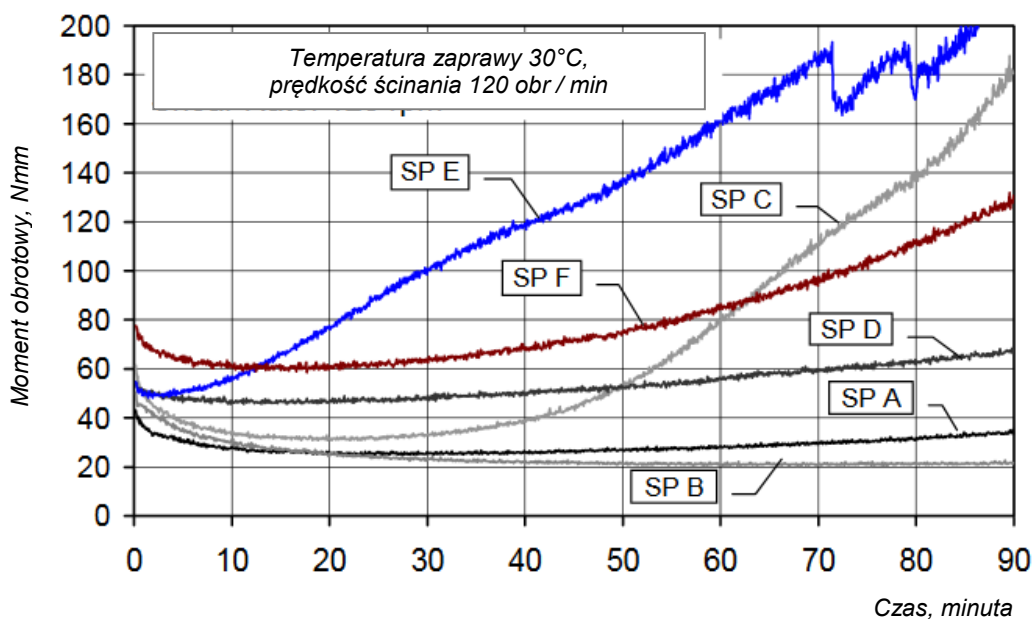
Domieszka	Długość		Zawartość substancji czynnej [%] obj.	Ilość SP % masy cementu	Średnica rozptywu zaprawy o temperaturze 20°C [mm]	Czas wypływu z V lejka zaprawy o temperaturze 20°C [s]
	łańcuch główny	łańcuch boczny				
SP A	średni	krótki	35	2,40	275	7,0
SP B	średni	krótki	50	3,0	270	7,0
SP C	krótki	długi	30	2,14	270	8,5
SP D	długi	średni	40	2,51	265	8,0
SP E	średni	krótki+długi	18	4,20	265	7,0
SP F	średni	długi	17	5,28	275	9,5



Rys. 32. Opór ścinania zapraw przy prędkości równej 120 obr/min mierzony przez 90 minut dla zapraw o temperaturze 10°C [85].



Rys. 33. Opór ścinania zapraw przy prędkości równej 120 obr/min mierzony przez 90 minut dla zapraw o temperaturze 20°C [85]



Rys. 34. Opór ścinania zapraw przy prędkości równej 120 obr/min mierzony przez 90 minut dla zapraw o temperaturze 30°C [85]

Porównując wykresy oporów ścinania zapraw z SP A i B (są to te same superplastyfikatory różniące się gęstością łańcucha bocznego) widzimy wyraźny wpływ temperatury na początkowy opór ścinania jest on tym wyższy im niższa jest temperatura. Wraz z upływem czasu domieszki stają się bardziej efektywne - widoczne to jest w

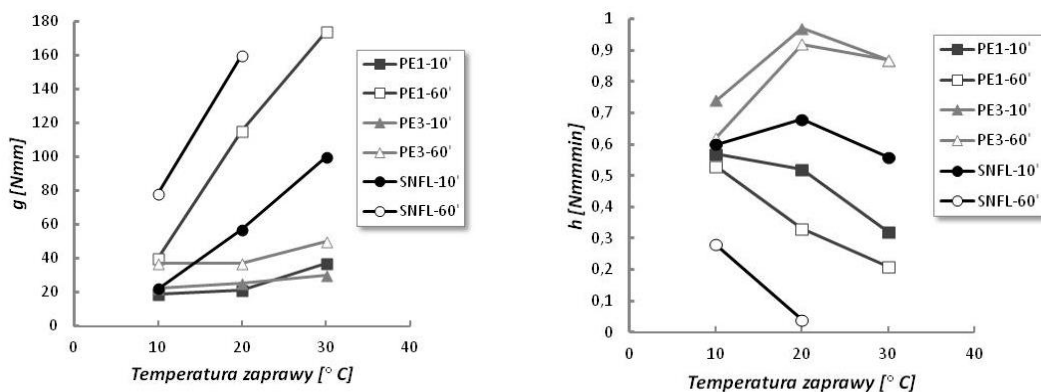
postaci zmniejszenia oporu ścinania. Domieszka B o większej gęstości łańcucha bocznego jest bardziej skuteczna niż domieszka A. Skuteczność ta wzrasta wraz ze wzrostem temperatury. Przyczyną tego może być większa skuteczność zawady sterycznej spowodowana bardziej gęstym łańcuchem bocznym. Z drugiej strony gęsty łańcuch boczny może utrudniać adsorpcję na fazach cementu i hydratacji, stąd większe opory ścinania na początku. Superlastyfikator C, który jest zalecany do wykorzystania w zakładach prefabrykacji. Zaprawa nim upłynniona charakteryzuje się wyraźnym wzrostem oporu ścinania w 30-40 minucie. Tempo wzrostu jest wyższe im wyższa temperatura. Nie jest to oczywiście wadą, ale zaletą gdyż to może oznaczać szybsze rozpoczęcie procesu wiązania. W zakładach prefabrykacji jest to jak najbardziej pożądane. Problemem może być natomiast niska efektywność domieszki C w niższych temperaturach. Jeśli zakład prefabrykacji dysponuje ogrzewaną halą nie stanowi to większego problemu, ale gdy tak nie jest problematyczne może być uzyskanie założonej konsystencji w temperaturach ok. 10°C. działanie dyspergujące domieszki C wzrasta wraz ze wzrostem temperatury, która wyraźnie przyspiesza utratę urabialności zaprawy w czasie. Przyjęty sposób badania nie pozwala na wyznaczenie parametrów reologicznych zapraw które umożliwiają porównanie działania domieszek w ilościowy sposób. Pewnym wyjściem jest odczytanie wielkości momentów oporu ścinania na początku i na końcu badania i prównanie tych wielkości (tablica 9)

Tablica 9. Początkowe i końcowe momenty oporu ścinania zapraw odczytane z rys. 32,34 i 35

Domieszka	Początkowy moment oporu ścinania M [Nmm], w temperaturze [°C]			Względna zmiana oporu w skrajnych temperaturach [%]	Końcowy moment oporu ścinania M [Nmm], w temperaturze [°C]			Względna zmiana oporu w skrajnych temperaturach [%]
	10	20	30		10	20	30	
	SP A	80	57		41	49	27	
SP B	90	60	56	38	26	20	21	-19
SP C	150	78	61	59	77	117	180	134
SP D	78	56	57	27	33	43	64	94
SP E	77	56	57	26	62	120	200	223
SP F	121	89	79	35	58	62	135	133

Wszystkie badane domieszki wykazują najmniejszą efektywność w temperaturze 10 °C. maksymalny efekt działania domieszek (minimalny moment oporu ścinania) pojawia się tym szybciej im wyższa jest temperatura. Wzrost temperatury zwiększa adsorpcję domieszek na ziarnach i produktach hydratacji. Z punktu widzenia odporności na działanie temperatury w początkowym okresie najbardziej odporne są domieszki D i E o długim i średnim łańcuchu głównym, przy czym zaprawa z SP E o temperaturze 30 °C wyraźnie sztywnieje do takiego stopnia, że wyklucza to jej praktyczne wykorzystanie. Podobnie jak zaprawy z SP E, C i F w których łańcuch boczny jest długi – najprawdopodobniej ulega on spętleniu przez co zawada steryczna przestaje funkcjonować. Domieszki w których zastosowano krótkie łańcuchy boczne SP A i B, są w stanie utrzymać efekt upłynnienia przez co najmniej 90 minut.

Cytowane wyniki badań obrazują różnorodność wpływu temperatury, ale też ukazują możliwości jego kształtowania przez odpowiednią polimeryzację domieszki upłynniającej. Domieszki SP A i B mają te same łańcuchy boczne i główne różnią się jedynie gęstością łańcucha bocznego. Łańcuch superplastyfikatora B jest bardziej gęsty. Obszernie wpływ temperatury został ujęty w pracach Gołaszewskiego [86],[87]. Wpływ temperatury był badany za pomocą reometrycznego testu urabialności zapraw normowych. Szeroki program badań pozwolił na sformułowanie szeregu ogólnych wniosków na temat interakcji wpływu temperatury z rodzajem superplastyfikatora.



Rys. 35. Wpływ temperatury na g i h zapraw z CEM I i superplastyfikatorami PE i SNFL ($w/c=0,4$; $SP=2,5\%$ m.c.) [86]

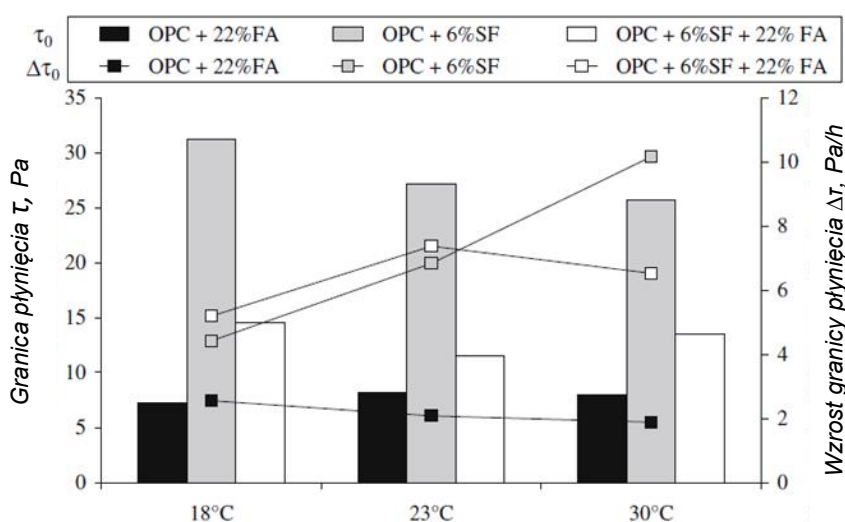
Autor badał wpływ temperatury 10, 20 i 30 °C na granicę płynięcia i lepkość plastyczną zapraw normowych. Rys. 35 przedstawia wybrane wyniki badań obrazujące możliwe do zaobserwowania efekty wywołane zmianami temperatury. W temperaturze 10 °C po 10 minutach od dodania wody do zaprawy parametr g nie jest zależny od rodzaju superplastyfikatora. Różnice w efektywności domieszek pojawiają się wraz ze wzrostem temperatury. Rosnąca temperatura powoduje wzrost wartości parametru g , w tempie zależnym od rodzaju zastosowanego superplastyfikatora. Najmniejszy wpływ wywiera wzrost temperatury na działanie superplastyfikatorów na bazie polieterów, podczas gdy efekty działania superplastyfikatora na bazie sulfonowanej żywicy formaldehydowo-naftalenowej są silnie uzależnione od temperatury – granica płynięcia wyraźnie wzrasta, będąc w temperaturze 30 °C pięciokrotnie większą niż w temperaturze 10 °C. Parametr h , charakteryzujący lepkość plastyczną, również wykazuje zależność od temperatury. Charakter zależności uzależniony jest od rodzaju superplastyfikatora i od czasu. Parametr h dla zapraw z superplastyfikatorem SNFL w 10 minucie nie zmienia się znacząco we wszystkich trzech temperaturach, ale po 1 godzinie następuje do jego spadku wraz ze wzrostem temperatury. W przypadku superplastyfikatorów PE widoczny jest wpływ na wartość h , z tym że dla PE1 (SP o małej masie cząsteczkowej) wartość h maleje ze wzrostem temperatury, a dla PE3 (SP o dużej masie cząsteczkowej) wartość h osiąga maksimum w temperaturze 20 °C. Na podstawie wyników badań [86],[87] stwierdzić można, że rodzaj domieszki upłynniającej jest jednym z głównych czynników pozwalających kształtować wpływ temperatury na urabialność. Domieszki na bazie polikarboksylanów i polietylenów czyli domieszki o budowie łańcuchowej w

najmniejszym stopniu są wrażliwe na działanie temperatury. Domieszki działające w oparciu o efekt odpychania elektrostatycznego są wrażliwsze. Wpływ rodzaju superplastyfikatora na kształtowanie odporności na wpływ temperatury został również zaobserwowany w [88],[89].

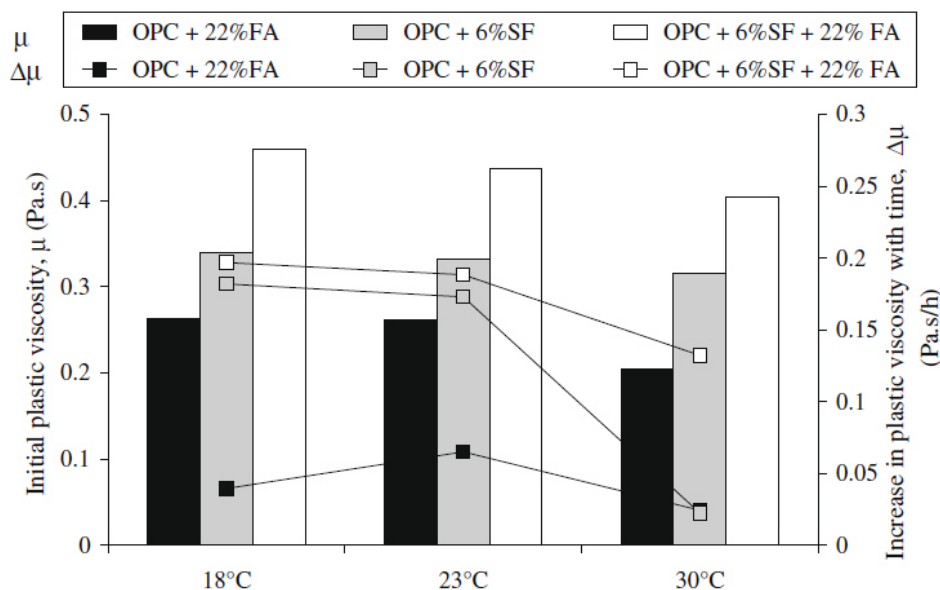
Petit et al. [89] określili wpływ temperatury na właściwości reologiczne zapraw pochodzących z mieszanek betonu samozagęszczalnego. Zapewne ograniczenia pomiarowe stosowanego reometru wymusiły konieczność ograniczenia wielkości kruszywa do $315\mu\text{m}$. Wspomniana zaprawa bliższa jest zatem zaczynowi cementowemu i w cytowanej pracy określa się ją mianem mikrozaprawy. Zaprawy te były wykonane na cemencie portlandzkim z dodatkiem popiołów lotnych, pyłów krzemionkowych oraz cementu z dodatkiem żużla i mielonego kamienia wapiennego. Do ich upłynnienia były stosowane superplastyfikatory o różnych mechanizmach upłynnienia zarówno elektrostatycznym jak i sterycznym.

Tablica 10. Składy zapraw będących przedmiotem badań [89]

Składnik	Zaprawa						
	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
CEM I	737	905	705	705	705		
CEM II/ BM (S-L) 32,5R						837	732
Pył krzemionkowy		57	57	57	57		
Popiół lotny	215		215	215	215		76
Przesiany piasek $\leq 315\mu\text{m}$	686	686	686			728	
SP PCP					0,39	0,27	0,27
SP PNS	0,50	0,50	0,50				
SP PMS				0,88			
w/s	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,53	

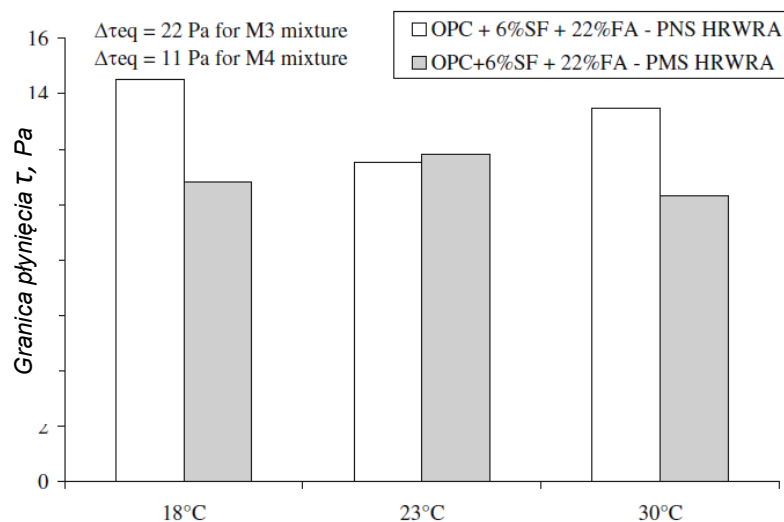


Rys. 36 Wpływ temperatury na granicę płynięcia zapraw M1, M2 i M3 i jej zmianę w czasie [89]

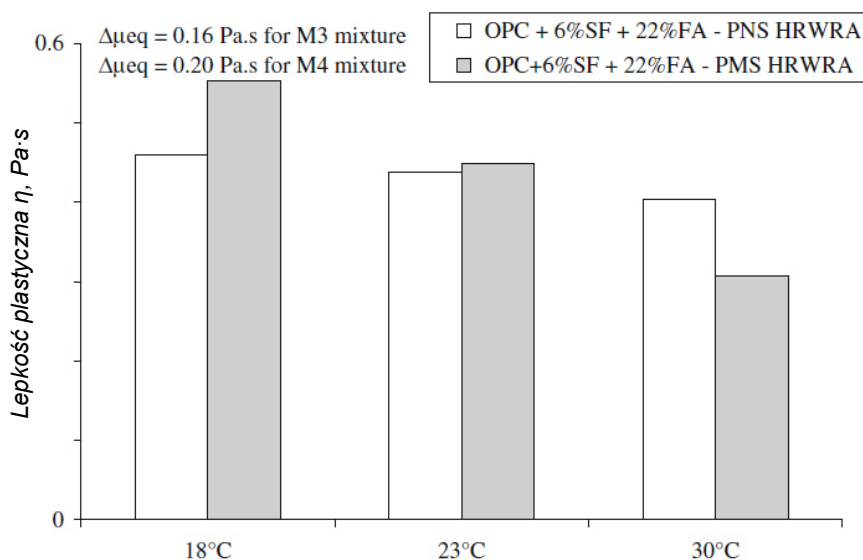


Rys. 37. Wpływ temperatury na lepkość plastyczną zapraw M1, M2 i M3 i jej zmianę w czasie [89].

Rys. 36 i 37 przedstawiają początkowe wielkości granicy płynięcia i lepkości plastycznej zapraw M1, M2 i M3 (słupki) oraz zmianę wielkości (kwadraty połączone odcinkami). Wpływ temperatury jest zależny od rodzaju dodatków mineralnych, wpływ ma charakter zarówno jakościowy i ilościowy. Zaprawa M1 z cementem portlandzkim i popiołem lotnym jest niewrażliwa na działanie temperatury w przedziale 18-30°C, granica płynięcia nie ulega znaczącym zmianom, lepkość plastyczna w 30°C się zmniejsza. W przypadku zaprawy M1 wzrost temperatury nie przyspiesza wzrostu wielkości granicy płynięcia czy lepkości plastycznej. Dodatek mikrokrzemionki powoduje wyraźny wzrost granicy płynięcia, która ulega zmniejszeniu wraz ze wzrostem temperatury. W tym wypadku widoczne jest synergistyczne oddziaływanie czasu i temperatury w zwiększaniu granicy płynięcia zaprawy M1, lepkość plastyczna również się zmniejsza wraz ze wzrostem temperatury. Popiół lotny dodany do zaprawy z pyłem krzemionkowym pozwala zmniejszyć wpływ temperatury. Co interesujące to zaprawa w temperaturze 20 °C zaprawa w 20 stopniach ma największą granicę płynięcia, w tej temperaturze jest również obserwowany największy wzrost granicy płynięcia w czasie. Stosując popiół lotny krzemionkowy możemy zwiększyć odporność mieszanki na zmiany wywołane temperaturą. Zmiana rodzaju superplastyfikatora PNS na PMS pozwala w przypadku zaprawy z popiołem i pyłem krzemionkowym zmniejszyć wrażliwość na zmiany wywołane temperaturą. Co szczególnie godne uwagi, zmienia się temperatura przy której jest obserwowana maksymalna granica płynięcia. W przypadku domieszki PNS jest to 18 °C, a w przypadku superplastyfikatora PMS jest to 23°C.



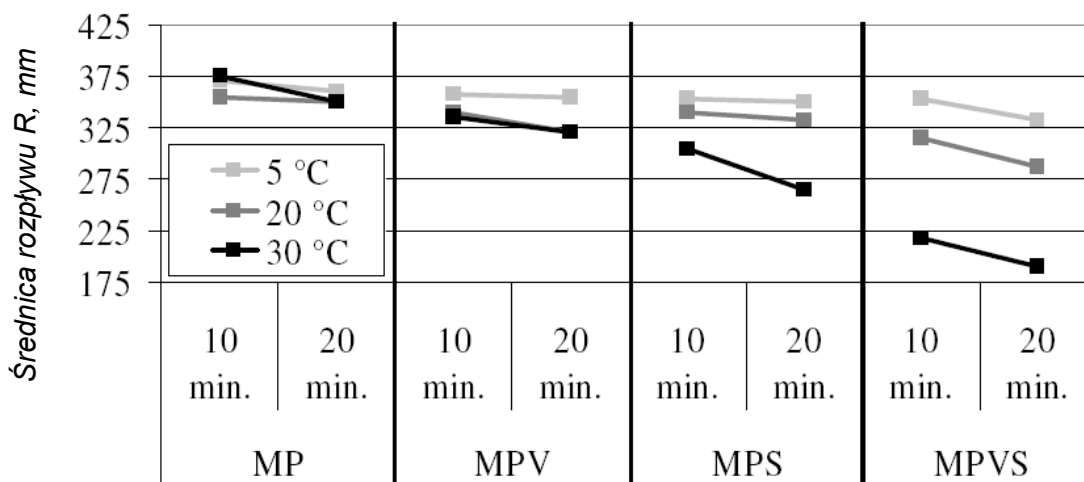
Rys. 38. Wpływ temperatury na granicę płynięcia zapraw M3 i M4 i jej zmianę w czasie [89]



Rys. 39. Wpływ temperatury na lepkość plastyczną zapraw M3 i M4 i jej zmianę w czasie [89]

Lepkość zapraw zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury, ale wpływ temperatury w przypadku superplastyfikatora PMS jest wyraźniejszy. W mieszankach betonowych istnieje konieczność stosowania oprócz domieszek upłynniających domieszek o innych funkcjach. Spośród nich wymienić można domieszki zwiększające lepkość, przeciwskurczowe czy napowietrzające. Domieszki przeciwskurczowe czy napowietrzające modyfikują w zasadzie właściwości betonu stwardniałego, ale na etapie ich implementacji wchodzi w interakcje z domieszkami upłynniającymi. Dlatego nie pozostają one bez wpływu na efekty działania zmiennej temperatury na właściwości mieszanek. Wpływ temperatury na właściwości zapraw z domieszkami upłynniającymi, redukującymi skurcz i zwiększającymi lepkość badał Schmidt w [90]. Badany był wpływ temperatury na średnicę rozplywu zapraw, wykonanych z cementu portlandzkiego,

kruszywa drobnego do 4 mm i z domieszek: upłynniających, zwiększających lepkość i redukujących skurcz. Zastosowano superplastyfikator grupy PCE (P), środek zwiększający lepkość na bazie celulozy (V) oraz środek redukujący skurcz na bazie związków powierzchniowo czynnych (S). Skład zapraw wynikał ze składów mieszanek betonowych o $w/s=0,35$ i ilości spoiwa 485 kg/m^3 .



Rys. 40. Średnica rozplywu zapraw dla różnych kombinacji domieszek w zależności od temperatury. MP zaprawa z SP, MPV zaprawa z SP, DZL V, MPS zaprawa z SP,DRS S, MPVS zaprawa z SP, DZL V i DRS S [90]

Rysunek 40 przedstawia zmiany średnicy rozplywu wywołane wzrostem temperatury zapraw i zmieniającym się składem zapraw. Wraz ze wzrostem temperatury rośnie wpływ zastosowanych domieszek zwiększających lepkość V i domieszek redukujących skurcz S na średnicę rozplywu. Najwyraźniejszą redukcją średnicy rozplywu pod wpływem rosnącej temperatury charakteryzuje się zaprawa, w której jednocześnie użyto domieszek zwiększających lepkość i redukujących skurcz. Zwraca uwagę utrzymujący się na stałym poziomie rozplyw zapraw w temperaturze 5°C. Jednakże zdaniem autorów jest to konsekwencją słabej odporności zapraw na segregację. Słaba odporność na segregację jest konsekwencją zbyt niskiej lepkości mieszanki. Zbyt niska lepkość mieszanki wpływa również na wzrost czasu wypływu w przypadku zapraw MPS i MPVS badanych w temperatur 5°C. Dłuższy czas jest spowodowany blokowaniem wypływu lejka przez kruszywo. Uwidocznione są tutaj niedoskonałości pomiarowe przyjętych metod badawczych. Jednakże jest wyraźnie nakreślony wpływ temperatury na urabialność zapraw. Wraz ze wzrostem temperatury maleje średnica rozplywu. Ważne jest stwierdzenie, że metyloceluloza i środek zmniejszający skurcz wyraźnie powiększa utratę urabialności.

2.7.3 *BADANIA DOTYCZĄCE WPŁYWU TEMPERATURY – DOŚWIADCZENIA NA MIESZANKACH BETONOWYCH*

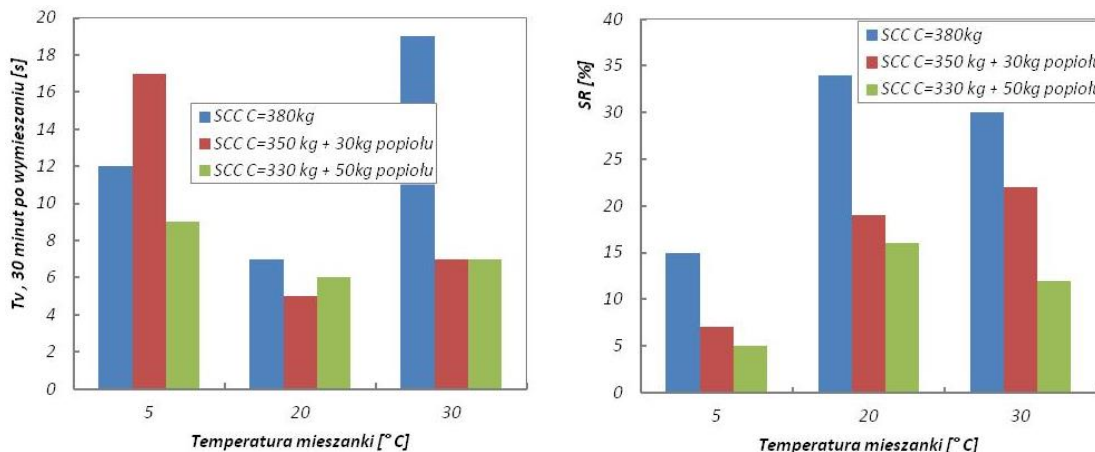
Relatywnie najmniej jest prac dotyczących badań wpływu temperatury na urabialność mieszanek betonowych. Przyczyny tego są bardzo prozaiczne. Badania mieszanek są bardzo materiałochłonne i pracochłonne, problematyczne jest również uzyskanie i utrzymanie założonych temperatur mieszanek. Pomimo tych niedogodności można znaleźć kilka prac, w których określa się wpływ temperatury na właściwości mieszanek betonowych.

Hövelin i Lohaus [91] badali wpływ temperatury na urabialność betonów samozagęszczalnych trzech typów. Dwa z nich to tzw. mieszanki pyłowe a trzeci to mieszanka o znacznie mniejszej ilości zawartości frakcji pyłowej. Stosunek w/s był równy 0,28 i 0,32 oraz 0,28 dla mieszanki o najmniejszej ilości frakcji pyłowej. Rozpływ mieszanek o największej ilości frakcji pyłowej 600 kg/m^3 o w/s=0,28 zmieniał się od 750 mm do 820 mm w przedziale temperatur 5-30 °C.

Dla mieszanki o mniejszej ilości frakcji pyłowej równej 570 kg/m^3 i o w/s=0,32, można sądzić że ilość zaczynu spoiwowego jest zbliżona, rozpływ był zbliżony w temperaturach 20-30 °C. w obu temperaturach początkowy rozpływ wynosił ok. 750 mm i malał w ciągu 60 minut do 550 i 600 mm – większy był w wyższej temperaturze. W temperaturze 5°C początkowo średnica rozplwu była nieznacznie wyższa od 600 mm, ale z czasem się zwiększała. Mieszanka o ilości frakcji pyłowych 600 kg/m^3 i o w/s=0,28 to mieszanka o wyższej klasie rozplwu SF 3 w 20 °C jej rozpływ osiągał 800 mm, w temperaturze 30 °C początkowo był zbliżony ale po godzinie mieszanka traciła zdolność płynięcia podczas gdy w 20 °C średnica rozplwu zmniejszała się o 100 mm. W niskich temperaturach początkowo średnice rozplwu były najmniejsze, ale później efektywność działania domieszki się zwiększała i mieszanki osiągały średnice wyraźnie większe niż w temperaturach 20-30°C. Czasy rozplwu generalnie były większe w niższych temperaturach.

Schmidt i Kühne [90] badali wpływ dodatku krzemionkowego popiołu lotnego na właściwości mieszanek betonu samozagęszczalnego. Ilość cementu w mieszance referencyjnej o w/s=0,38 wynosiła 380 kg/m^3 , część cementu była zastępowana masowo popiołem w ilości 30 i 50 kg/m^3 . Z różnicy gęstości cementu i popiołu wynika to, że w mieszanach z popiołem, zaczynu spoiwowego było więcej, a to nieco fałszuje obraz wpływu temperatury. Ponadto sygnalizowana przez autorów segregacja mieszanek również utrudnia postawienie poprawnych wniosków. Z rysunków wynika, że wpływ temperatury na czas wypływu i podatność na segregację jest bardzo wyraźny. By postawić ogólne wnioski jest potrzebna głębsza analiza. Przyjęto identyfikować czas wypływu z lejka z lepkością mieszanki. Dłuższy czas wypływu to większa lepkość, a większa lepkość oznaczać powinna mieszankę mniej podatną na segregację. Jest to słuszne w przypadku gdy mieszanka jest stabilna. Takimi mieszankami nie były mieszanki z samym cementem i z dodatkiem 30 kg popiołu lotnego. Co istotne odmienna była temperatura, w której segregacja następowała. W przypadku mieszanki bez popiołu (SCC 0) była to temperatura maksymalna, mieszanka z dodatkiem 30 kg popiołu (SCC 1) ulegała segregacji w temperaturze najniższej. Tym wytłumaczyć można długi czas

wypływu tych mieszanek wynoszący 17-19 sekund. Kruszywo opadające w dół blokowało ujście V-lejka. Kruszywo blokuje również sito # 5 mm używane do oznaczania wskaźnika SR, dlatego też podatność na segregację wyrażona wskaźnikiem SR tych mieszanek ma wielkość, która nie sugeruje segregacji.

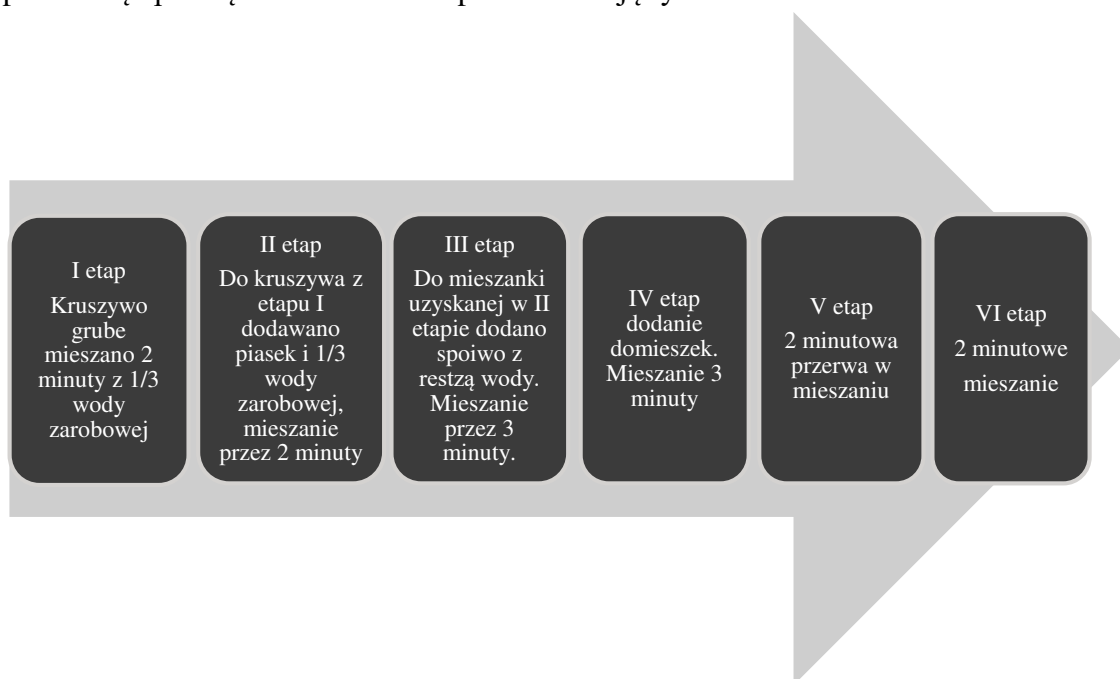


Rys. 41. Wpływ mieszanek betonowych z V lejka po 30 minutach od wymieszania i wskaźnik segregacji [90]

W przypadku mieszanek betonowych bez popiołu (SCC 0) wzrost temperatury, zmniejsza lepkość. Zmniejszenie w temperaturze 30 °C jest na tyle duże, że powoduje segregację składników mieszanki. Czas wypływu mieszanki (SCC 2) z 50 kg popiołu jest największy w temperaturze 5 °C, w temperaturach 20 i 30 °C jest porównywalny i najkrótszy. Onacza to że temperatura zmniejsza również lepkość tych mieszanek, ale wpływ nie jest tak silny bo nie dochodzi do segregacji. Odmienny jest wpływ temperatury na lepkość mieszanki SCC 1 z 30 kg popiołu, która zwiększa się wraz ze wzrostem temperatury. Zachowanie mieszanek SCC0 i SCC2 znajduje pewne uzasadnienie w wynikach badań wpływu temperatury prowadzonych na zaczynach cementowych, których lepkość się zmniejszała wraz ze wzrostem temperatury. Jeżeli zmniejszenie lepkości jest zbyt duże, zaczyn cementowy nie jest w stanie utrzymać w równomiernym rozproszeniu ziaren kruszywa. Obserwowane efekty wpływu temperatury, w szczególności utrata stabilności mieszanki może być wyeliminowana przez stosowanie domieszek zwiększających lepkość. Z drugiej strony i one nie są niewrażliwe na działanie zmiennej temperatury [92]. Szczególnie dotyczy to domieszek na bazie hydroksypropylometylocelulozy. Wzrost temperatury powoduje wyraźne zmniejszenie lepkości mieszanek. Wpływ na działanie temperatury domieszek na bazie kopolimerów syntetycznych nie jest wyraźny. Zmniejszenie zdolności stabilizujących domieszek na bazie skrobii jest sygnalizowane w [93] gdzie zaobserwowano wyraźny bleeding mieszanek w temperaturach 30 °C. Wpływ temperatury na stabilność mieszanki jest widoczny w badaniach [94]. Jest na tyle mały, że nie dyskwalifikuje mieszanek, Visual Stability Index zmienia się ze stopnia 0 na 1 w podwyższonych temperaturach. Autorzy określili wpływ temperatury na średnicę i czas rozplwu samozagęszczalnych mieszanek betonowych. Zakres zmian temperatury mieszanek był bardzo szeroki od -0,5 poprzez 7, 14, 21, 28, 36, do 43°C. Za warunki referencyjne uznano temperaturę 21°C. Czas i

średnice rozplywu mieszanek o składach przedstawionych w tablicy ulegały wyraźnym wpływom temperatury co jest zobrazowane na rys.

Badania pozwoliły określić efektywność domieszek w zmiennych temperaturach. W granicach $-0,5 -20\text{ }^{\circ}\text{C}$, zaobserwowano większe średnice rozplywu o około 20-25 mm, nie jest to dużo ale zasadniczo odbiega od prezentowanych wcześniej wyników badań, w których w niższych temperaturach domieszki PCE działają początkowo gorzej. W temperaturach powyżej $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ średnice i czas rozplywu ulegają zmniejszeniu, które wzrasta wraz ze wzrostem temperatury. Średnica rozplywu mieszanek o większym rozplywie (w których zastosowano domieszkę stabilizującą) zmniejsza się bardziej pod wpływem rosnącej temperatury. Może to być efektem działania domieszki zwiększającej lepkość jest to sygnalizowane przez innych badaczy [95]. Ponieważ sama większa ilość superplastyfikatora w mieszankach SF 635 i SF 711 powinna wywołać efekt odwrotny. To odmienne w kontekście wcześniej cytowanych wyników badań zachowanie mieszanek może być związane z przyjętą procedurą mieszania, która jest zmodyfikowaną procedurą opisaną w ASTM C 192 przedstawia ją rys. 42.



Rys. 42. Procedura przygotowania mieszanek betonowych stosowana w [94]

Proces mieszania trwa łącznie 14 minut. Jest to dosyć długo, dlatego też jest prawdopodobne, że zwiększenie średnic rozplywu mieszanek w temperaturach niższych jest z tym związane. Przez blisko kwadrans mieszania zapewne pojawią się w mieszance fazy mineralne, które są odpowiedzialne za adsorbowanie domieszki a w konsekwencji za skuteczność jej działania. Zmniejszenie średnic w temperaturach wyższych niż $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ również może mieć związek z czasem mieszania. Może dojść do wzrostu powierzchni adsorpcji, za którą mogą nie odpowiadać tylko substancje o dodatnim potencjale zeta. Właściwości składników, skład mieszanek i wyniki badan zestawiono w tablicach 11-13 i na rysunkach 43.

Tablica 11. Skład chemiczny cementu i popiołu lotnego

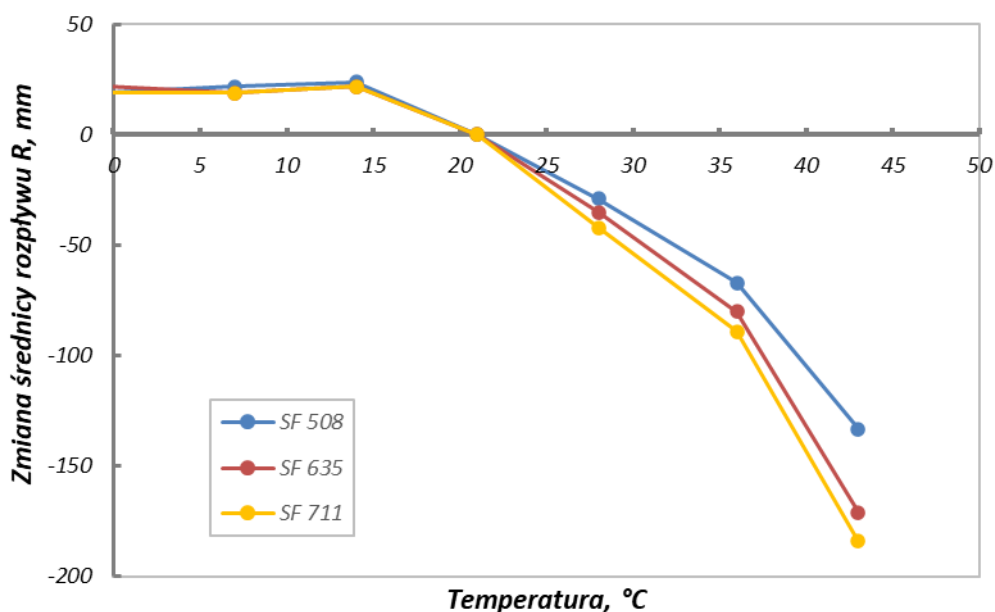
	LOI [%]	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O _{eq}	SO ₃
CEM I 42,5 R	2,3	20,1	63,5	4,0	3,6	2,8	0,57	2,8
Popiół lotny	4,2	58,2	7,9	17,4	4,8	-	0,25	0,6

Tablica 12. Skład mieszanek

Ozn. mieszanki	CEM I 42,5 R	Popiół lotny krzemionkowy	woda	Kruszywo grube 4-12,5 mm	Piasek 0-4 mm	SP ml/100kg	Domieszka zwiększająca lepkość
SF 508	391	78	156	923	850	150	0
SF 635	391	78	156	923	850	209	26
SF 711	391	78	153	923	850	254	33

Tablica 13. Właściwości mieszanek betonowych

Ozn. mieszanki	Średnica rozptywu mieszanki R [mm] o temperaturze T [°C]						
	-0,5	7	14	21	28	36	43
SF 508	543	546	548	524	495	457	391
SF 635	673	670	673	651	616	572	480
SF 711	743	743	746	724	681	635	540
Ozn. mieszanki	Zmiana średnicy rozptywu mieszanki względem mieszanki o temperaturze 21°C R [mm] o temperaturze T [°C]						
	-0,5	7	14	21	28	36	43
SF 508	19	22	24	0	-29	-67	-133
SF 635	22	19	22	0	-35	-80	-171
SF 711	19	19	22	0	-42	-89	-184
Ozn. mieszanki	względna zmiana średnicy rozptywu mieszanki względem mieszanki o temperaturze 21°C R [%] o temperaturze T [°C]						
	-0,5	7	14	21	28	36	43
SF 508	3,6	4,2	4,6	0,0	-5,5	-12,8	-25,4
SF 635	3,4	2,9	3,4	0,0	-5,4	-12,3	-26,3
SF 711	2,6	2,6	3,0	0,0	-5,8	-12,3	-25,4
Ozn. mieszanki	Czas rozptywu mieszanki T500 [s] o temperaturze T [°C]						
	-0,5	7	14	21	28	36	43
SF 508	3.00	2.90	2.95	3.19	-	-	-
SF 635	2.50	2.49	2.51	2.79	2.83	2.98	-
SF 711	1.80	1.81	1.80	1.85	2.59	2.74	2.82
Ozn. mieszanki	Visual stability index						
	-0,5	7	14	21	28	36	43
SF 508	0	0	0	0	0	0	0
SF 635	0	0	0	0	0	0	0
SF 711	0	0	0	1	1	1	1



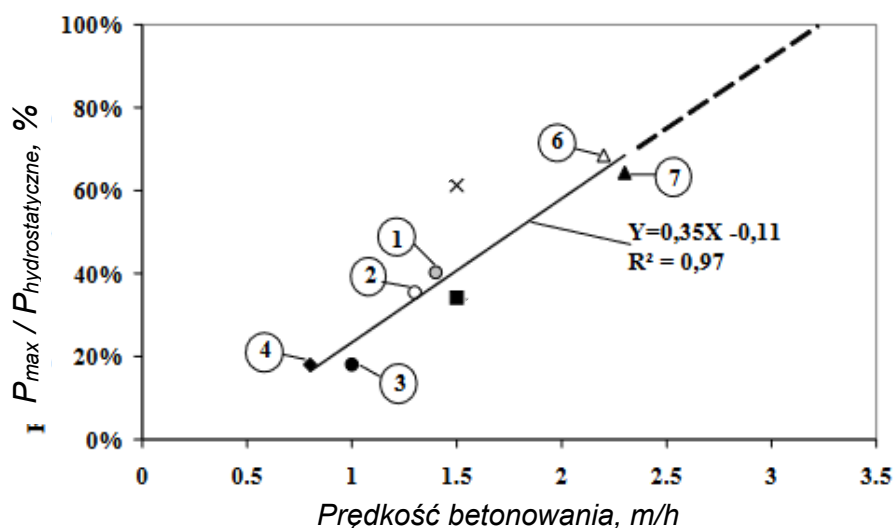
Rys. 43. Wpływ temperatury zmianę średnic rozprylu mieszanek betonów samozagęszczalnych [94]

Wpływ temperatury na urabialność autorzy determinują wskaźnikiem będącym ilorazem ilości zaadsorbowanego superplastyzatora i powierzchni właściwej zaczynu cementowego, biorą również pod uwagę wilgotność samego kruszywa, która się zmienia w zależności od warunków przechowywania oraz wodę odparowaną podczas procesów którym poddawana jest mieszanka. Ilość superplastyzatora zaadsorbowanego wyznaczono za pomocą metod spektroskopii UV/ViS. Natomiast powierzchnie właściwą zaczynu cementowego określają analitycznie i tu skrywa się zasadnicza wada. Do określenia powierzchni właściwej hydratyzującego zaczynu cementowego użyto zależności, które wyznaczone były w latach pięćdziesiątych ubiegłego wieku. W zasadzie nie o wiek tu chodzi, ale o to, że nie jest ujęty wpływ domieszki PCE na proces hydratacji, który ma miejsce. By zniwelować wpływ temperatury autorzy sugerują reدوزowanie domieszek upłynniających i zwiększających lepkość, proponując równania służące do wyznaczenia dodatkowej ilości domieszki.

2.8 WPŁYW TEMPERATURY NA PARCIE MIESZANEK BETONU SAMOZAGĘSZCZALNEGO NA ŚCIANY DESKOWANIA PIONOWEGO

Specyficzne właściwości samozagęszczalnych mieszanek betonowych, które pozwoliły zredukować praco i energochłonności w stosunku do technologii betonów wibrowanych, były też powodem trudności z szerokim wdrożeniem w praktyce. Wiązało się to z problemem projektowania deskowań oraz z tym, że musiało być szczególnie dobrze przygotowane (odpowiednia szczelność). Początkowo przyjmowano obciążenia określone z warunku pełnego parcia hydrostatycznego [96]–[99] Podobne założenie przyjęto w normie DIN 18218:2010-01, wg której mieszanka samozagęszczalna wywiera parcie na deskowanie mniejsze od hydrostatycznego przy betonowaniu z prędkością

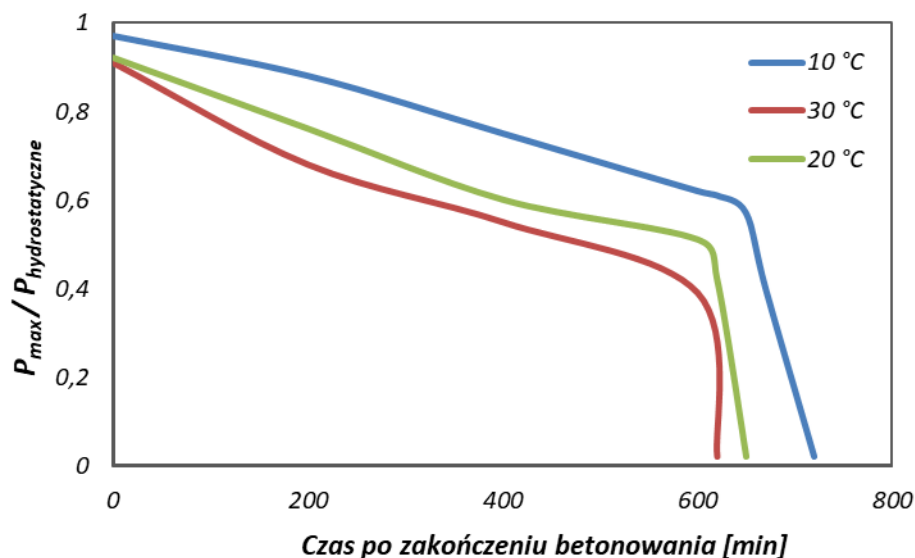
znacznie mniejszą niż 2 m/h. W pracy [100] wykazano przy tym, że przy betonowaniu ścian o wysokości 2,80 i 3,30 m w deskowaniach ramowych z prędkością $2 \div 2,5$ m/h parcie na deskowania może przyjmować wartości nawet ponad 90 kN/m^2 przy siłach w ściągach na poziomie 180 kN. Pokazuje to, że przy betonowaniu elementów pionowych, zwłaszcza wysokich, konieczne jest stosowanie wzmocnionych deskowań, a także zwiększenia liczby podpór i ściągów (w tym ostatnim przypadku konieczne jest stosowanie deskowań systemowych o mniejszych elementach). W powyżej cytowanych pracach zwrócono uwagę na zjawisko postępującej redukcji parcia, która była związana z efektami pojawiającymi się w mieszance betonowej ułożonej w deskowaniu. Warunkiem tego była odpowiednia prędkość betonowania (mniejsza niż 2 m/h), która pozwalała na to by w mieszance betonowej wytworzyła się struktura mogąca przenosić część obciążeń. Skutkiem tego parcie często było mniejsze od parcia hydrostatycznego. Według [101] redukcja jest tym większa im mniejsza jest prędkość betonowania co widoczne jest na rys.18.



Rys. 44. Zależność parcia od prędkości betonowania [101]

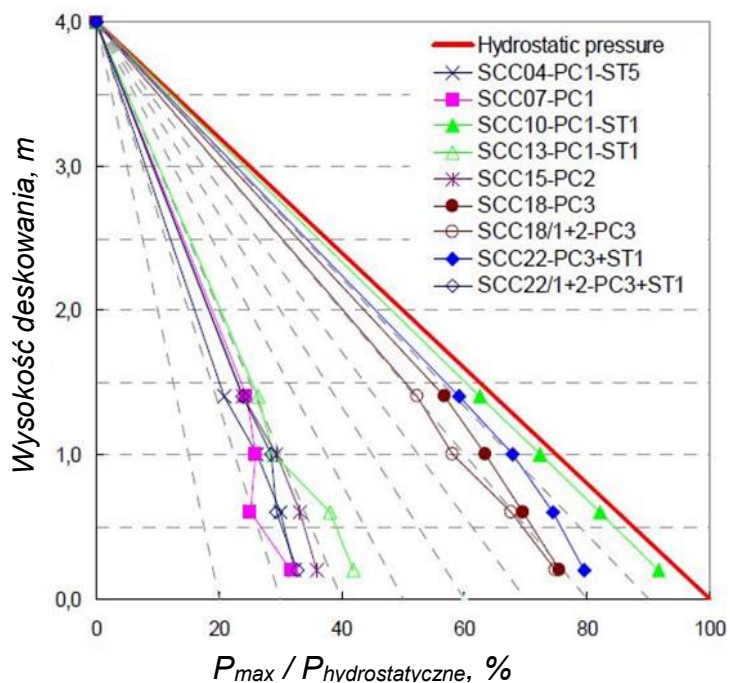
Wpływ temperatury na właściwości reologiczne mieszanek betonowych w kontekście wywieranego przez nie parcia na deskowanie był tematem badań [102]. Były to mieszanki o $w/c = 0,4$, temperatury w których prowadzono badania to 10, 20 i 30 °C. Ilość domieszki na bazie PCE był identyczna w temperaturach 10 i 20°C i nieznacznie wyższa w mieszance o temperaturze 30 °C. Zastosowano domieszkę stabilizującą na bazie celulozy i domieszką napowietrzającą w identycznych ilościach dla wszystkich temperatur. Średnica rozplywu mieszanek była najwyższa w temperaturze 20°C - 665 mm, w 10°C - 655 i najniższa w temperaturze 30°C - 645 mm. Zastosowana kombinacja domieszek superplastyfikator PCE domieszka zwiększająca lepkość (na bazie celulozy) i domieszka napowietrzająca pozwoliły zapewnić mieszance odporność na zmiany temperatury, choć nie należy zapominać o pewnym zwiększeniu ilości domieszki upłynniającej w mieszance o temperaturze 30 °C. Brak jest informacji o wpływie czasu na właściwości stanowiące o urabialności. Sądząc po wykresie na rys wzrost temperatury

przyspieszał utratę urabialności w czasie. Redukcja parcia była większa i następowała szybciej w temperaturach wyższych.



Rys. 45 Wpływ temperatury na parcie mieszanek betonu samozagęszczalnego

W [96] badano wpływ efektów związanych z utratą urabialności i „tikotropią” mieszanek betonu samozagęszczalnego. Źródłem tikotropii była przede wszystkim obecność domieszek stabilizujących.



Rys. 46 Wpływ domieszek stabilizujących na wielkość wywieranego parcia

Obserwowane różnice w wywieranym parciu są konsekwencją właściwości reologicznych mieszanek. Zarówno tych charakteryzujących je bezpośrednio po

wymieszaniu (dynamiczna granica płynięcia i lepkość plastyczna) jak i tych właściwych dla mieszanki pozostającej spoczynku (statyczna granica płynięcia i wskaźnik tiksotropii). Zasadniczą konkluzją jest stwierdzenie, że właściwości reologiczne charakteryzują mieszankę betonową i pozwalają szacować parcie i jego redukcję. Biorąc pod uwagę, że temperatura wpływa na właściwości reologiczne mieszanek możemy się spodziewać wpływu temperatury na wielkość i redukcję wywieranego parcia. Niejednoznaczne wyniki wpływu temperatury na parcie mieszanek betonu samozagęszczalnego prezentowane w [102],[103] jak i sama liczba prac utwierdzają w przekonaniu o istotności problemu.

2.9 ROLA DODATKÓW MINERALNYCH W KSZTAŁTOWANIU WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK BETONOWYCH

Ustawiczne dążenie do redukcji śladu węglowego towarzyszącego produkcji cementu oraz konieczność zagospodarowania odpadów przemysłowych, sprawiły, że dodatki mineralne na stałe zagościły w technologii betonu. Dodatki oprócz korzyści ekologicznych, są w stanie znacząco polepszyć zarówno właściwości mieszanek jak i stwardniałego betonu. Dotychczas szeroko stosowanymi w technologii produkcji cementu i betonu były popioły lotne krzemionkowe, granulowane mielone żużle wielkopieczowe czy pyły krzemionkowe.

Efekty działania popiołów lotnych krzemionkowych są dobrze rozpoznane w literaturze [104]. Jeśli popiół będzie dobrej jakości, czyli będzie miał dobrą miałość i niską stratę prażenia zastąpienie nim części cementu będzie zmniejszało wodożądność spoiwa, poprawiając tym samym urabialność mieszanek [105]. Zastąpienie masowe części cementu popiołem z uwagi na różnice w gęstości prowadzi zawsze do większej ilości spoiwa. To już samo przez się może być źródłem poprawy urabialności. Jeśli dojdzie do tego dobre uziarnienie popiołu, korzyści z jego stosowania będą jeszcze wyraźniejsze. Jakość popiołu zależna jest od procesu spalania węgla, jest on pomimo chęci całkowitego odejścia od tego źródła energii w dalszym ciągu modyfikowany. Sprawia to, że wpływ popiołu lotnego krzemionkowego co do trendu rozpoznany, może być jednak różny co do siły oddziaływania. Popiół o dobrym uziarnieniu zapewnia wyższy poziom właściwości mechanicznych, mniejszą porowatość i wyższy stopień hydratacji [106]. Z drugiej strony badania przedstawione w [107] sugerują, że w przypadku odporności na korozję siarczanową, mrozoodporność z udziałem soli odladzających czy odporności na ścieranie nie ma znaczącego wpływu składu chemicznego i właściwości fizycznych popiołu na poziom tych cech. Należy przy tym zaznaczyć, że poziom tych cech jest zawsze lepszy w przypadku stosowania popiołu.

Wprowadzenie popiołów i domieszek chemicznych może powodować różną skuteczność działania tych drugich. Efektywność działania domieszek zależy od ich składu, składu popiołu jego właściwości fizycznych, składu cementu - zwłaszcza zawartości C_3A i Na_2O_e [108]. W [109] wykazano, że na skuteczność działanie domieszek upłynniających duży wpływ ma zawartość niespalonego węgla, wyrażona stratą prażenia. Niespalony

węgiel powoduje wzrost granicy płynięcia i lepkości plastycznej mieszanki. Powodem tego jest zwiększona absorpcja superplastyfikatora i neutralizacja jego działania.

Mielony granulowany żużel wielkopiecowy powstający jako odpad podczas wytopu stali, jest materiałem wiążącym i twardniejącym pod wodą. Aby wiązanie nastąpiło zdolności hydrauliczne żużla muszą być aktywowane np. wodorotlenkiem wapnia, który powstaje podczas hydratacji cementu. Granulowanie żużla, czyli szybkie schładzanie wodą sprawia, że żużel składa się ze znacznej ilości fazy szklistej (ponad 80 %). Dzięki temu cząstki mielonego żużla są gładkie i absorbują mało wody. Sprawia to, że dodanie żużla do mieszanki betonowej korzystnie wpływa na urabialność mieszanki betonowej. Efekt zmniejszenia granicy płynności jest tym większy im większa ilość żużla. W przypadku zastosowania superplastyfikatorów efektywność ich działania w obecności żużla zależy od ich rodzaju, zawartości żużla, zawartości glinianu triwapnia i alkaliów w cemencie [108]. Żużel jest bardzo cennym dodatkiem, zwłaszcza podczas betonowania konstrukcji masywnych, czy betonowania w okresach letnich – obniża znacząco ciepło hydratacji spoiwa.

Pył krzemionkowy jest dodatkiem stosowanym w zasadzie wyłącznie w technologii betonów wysokowartościowych. Jego mechanizm korzystnego działania w aspekcie wytrzymałości opiera się na doszczelnieniu struktury zaczynu cementowego - jego ziarna są mniejsze od ziaren cementu i na reakcji pucolanowej. W [86] wykazano, że na efekty działania domieszek upłynniających w obecności pyłu krzemionkowego ma wpływ rodzaj domieszki upłynniające. Gdy będą stosowane domieszki starszej generacji sulfoniany nafatenu rośnie granica płynięcia wraz ze wzrostem zawartości pyłu. Gdy jako upłynniacz będzie stosowany superplastyfikator PCE to po dodaniu 5 % CSF zmniejszeniu ulegnie granica płynięcia i lepkość plastyczna i wraz z dalszym z zwiększaniem ilości CSF do 15 % granica płynięcia będzie się utrzymywała na stałym poziomie a lepkość plastyczna nadal zmniejszała. Podobny efekt jest sygnalizowany w [110] wykazano że efektywność superplastyfikatora PCE, jest większa w obecności pyłu krzemionkowego - zmniejszeniu ulega granica płynięcia i lepkość plastyczna.

Popioły lotne wapienne powstałe w wyniku spalania węgla brunatnego po odpowiednim przygotowaniu mogą być również korzystnym dodatkiem, z reguły wymagają większej ilości domieszek chemicznych w celu osiągnięcia zamierzonych cech mieszanki i betonu stwardniałego. Jednak nie powoduje to nadzwyczajnych trudności w ich stosowaniu. Świadczą o tym wyniki badań uzyskane podczas realizacji projektu badawczego pt. „Innowacyjne spoiwa cementowe i betony z wykorzystaniem popiołu lotnego wapiennego”, realizowanego w Politechnice Śląskiej w latach 2009-2013 przy współudziale Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN oraz Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Popiół lotny wapienny nie był obiektem intensywnych badań w kontekście wpływu temperatury na mieszanki BSZ z jego dodatkiem, choć z literatury wynika, że PLW może być z powodzeniem stosowany do BSZ. Stosowanie tych dodatków jest obecnie przedmiotem intensywnych badań. Wyniki tych badań są obiecujące i pozwalają na uzyskanie trwałych betonów. Rozpoznanie ich

wpływu na urabialność mieszanki betonowej jest jednym z najważniejszych kwestii, warunkujących możliwość ich praktycznego stosowania.

Mielony kamień wapienny jest dodatkiem o inertym charakterze, zmniejszającym znacząco ciepło hydratacji spoiw, dlatego może zastąpić żużel wielkopiecowy w produkcji cementów o niskim cieple hydratacji. Stosowanie mielonego kamienia wapiennego wspólnie z innymi dodatkami (popiołami krzemionkowymi, wapiennymi czy żużłami wielkopiecowymi) wywołuje efekt synergii pomiędzy tymi dodatkami. Sprawia on że właściwości cementów z takimi grupami dodatków nie odbiegają znacząco od spoiw, w których nie był stosowany kamień wapienny [111]. Pod względem cech determinujących trwałość betonów również jak wykazano w betony nazywane niskoemisyjnymi nie muszą znacząco odbiegać od betonów w których zastosowano spoiwa uważane za „tradycyjne”. Stosowanie mielonego kamienia wapiennego wymaga większej uwagi przy doborze składu, ale jest możliwe uzyskanie trwałych betonów co wykazano w [112].

W [113] badano możliwość stosowania mączek wapiennych jako wypełniacza w betonach ultrawysokowartościowych, zastąpienie części pyłu krzemionkowego mielonym wapieniem nie wpływa istotnie na właściwości mechaniczne.

Przewidywanie efektów wzajemnego działania domieszek upłynniających i dodatków mineralnych w aspekcie kształtowania urabialności jest trudne. Istnieje zgoda co do ogólnego trendu zmian, różnice w właściwościach dodatków i domieszek sprawiają, że te trendy mogą ulegać pewnym fluktuacjom. Wynika to ze złożonego oddziaływania na proces hydratacji cementu, który jest ciągle dyskutowany [114] i badany z wykorzystaniem nowych technik badawczych. Wpływ temperatury na proces hydratacji cementów zawierających nieklinkierowe materiały wiążące nie jest jeszcze dobrze zrozumiany i również jest przedmiotem badań [115]. W ujęciu wpływu na urabialność ważna jest wielkość potencjału zeta jaki się generuje na powierzchni dodatków w środowisku zaczynu cementowego. Determinuje ona adsorpcję domieszek. By ją poznać konieczne jest przeprowadzenie skomplikowanego procesu badawczego. Aby móc prognozować wpływ dodatków na urabialność dobrze znać ich cechy fizykochemiczne, to również wymaga mniej lub bardziej zaawansowanych metod. Biorąc jeszcze pod uwagę zmiany we właściwościach charakterystyczne dla różnych partii dodatków najrozsądniejszym wydaje się badanie wpływu dodatków na mieszankach betonowych lub na zaprawach.

Transformacja energetyczna, coraz większy udział w produkcji energii źródeł odnawialnych, zmiany na rynku stali sprawiają, że dostępność popiołów lotnych krzemionkowych, granulowanych żużli wielkopiecowych, jeżeli się nie zmniejsza to jest utrudniona. Spowodowane jest to wzrostem kosztów związanych z ewentualnym transportem z miejsc, w których są dostępne w nadmiarze. Dlatego zwraca się uwagę na popioły lotne wapienne i mączki powstałe w wyniku mielenia kamienia wapiennego. W tym zakresie brakuje jednak badań dotyczących wpływu temperatury na właściwości reologiczne mieszanek BSZ z dodatkami wymienionymi wyżej.

2.10 *PODSUMOWANIE STUDIUM LITERATUROWEGO*

Wpływ temperatury na urabialność mieszanki (właściwości reologiczne) był i jest istotnym problemem technologicznym, wymagającym uwzględnienia przy projektowaniu składu betonu i technologii wykonania robót monolitycznych. Problem ten jest szczególnie istotny obecnie, gdyż aby sprostać rosnącym wymaganiom względem właściwości betonu skład jego mieszanki jest coraz bardziej skomplikowany - stosowanie superplastyfikatorów i dodatków stało się działaniem rutynowym. W celu sprostania wymaganiom zrównoważonego rozwoju wprowadzane są nowe materiały, zwłaszcza dotyczy to dodatków mineralnych co daje możliwość zmniejszenia zużycia cementu lub kruszywa pochodzenia naturalnego. Innym ważnym kierunkiem rozwoju technologii betonu jest stosowanie mieszanek samozagęszczalnych. W tym przypadku kształtowanie urabialności jest kluczowym problemem technologicznym, a kontrola wpływu temperatury na właściwości reologiczne stanowi zasadnicze zagadnienie. Ma krytyczne znaczenie dla samego procesu samozagęszczania, ma również znaczenie w aspekcie wywieranego parcia na deskowanie.

Wpływ temperatury, w przeciwieństwie do mieszanek zagęszczanych wibracyjnie, jest kluczowy w przypadku mieszanek betonu samozagęszczalnego. Zmiany urabialności betonów zagęszczanych mechanicznie możemy korygować zmieniając parametry procesu zagęszczania (stosując np. dłuższy czas wibrowania). W przypadku mieszanek BSZ korekta zmian urabialności wywołanych zmianą temperatury jest praktycznie niemożliwa. Redozowanie domieszki upłynniającej wymaga dużego doświadczenia i jest bardzo trudne w warunkach budowy. Bardzo łatwo doprowadzić mieszankę do segregacji. Należy przy tym zaznaczyć, że nadmiar domieszki upłynniającej zazwyczaj znacznie opóźnia proces wiązania spoiwa. Zagęszczanie wibracyjne mieszanki BSZ, która z jakiegoś powodu utraciła zdolność do samozagęszczania może doprowadzić do nadmiernego wzrostu obciążeń deskowania, dlatego jest niewskazane. Brakuje badań ukierunkowanych na poszukiwanie składników i składów mieszanek BSZ możliwie odpornych na zmienne temperatury. Szczególna wrażliwość parametrów reologicznych mieszanek betonu samozagęszczalnego na temperaturę jest jednym z ważniejszych powodów dla którego nie mają w globalnej produkcji betonu towarowego dużego udziału.

Drugim powodem tego, że mieszanki BSZ nie zajmują sobie należnego miejsca jest zagadnienie parcia mieszanek na deskowanie. Kwestia wpływu parcia mieszanek BSZ była przedmiotem badań, istnieje ok. 10 metod szacowania parcia. Każda z metod jest związana z właściwościami reologicznymi mieszanek, które determinują parcie jak i jego zmianę w czasie. Zagadnienie wpływu temperatury na właściwości reologiczne mieszanki BSZ w kontekście parcia na deskowania nie było przedmiotem głębszych analiz.

Większe ilości domieszek, właściwe dla mieszanek betonów samozagęszczalnych, czy mieszanek o bardzo dobrej urabialności, sprawiają, że mechanizm wpływu temperatury na urabialność jest bardziej skomplikowany. Wpływ temperatury na reakcję hydratacji

odgrywa tu istotną rolę, ponieważ kształtuje układ pól adsorpcji dla domieszek upłynniających. Domieszki by prawidłowo działać muszą być zaadsorbowane, wtedy to wprowadzając efekt np. zawady sterycznej skutecznie dyspergują ziarna cementu. Sam proces adsorpcji domieszki jest również zależny od temperatury. To jest powodem tego, że mieszanka betonu samozagęszczalnego może wykazywać szereg nieintuicyjnych zachowań, np. poprawa urabialności w wyższej temperaturze bądź istotne pogorszenie w niższej. Jest to odmienne zachowanie, niż to obserwowane w przypadku mieszanek zagęszczanych wibracyjnie, w których składzie ilość domieszek jest ograniczona. Wtedy wpływ temperatury kształtowany jest przez jej wpływ na reakcję hydratacji, która przyspiesza wraz ze wzrostem temperatury. To powoduje, że takie mieszanki z reguły tracą na urabialności wraz ze wzrostem temperatury. Na intensywność tego efektu możemy wpływać odpowiedni dobierając składniki mieszanek

Wpływ temperatury na kształtowanie urabialności mieszanek BSZ był przedmiotem wielu badań, nie były to jednak badania systematyczne. Na ich podstawie nie można wyciągać ogólnych wniosków dotyczących zmian urabialności. Wpływ temperatury na urabialność takich betonów nie był rozpatrywany w kontekście popiołów lotnych wapiennych i mieszanin tych popiołów z innymi dodatkami. Dodatki mineralne są istotnym składnikiem mieszanek BSZ, stosowane ze względu na konieczność ograniczenia ilości cementu i poprawy właściwości betonu. W betonach BSZ mogą być stosowane domieszki typu I jak i II. Ponadto obecnie ze względu na ograniczenia w dostępności dodatków poszukuje się nowych rozwiązań w tym zakresie, kładąc szczególny nacisk na kamień wapienny i popioły lotne wapienne, czyli dodatki tanie i szeroko dostępne.

Przeprowadzony przegląd literatury wskazuje, że charakter, jak i wielkość zmian parametrów reologicznych zapraw pod wpływem temperatury zależy od rodzaju cementu, rodzaju i ilości domieszek, rodzaju dodatku mineralnego wymykając się przy tym jednoznacznym uogólnieniom. By móc wybrać rozwiązanie materiałowe adekwatne do warunków stosowania, konieczna jest dobra znajomość właściwości fizycznych i chemicznych składników. Zdobyć tej wiedzy wiąże się ze stosowaniem zaawansowanych metod badawczych. Zmienność jakościowa cementów, dodatków a ostatnio nawet domieszek chemicznych nie daje gwarancji sukcesu w procesie wyboru składników. Dlatego najbardziej zasadne jest badanie efektów stosowania rozwiązań materiałowych na mieszankach betonowych lub co bardziej zachęcające na zaprawach. Zaprawy, jeśli będą odpowiednio zaprojektowane mogą oddawać zachowanie mieszanek betonowych, zarówno jakościowo i nawet ilościowo. Zostało to potwierdzone w szeregu prac badawczych. Dotychczasowe badania zapraw modelowych w ograniczonym stopniu dotyczyły wpływu temperatury i koncentrowały się na dynamicznych parametrach reologicznych mieszanek. Ze względu na stosowanie mieszanek bardzo upłynnionych i samozagęszczalnych brakuje istotnych ze względu na parcie na deskowanie badań wpływu temperatury na parametry reologiczne mieszanek w spoczynku. Tutaj się pojawia pytanie: czy zaprawa modelowa dobrze oddająca właściwości mieszanki

betonowej w aspekcie dynamicznych parametrów reologicznych, również będzie dobrze przybliżać właściwości mieszanki w aspekcie statycznych parametrów reologicznych?

Brak jednoznaczności wpływu temperatury wymaga indywidualnego podejścia do przyjmowanych składników. Konieczna jest weryfikacja wpływu na konkretnej mieszance w konkretnych warunkach. Taki tok postępowania nie powinien być niczym szczególnym. Mieszanka betonowa powinna być „skrojona na miarę” zwłaszcza przy realizacji budów związanych ze znaczącymi nakładami.

3. CEL I ZAKRES PRACY

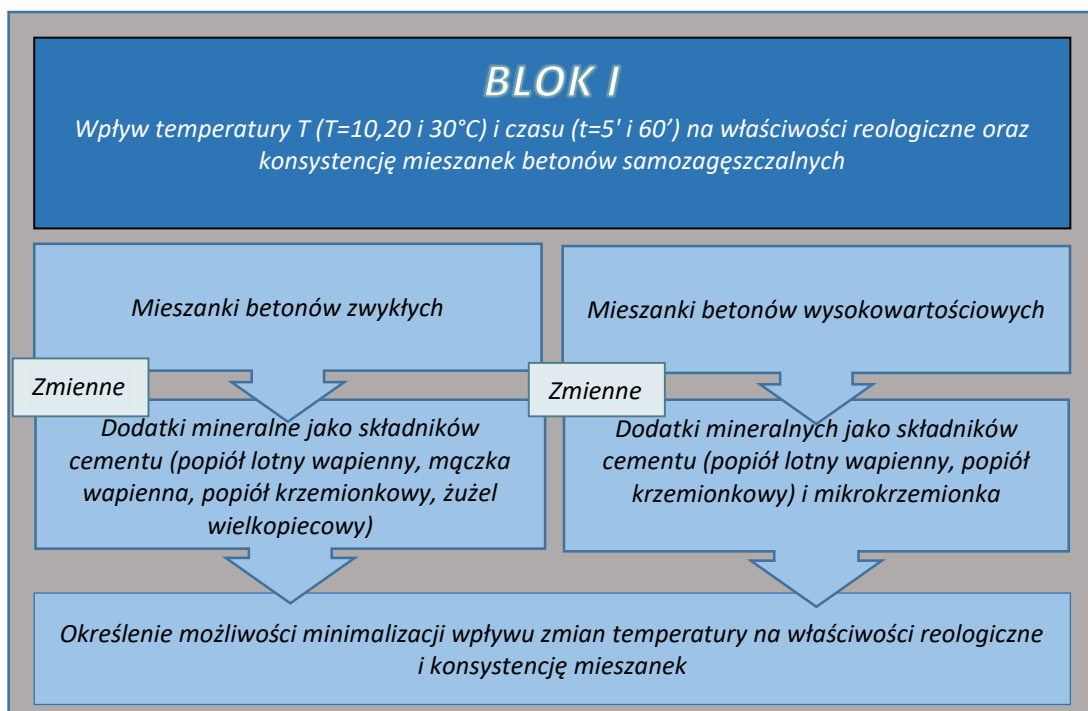
Biorąc pod uwagę przedstawioną w rozdziale 2 analizę stanu wiedzy w zakresie wpływu niskiej i wysokiej temperatury na właściwości reologiczne mieszanek BSZ i płynące z niej wnioski dotyczące konieczności i najważniejszych kierunków badań, sprecyzowano następujące cele pracy:

- Określenie wpływu temperatury mieszanki betonowej na zmiany w czasie właściwości reologicznych mieszanek BSZ i zagęszczanych wibracyjnie z cementów zawierających w swoim składzie popiół lotny wapienny wraz z innymi dodatkami mineralnymi.
- Określenie i ocena możliwości minimalizacji wpływu temperatury i czasu na stabilność urabialności BSZ zwykłych i wysokowartościowych poprzez wybrane modyfikację ich składu.
- Opracowanie wytycznych do projektowania mieszanki BSZ o stabilnych właściwościach reologicznych w zmiennych temperaturach.
- Określenie wpływu temperatury i czasu na zmiany właściwości reologicznych mieszanek BSZ w stanie spoczynku i parcie boczne mieszanek BSZ na deskowania pionowe.
- Weryfikacja możliwości wykorzystania badań zapraw modelowych do określenia wpływu temperatury na właściwości reologiczne mieszanek BSZ w stanie spoczynku i płynięcia.
- Określenie wpływu temperatury mieszanki BSZ na rozwój wytrzymałości na ściskanie stwardniałego betonu.

Pozyskanie wiedzy w powyższym zakresie jest istotne z względów poznawczych, ale przede wszystkim ze względów praktycznych. Możliwość kontroli wpływu temperatury na właściwości mieszanki BSZ umożliwi szersze stosowanie tej technologii.

Badania podzielono na bloki, podział ten był konsekwencją m.in tego, że badania stanowiły etapy programów badawczych realizowanych w Katedrze Inżynierii Materiałów i Procesów Budowlanych Wydziału Budownictwa Politechniki Śląskiej. Były to oprócz badań statutowych i kierunkowych dwa projekty badawcze. Pierwszy pt. „Innowacyjne spoiwa cementowe i betony z wykorzystaniem popiołu lotnego wapiennego” realizowany był w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka ze współfinansowaniem ze środków Unii Europejskiej. Politechnika Śląska była liderem konsorcjum tworzonego oprócz niej przez Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych oraz Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk. Drugim był projekt badawczy finansowany ze środków Komitetu Badań Naukowych pt. „Wpływ czasu oraz czynników technologicznych na właściwości reologiczne samozagęszczalnej mieszanki betonowej w aspekcie jej parcia na deskowania, finansowany ze środków Komitetu Badań Naukowych.

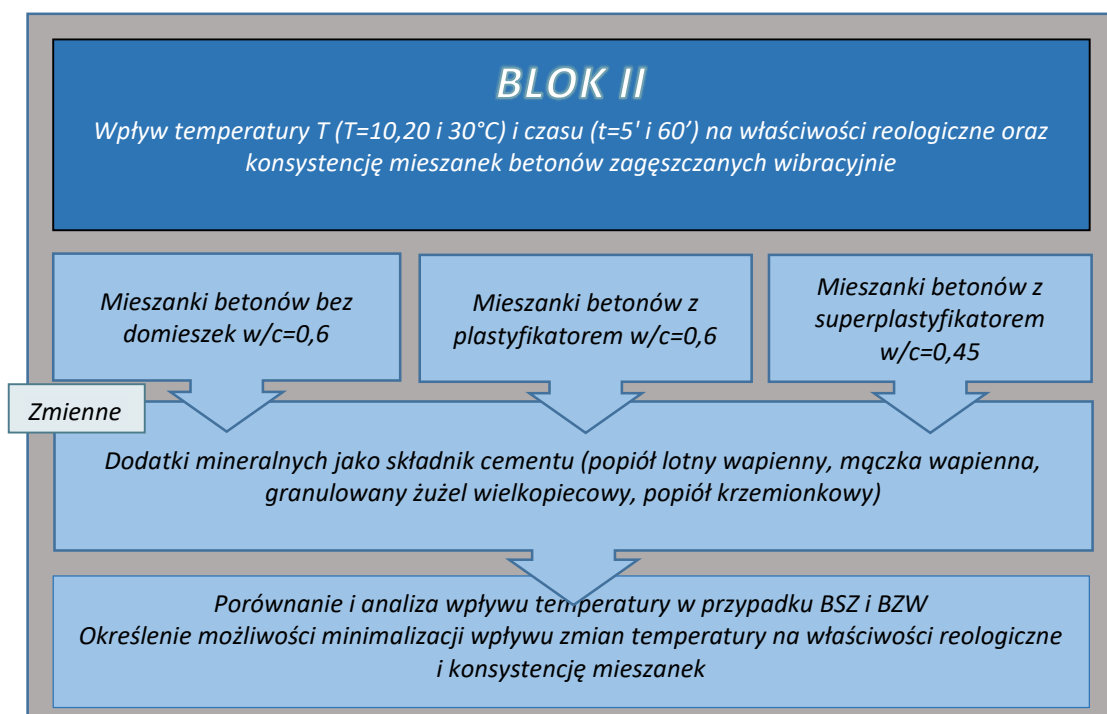
Blok I obejmuje analizę wpływu temperatury na właściwości reologiczne betonów samozagęszczalnych zwykłych i wysokowartościowych zawierających w swoim składzie popioły wapienne, mielony kamień wapienny oraz inne dodatki mineralne. Dodatki wyselekcjonowano ze względu na ich perspektywy stosowania w świetle ograniczonej dostępności powszechnie stosowanych dodatków. Określono również wpływ temperatury mieszanki na wytrzymałość na ściskanie betonów. W bloku tym weryfikowano możliwość minimalizacji wpływu temperatury i czasu na stabilność właściwości reologicznych mieszanek BSZ poprzez dobór różnych kombinacji i ilości dodatków mineralnych.



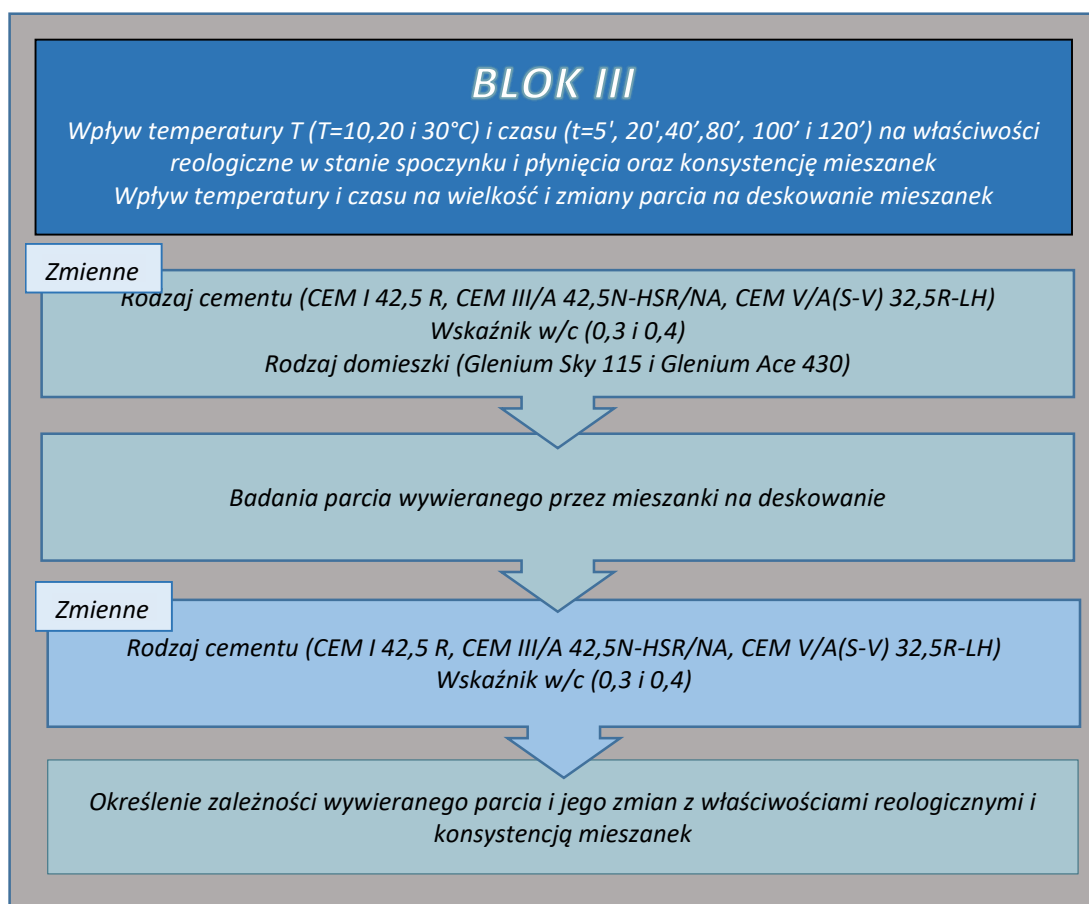
Rys. 47. Schemat planu badań bloku I

Blok II obejmuje badania betonów zagęszczanych wibracyjnie, w których stosowano dodatki mineralne jak bloku I. Zasadniczym celem badań bloku II było porównanie wpływu temperatury w przypadku BSZ i BZW. Dodatkowo zaproponowano i zweryfikowano metody uzyskania mieszanek BSZ o właściwościach reologicznych stabilnych w zmiennych temperaturach poprzez ich modyfikację materiałowe obejmujące rodzaj domieszki chemicznej, rodzaj i ilość dodatków mineralnych w cemencie.

Blok III obejmuje badania mieszanek BSZ, zmiennymi były rodzaj cementu (trzy rodzaje), wskaźnik w/c (dwa poziomy) i domieszka upłynniająca (2 rodzaje). Zasadniczym celem tego bloku III jest określenie wpływu temperatury na wielkość wywieranego parcia przez mieszanki na deskowania pionowe. Określenie zależności parcia i jego zmian z parametrami reologicznymi.

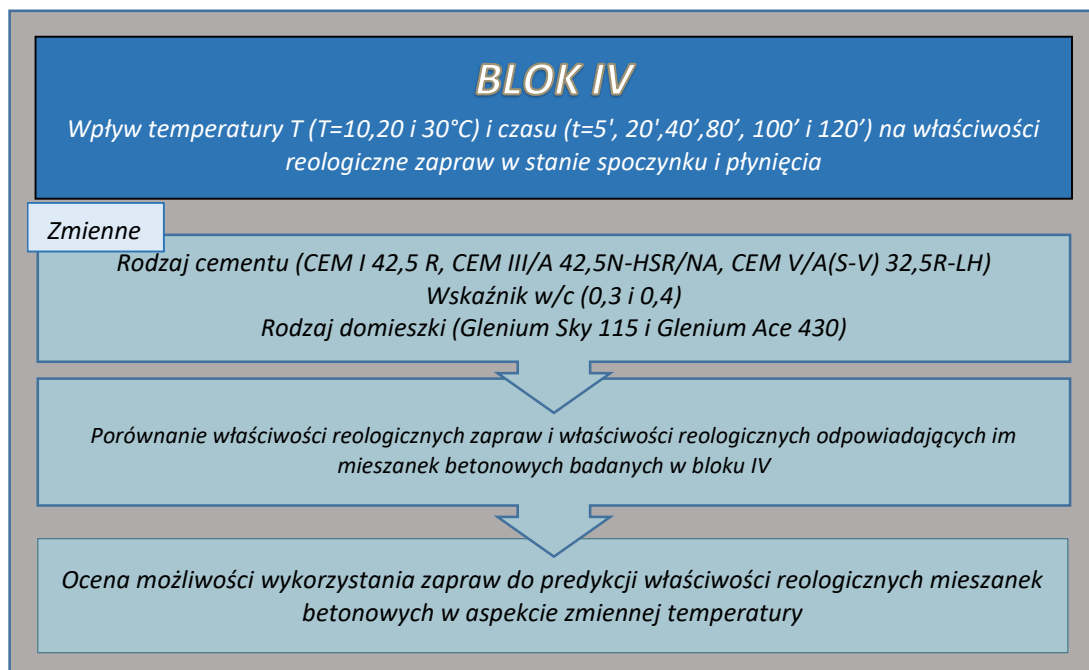


Rys. 48. Schemat planu badań bloku II



Rys. 49. Schemat planu badań bloku III

Blok IV dotyczy badań zapraw modelowych, których skład był wynikiem korekty składu zapraw z mieszanek betonowych. Dla zapraw określono wpływ temperatury na właściwości reologiczne zarówno w stanie płynięcia i spoczynku. Właściwości zapraw zostały porównane z właściwościami odpowiadających im mieszanek betonowych.



Rys. 50. schemat planu badań bloku IV

W badaniach przyjęto przedział zmienności temperatury mieszanki od 10 do 30°C. Wynika on z zasad technologii robót betonowych, zalecających utrzymanie temperatury mieszanki w trakcie betonowania w takim właśnie przedziale [116],[117],[118].

Składy mieszanek BSZ przyjęto kierując się wymogiem, aby były z jednej strony możliwie typowe z drugiej pozwalały na wyraźne określenie wpływu temperatury i innych zmiennych czynników, kierowano się tutaj zaleceniami [119],[120]. Właściwości reologiczne BSZ kontrolowano poprzez wskaźnik w/c, rodzaj cementu oraz ilość i rodzaj superplastyfikatora. Ze względu na możliwości pomiarowe stosowanych reometrów stosowano kruszywo do 8 mm. Aby dodatkowo ograniczyć segregację przyjęto stosunkowo wysoki punkt piaskowy 55%. Rozpoznanie zagadnienia wpływu DZL może być tematem dalszych prac prowadzonych z użyciem zapraw modelowych. W mieszankach BSZ stosowane były domieszki nowej generacji o budowie grzebieniowej. Zrezygnowano z badania mieszanek z domieszkami poprzednich generacji, których efektywność działania jest bardziej zależna od temperatury (por. p 2.7.1 i 2.7.2). Oprócz superplastyfikatora zrezygnowano ze stosowania do BSZ innych domieszek, w tym domieszek zwiększających lepkość, napowietrzających i zmieniających czas wiązania. Powodem tego była ograniczenia liczby zmiennych czynników wpływających na właściwości reologiczne BSZ w trudny do kontroli zakresie. Domieszki te nie tylko wpływają na właściwości reologiczne w sposób bezpośredni, ale również pośrednio poprzez m. in. wpływ na efektywność superplastyfikatora. W przypadku zmiennych

temperatur wpływ będzie jeszcze bardziej skomplikowany i trudny interpretacji. Uwzględnienie jednoczesnego wpływu kilku domieszek na właściwości reologiczne BSZ w aspekcie zmiennych temperatur wymaga odrębnych badań.

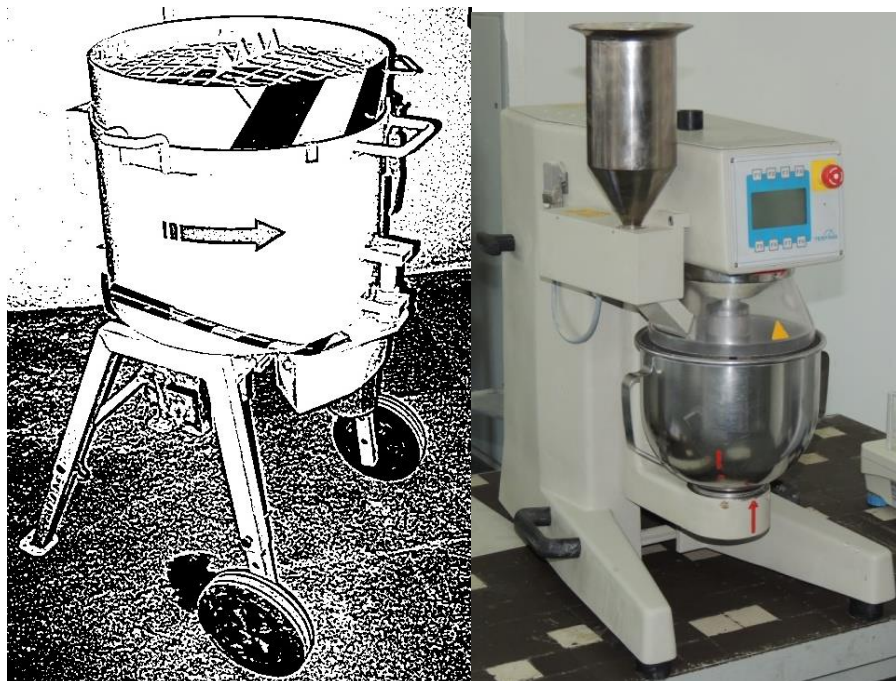
Dodatki mineralne wyselekcjonowano ze względu na ich perspektywy stosowania w świetle ograniczonej dostępności powszechnie stosowanych obecnie dodatków. Obecnie powszechnie stosowane są popioły lotne krzemionkowe i mielone granulowane żużle wielkopiecowe. Dodatki te doskonale sprawdzają się w technologii betonu, ale ze względu na dążenie do ograniczenia emisji CO₂ ich dostępność będzie coraz mniejsza. Konieczne jest ich zastąpienie innymi dodatkami. Za najbardziej obiecujące na krajowym rynku uważa się mielone wapienie i popioły lotne wapienne. Wyróżnia je przede wszystkim duża dostępność i niski koszt pozyskania. W rozdziale 1 wykazano, że mączka wapienna i popiół lotny wapienny mogą być z powodzeniem stosowane jako składnik cementów lub dodatek do betonu.

4. BADANIA WŁASNE

4.1 METODYKA BADAŃ

4.1.1 PROCEDURA PRZYGOTOWANIA SKŁADNIKÓW I MIESZANIA

Procedura przygotowania składników mieszanek i mieszania, była dla wszystkich bloków badań taka sama. Założenie by uzyskać mieszanki po 5 minutowym mieszaniu o temperaturze 10, 20 lub 30°C wymagało odpowiedniego przygotowania składników. Składniki mieszanki na etapie badań w temperaturze 20°C były przechowywane w warunkach laboratoryjnych (temperatura powietrza równa ok. 20°C). Zapewniało to wyjściową temperaturę mieszanki na poziomie 20°C. By uzyskać mieszanki o temperaturze 10°C konieczne było 24 h schładzanie składników mieszanki w temperaturze 5÷7 °C. Uzyskanie temperatury mieszanki równej 30 °C wymagało 24 godzinowego ogrzewania składników w temperaturze 35 °C.



Rys. 51 Mieszarka do betonu UEZ ZM 50 (po lewej) i mieszarka do zapraw (po prawej)

Do przygotowania mieszanek betonowych używano mieszarki UEZ ZM 50 o pojemności bębna 90 dm³. Pojemność użyteczna mieszarki w zależności od konsystencji mieszanki może sięgać 60 dm³. Mieszarka posiada 4 ramienne mieszadło napędzane silnikiem o mocy 2,2 kW, który zapewnia prędkość obrotową mieszadła równą 48 obrotom na minutę. Czas mieszania składników wynosił 5 minut, wodę z ewentualnymi domieszkami

dodawano po 30 sekundach mieszania suchych składników. Kruszywo było wysuszone do stałej masy. Po badaniu konsystencji i właściwości reologicznych, bezpośrednio po wymieszaniu mieszanka betonowa umieszczana była w wiadrach, które przechowywano w suszarce (temperatura 30 °C), w komorze klimatycznej (temperatura 10°C) lub w pomieszczeniu laboratoryjnym (temperatura 20°C). Dalsze badania mieszanek odbywały się według założeń funkcjonujących w blokach badań. Podczas badań wpływu temperatur 10 lub 30 °C, schładzano bądź dogrzewano pomieszczenie, w którym prowadzono badania. Oczywiście w granicach możliwości urządzeń klimatyzacyjnych lub grzewczych. Procedura przygotowania zapraw badanych w bloku IV była podobna z tym, że zaroby o pojemności 2 dm³ mieszane były w standardowej mieszarce do zapraw.

4.1.2 METODYKA BADAŃ KONSYSTENCJI MIESZANEK

Mieszanki betonów samozagęszczalnych badanych w blokach I i III badano metodą testu rozplýwu przeprowadzonego zgodnie PN-EN 12350-8, badanie polega na pomiarze maksymalnej średnicy rozplýwu mieszanki betonowej wypływającej z unoszonego pionowo stożka Abramsa. Dodatkowym parametrem możliwym do uzyskania z pomocą tej metody jest czas rozplýwu mieszanki do średnicy 500 mm.



Rys. 52. Stanowisko do badania rozplýwu mieszanek wg PN-EN 12350-8, rozplýw mieszanki BSZ po lewej

Tablica 14. Klasy rozplýwu i lepkości mieszanek betonu samozagęszczalnego wg. PN-EN 12350-8

<i>Klasa rozplýwu SF wg. PN-EN 12350-8</i>	<i>Średnica rozplýwu [mm]</i>
SF1	550-650
SF2	660-750
SF3	760-850
<i>Klasa lepkości VS wg. PN-EN 12350-8</i>	<i>Czas rozplýwu T₅₀₀ [s]</i>
VS1	<2
VS2	≥2

Konsystencję mieszanek zagęszczanych wibracyjnie badano metodą stolika rozplýwowego według PN-EN 12350-5. Zasadą metody jest pomiar średnicy rozplýwu mieszanki betonowej poddanej 15 ruchom wahliwej płyty stolika.



Rys. 53. Zestaw do badania konsystencji mieszanek betonowych według PN-EN 12350-5, widoczny stolik z uchylną płytą o wymiarach 70x70cm, drewniany ubijak o przekroju 40x40mm i metalowy stożek ścięty o wysokości 20 cm.

Mieszanka jest zagęszczana w dwóch warstwach w formie ściętego stożka. Zagęszczenie odbywa się poprzez 20-krotne uderzenia drewnianego ubijaka o przekroju 40x40 mm. Metoda ta nie stosuje się do betonów samozagęszczalnych, komórkowych, jamistych ani betonów z kruszywem o maksymalnym wymiarze ziaren przekraczającym 63 mm. Metoda badania rozptywu jest czuła na zmiany konsystencji mieszanki betonowej, które odpowiadają wartościom rozptywu w granicach od 340 mm do 600 mm. Poza tym przedziałem, badanie metodą stolika rozptywowego może okazać się niemiernodajne i wówczas zaleca się wziąć pod uwagę inne metody oznaczania konsystencji. Klasy i odpowiadające im średnice rozptywu zestawione są w tabelicy 14.

Tablica 15. Klasy konsystencji według metody stolika rozptywowego

<i>Klasa konsystencji wg. PN-EN 12350-5</i>	<i>Średnica rozptywu [mm]</i>
<i>F1</i>	<i><340</i>
<i>F2</i>	<i>350-410</i>
<i>F3</i>	<i>420-480</i>
<i>F4</i>	<i>490-550</i>
<i>F5</i>	<i>560-620</i>
<i>F6</i>	<i>>630</i>

4.1.3 METODYKA BADAŃ WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNYCH

Właściwości reologiczne mieszanek betonów samozagęszczalnych badanych w blokach I, II i III określono z użyciem reometru XL w bloku IV użyto reometru NT. Są to reometry rotacyjne, mierzące moment obrotowy wywierany na zanurzoną w mieszance betonowej (XL) lub zaprawie (NT) sondę. Mieszanka betonowa lub zaprawa jest umieszczona w metalowym cylindrycznym pojemniku, obracającym się względem nieruchomej sondy. System komputerowy, pozwala programować dowolny schemat ścinania mieszanki co pozwala wyznaczyć właściwości reologiczne mieszanek zarówno w stanie płynięcia jak i w stanie spoczynku.



Rys. 54. Reometry XL i NT używane w badaniach właściwości reologicznych mieszanek betonowych (Blok 1-III) i mieszanek zapraw (Blok IV)

W blokach badań I i II stosowano procedurę ścinania mieszanki przedstawioną na rys.55 pozwalającą wyznaczyć dynamiczne parametry reologiczne – g – związany z granicą płynięcia τ_0 i h związany z lepkością plastyczną η_{pl} . Parametry g i h w modelu Binghama, są odpowiednio wyrazem wolnym i współczynnikiem kierunkowym prostej aproksymującej zależność momentu wywieranego przez mieszankę na sondę i prędkości ścinania mieszanki.

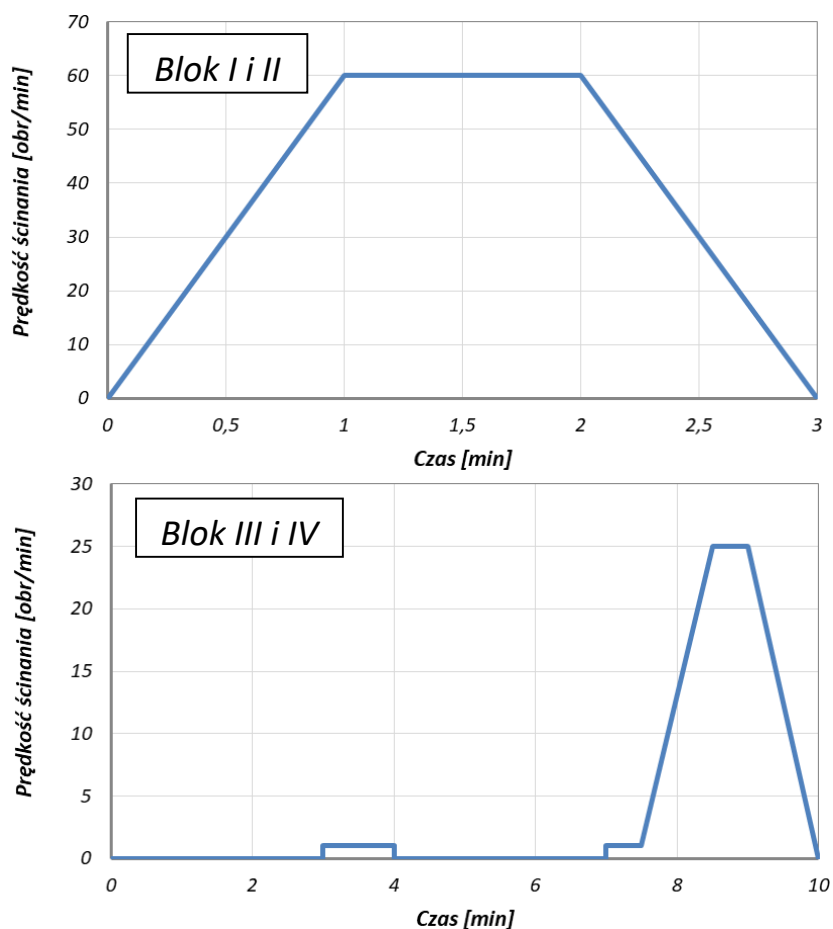
Parametry prostej Binghama oraz granica płynięcia g i lepkość plastyczna h związane są ze sobą następującymi zależnościami [86]:

$$\tau_0 = \frac{K}{C} \cdot g$$

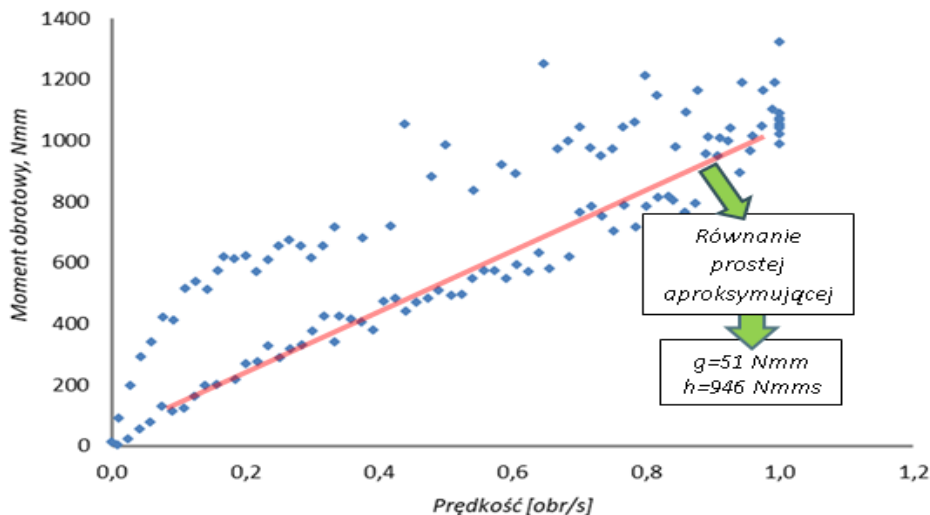
$$\eta_{pl} = \frac{K}{C} \cdot h$$

- w którym: C - stała wyznaczona przez kalibrację reometru z użyciem wzorcowej cieczy newtonowskiej (o znanej lepkości),
 K - stała wyznaczona przez kalibrację reometru z użyciem wzorcowej cieczy nienewtonowskiej (o znanej lepkości pozornej).

Iloraz wiążący stałe C i K jest stały dla danego reometru, dlatego też w pracy przyjęto czasem nazywać parametr g granicą płynięcia, a h lepkością plastyczną. Jest to uproszczenie i należy sobie zdawać z tego, że jest nieprawidłowe, ale zdaniem autora granica płynięcia i lepkość plastyczna są wielkościami łatwiejszymi w odbiorze.

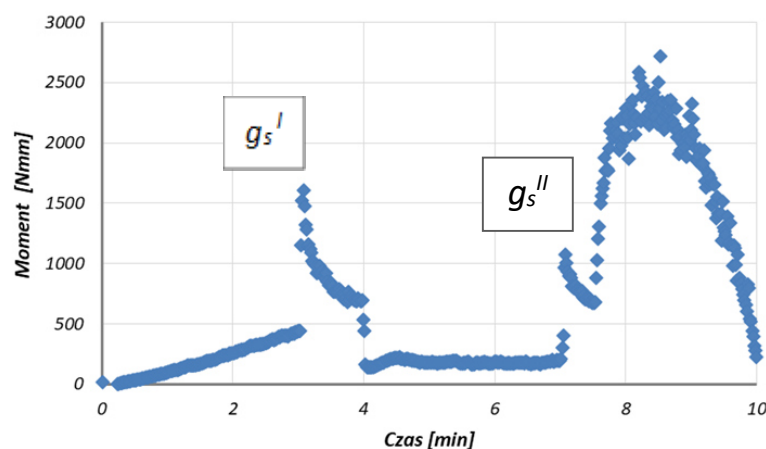


Rys. 55. Schemat ścinania mieszanek betonowych stosowany w badaniach właściwości reologicznych bloków I, II, III i IV

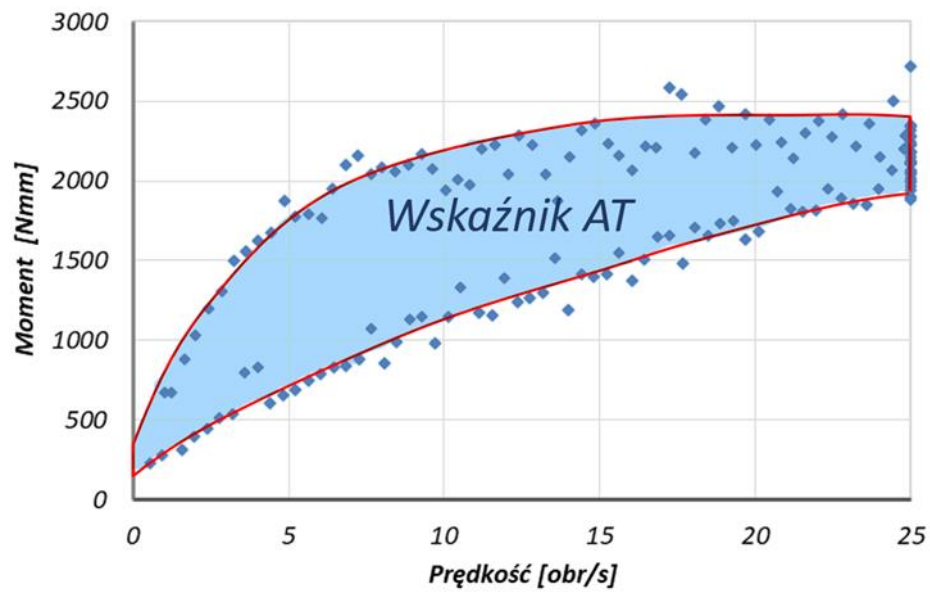


Rys. 56. Wykres momentu wywieranego na sondę, przez mieszankę poddaną ścinaniu według procedury przedstawionej na rys.55. Sposób wyznaczenia parametru g i h mieszanki betonowej.

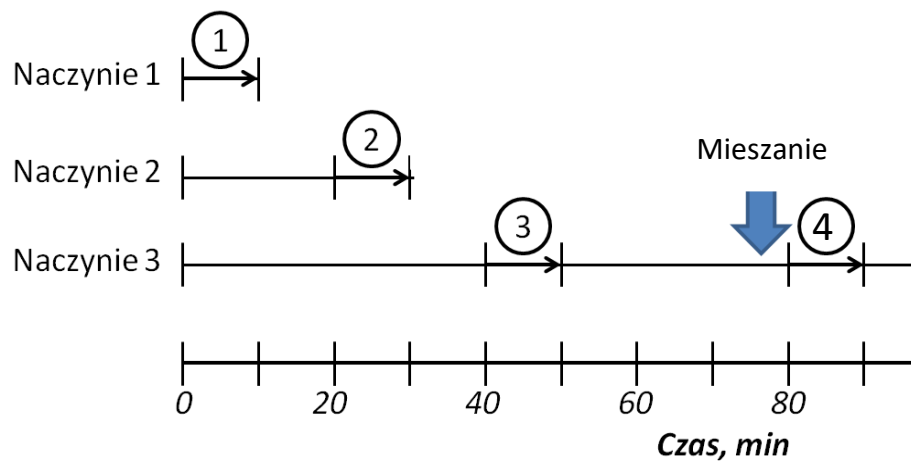
W III i IV bloku badań stosowano zmodyfikowaną procedurę pomiarową (rys.55), pozwalającą wyznaczyć oprócz reologicznych parametrów dynamicznych (g i h) parametry reologiczne statyczne – statyczną granicę płynięcia g_s i wskaźnik tiksotropii AT . W celu wyznaczenia statycznej granicy płynięcia mieszanka jest ścinana prędkością 1 obrotu na minutę, dzieje się tak dwukrotnie po 3 i 6 minucie po określonym czasie spoczynku mieszanki. W mieszance kształtuje się wtedy struktura, której obecność odpowiada za zmiany parcia mieszanek betonu samozagęszczalnego na deskowania. Statyczna granica płynięcia określa tę strukturę jakościowo i ilościowo. Kolejnym statycznym parametrem reologicznym jest wskaźnik AT nazywany wskaźnikiem tiksotropowego sztywnienia. Definiowany on jest jako pole zawarte pomiędzy krzywymi płynięcia rejestrowanymi dla rosnących i malejących prędkości ścinania (rys. 58). Pomiary właściwości reologicznych i pomiary konsystencji testem rozpląwu prowadzone były równolegle według sekwencji przedstawionej na rys.59.



Rys. 57. Wykres momentu wywieranego na sondę, przez mieszankę poddaną ścinaniu według procedury przedstawionej na rys.55.



Rys. 58. Wskaźnik tiksotropii AT wyznaczony na podstawie danych zarejestrowanych w końcowym etapie procedury (od 7 do 10 minuty)



Rys. 59. Sekwencja pomiaru zmian w czasie właściwości reologicznych zapraw i mieszanek betonu samozagęszczalnego

4.2 WPŁYW TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI SAMOZAGĘSZCZALNYCH MIESZANEK BETONOWYCH - BLOK I

Samozagęszczalne mieszanki betonowe, których dotyczy rozdział to mieszanki, które były przedmiotem badań w projekcie realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka pt. Innowacyjne spoiwa cementowe i betony z wykorzystaniem popiołu lotnego wapiennego współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej. Politechnika Śląska była liderem konsorcjum tworzonego oprócz niej przez Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych oraz Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk.

4.2.1 SKŁADY I WŁAŚCIWOŚCI SKŁADNIKÓW MIESZANEK

Cementy używane w badaniach były wykonane w skali półtechnicznej w Instytucie Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Krakowie w technologii współmielenia. Klinkier portlandzki, regulator wiązania i popiół lotny wapienny mielone były w młynie kulowym, a następnie dodawano do nich inne dodatki mineralne (tablica 18). Mielenie miało na celu przede wszystkim zmniejszenie negatywnego wpływu popiołów wapiennych na urabialność mieszanek. Popioły wapienne pochodziły z Elektrociepłowni Bełchatów opalanej węglem brunatnym. Skład chemiczny, właściwości fizyczne zestawiono w tablicach 14 i 16. Skład mieszanek betonów samozagęszczalnych zwykłych i wysokowartościowych przedstawia tablica 20. Wybrane cementy do badań mieszanek zestawione są w tablicy 19.

Tablica 16. Skład chemiczny cementów

Cement	LOI [%]	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O _{eq}	K ₂ O
CEM I 42,5 R	1,90	20,85	65,56	4,60	2,1	0,92	0,26	0,56
CEM II/ A-W	2,01	22,38	61,29	6,60	2,54	1,06	0,25	0,16
CEM II/B-W	2,19	23,89	56,56	8,71	3,07	1,19	0,26	0,15
CEM IV/B-W	2,76	32,12	42,93	12,35	3,31	1,17	0,23	0,38
CEM II/B (V-W)	2,05	26,47	52,42	9,52	3,28	1,35	0,29	0,61
CEM II/B (S-W)	1,92	24,49	57,91	6,99	2,44	1,77	0,30	0,19
CEM II/B (LL-W)	6,10	19,60	60,68	6,15	2,30	1,03	0,22	0,14

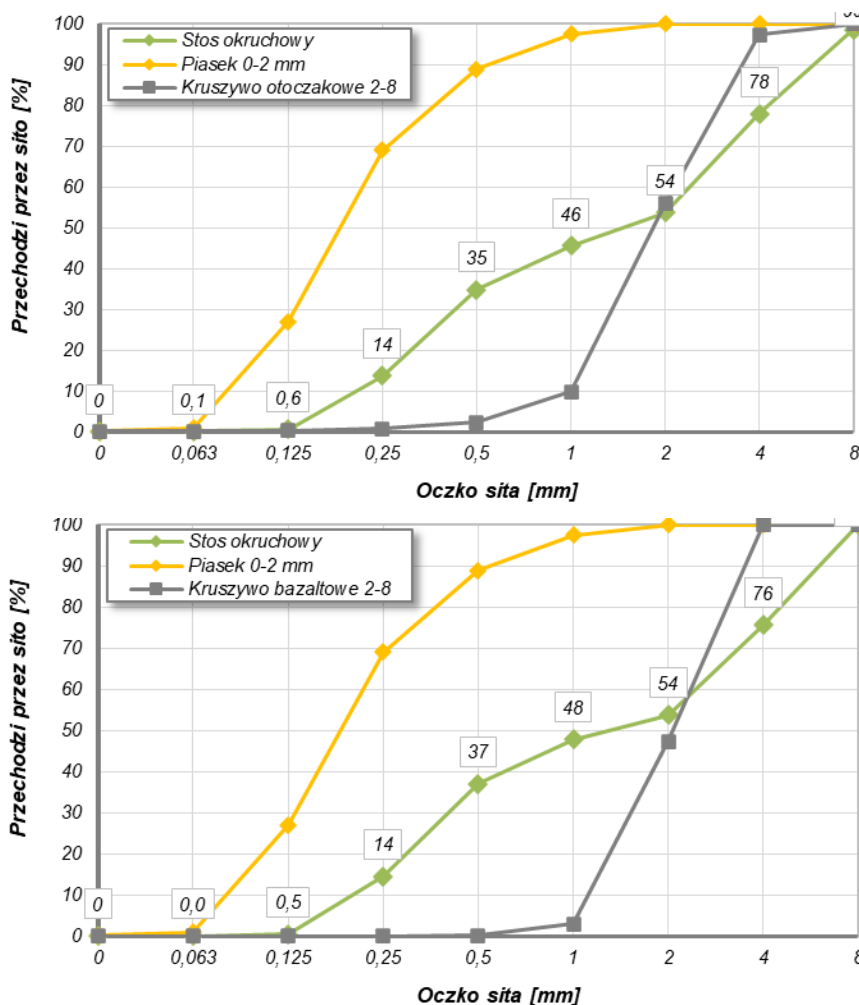
Tablica 17. Fizyczne właściwości cementów

Cement	Gęstość [g/cm ³]	Wodność [%]	Czas wiązania [min]		Średnica rozpływu [cm]	SO ₃ [%]	Powierzchnia właściwa [m ² /kg]
			Początek	Koniec			
CEM I 42,5 R	3,10	25,8	135	180	19,2	2,84	3810
CEM II/ A-W	3,04	27,6	153	263	19,5	2,84	4190
CEM II/B-W	2,98	30,4	180	250	18,2	3,05	4030
CEM IV/B-W	2,88	34,6	280	420	14,7	3,30	4200
CEM II/B (LL-W)	2,97	27,2	175	250	20,8	3,11	4430
CEM II/B (S-W)	3,0	28,2	168	306	21,2	3,34	4060
CEM II/B(V-W)	2,93	28,6	258	428	20,0	3,16	4130

Tablica 18. Skład cementów

Cement	Klinkier portlandzki	Gips	Popiół lotny wapienny	Popiół lotny krzemionkowy	Żużel wielkopiecowy	Kamień wapienny
CEM I 42,5 R	97,0	3,0	-	-	-	-
CEM II/A-W	81,1	4,6	14,3	-	-	-
CEM II/B-W	67,7	3,3	29	-	-	-
CEM IV/B-W	48	4	48	-	-	-
CEM II/B (LL-W)	64,7	4,7	15,3	-	-	15,3
CEM II/B (S-W)	64,7	4,7	15,3	-	15,3	-
CEM II/B (V-W)	66,7	4,7	14,3	14,3	-	-

W mieszankach samozagęszczalnych betonów zwykłych stos okrucowy składał się z piasku frakcji 0-2 mm i kruszywa otczakowego frakcji 2-8. W mieszankach samozagęszczalnych betonów wysokowartościowych kruszywo otczakowe zostało zastąpione kruszywem bazaltowym frakcji 2-8 mm w taki sposób, aby objętość mieszanki kruszyw była taka sama przy zachowaniu równego punktu piaskowego (pp=54%). Krzywe przesiewu kruszyw i stosów okrucowych mieszanek przedstawiają rys. 60.



Rys. 60. Krzywe przesiewu kruszyw i stosu okrucowego samozagęszczalnych mieszanek betonów zwykłych (u góry) i wysokowartościowych (u dołu)

Tablica 19. Cementy używane w badaniach wpływu temperatury na właściwości mieszanek betonów samozagęszczalnych - Blok I

Cement	Samozagęszczalne Mieszanki betonu zwykłego	Samozagęszczalne mieszanki betonu wysokowartościowego
CEM I 42,5 R	+	+
CEM II A -W		+
CEM II A (V-W)		+
CEM II B -W	+	
CEM II B (LL-W)	+	
CEM IV B-W	+	
CEM II/B (S-W)	+	
CEM II/B (V-W)	+	

Tablica 20. Skład mieszanek betonowych

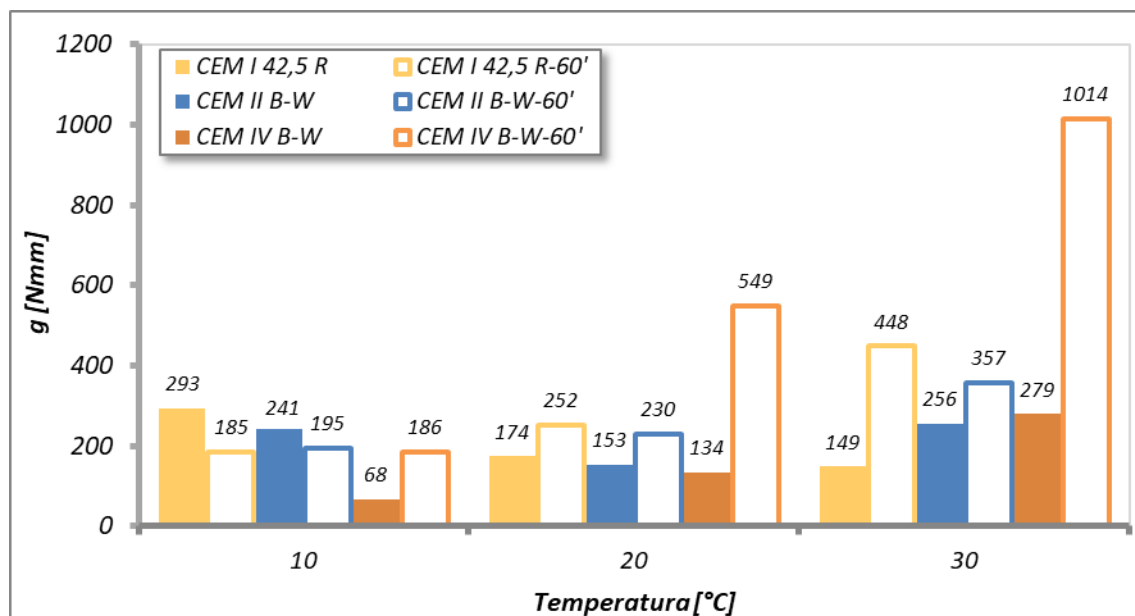
Składnik	Samozagęszczalny beton zwykły	Samozagęszczalny beton wysokowartościowy
Cement	428	446
Mikrokrzemionka	-	55
Woda	214	175
Superplastyfikator Glenium SKY 592	9	15
w/c	0,5	0,39
w/s	0,5	0,35
Piasek 0-2	846	859
Kruszywo otoczkowe 2-8	846	
Kruszywo bazaltowe 2-8		859

4.2.2 WPLYW TEMPERATURY NA URABIALNOŚĆ SAMOZAGĘSZCZALNYCH MIESZANEK BETONU ZWYKŁEGO

Tablica 21. Wyniki badań urabialności samozagęszczalnych mieszanek betonów zwykłych

CEMENT	CEM I 42,5 R		CEM II B-W		CEM IV B-W		CEM II B (LL-W)		CEM II/B (S-W)		CEM II/B (V-W)		
	5	60	5	60	5	60	5	60	5	60	5	60	
Średnica rozptywu R [cm]	10 °C	63	65	65	61	76	70	63	63	62	64	51	67
	20 °C	72	68	68	64	70	40	63	62	65	60	63	53
	30 °C	72	64	64	57	63	24	71	63	68	45	67	58
g [Nmm]	10 °C	209	187	195	241	30	186	222	221	256	247	304	197
	20 °C	152	252	174	230	134	549	229	299	208	262	281	263
	30 °C	174	370	256	425	222	1014	161	205	148	455	232	375
Czas rozptywu T ₅₀ [s]	10 °C	2,0	1,8	1,8	2,4	1,2	2,5	3,0	3,1	2,8	3,2	1,9	2,7
	20 °C	1,5	1,3	1,3	2,3	1,9	x	2,0	2,3	2,4	3,1	3,4	3,8
	30 °C	1,1	1,6	1,6	x	3,5	x	1,9	2,8	1,5	3,1	2,1	2,8
h [Nmm]	10 °C	728	676	676	633	627	1052	843	860	900	922	568	668
	20 °C	726	567	567	675	900	1483	568	841	806	918	730	754
	30 °C	581	641	641	745	1122	881	533	777	636	889	812	918

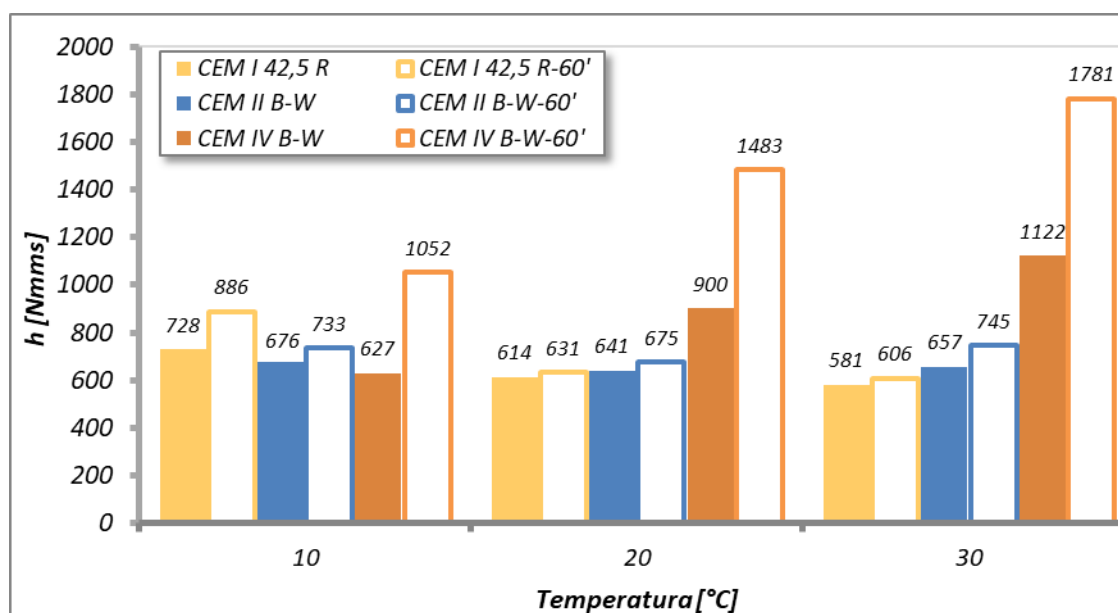
Mieszanka niesamozagęszczalna	SF 1	SF 2	SF 3
-------------------------------	------	------	------



Rys. 61. Wpływ temperatury na parametr g mieszanek samozagęszczalnych betonów zwykłych z cementami z popiołami lotnym wapiennymi

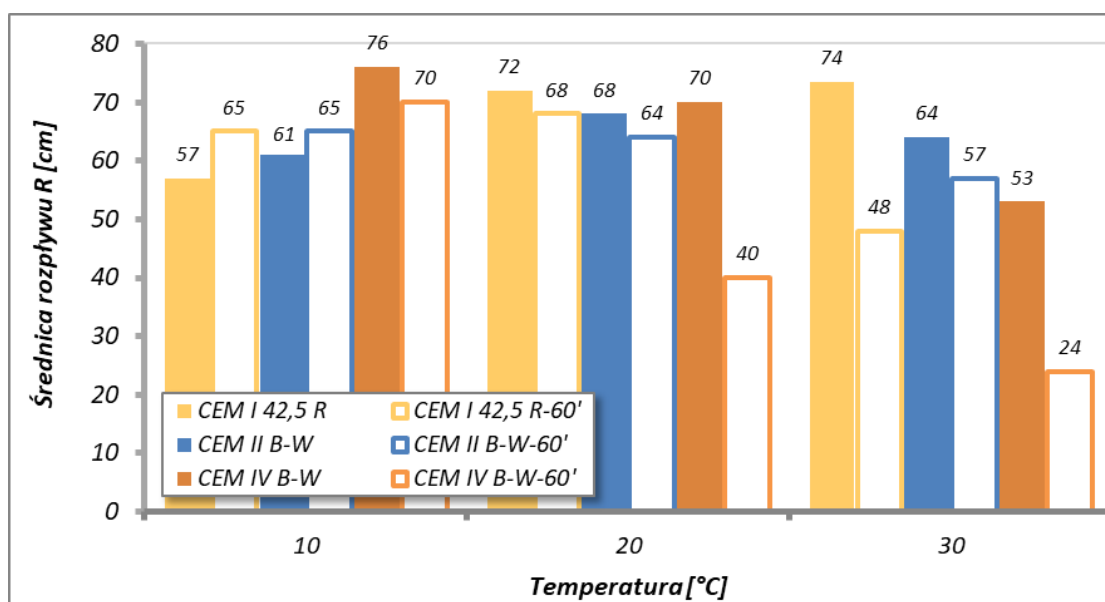
Charakter wpływu temperatury na parametr g , który wiązany jest z granicą płynięcia jest zależny od ilości popiołu wapiennego w cemencie (rys.61). Parametr g mieszanek bez popiołu wapiennego bezpośrednio po wymieszaniu zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury, po godzinie mamy efekt odwrotny parametr g jest tym większy im temperatura wyższa. Granica płynięcia mieszanek CEM IV B-W (50 % PLW w cemencie) wrasta wraz ze wzrostem temperatury, czas ten efekt wydatnie wzmacnia. Parametr g mieszanek z CEM II B-W (30 % PLW w cemencie) ulega najmniejszym zmianom pod wpływem temperatury. Bezpośrednio po wymieszaniu osiąga on minimalną wielkość w temperaturze 20°C, by po godzinie rosnąć wraz ze wzrostem temperatury.

Wpływ temperatury na parametr h odpowiadający lepkości plastycznej również jest zależny od ilości popiołu wapiennego (rys.62). Lepkość plastyczna mieszanek bez popiołu zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury ten trend jest zachowany po upływie godziny. Lepkość plastyczna mieszanek z CEM II B-W (30 % popiołu wapiennego) pod wpływem zmian temperatury zmienia się w podobnym zakresie jak w przypadku mieszanek bez popiołu z tym, że osiąga najmniejsze wielkości w temperaturze 20°C. Lepkość mieszanki z największą ilością popiołu wyraźnie wrasta wraz ze wzrostem temperatury. Dzieje się tak bezpośrednio po wymieszaniu i po upływie 1 godziny.



Rys. 62. Wpływ temperatury na parametr h mieszanek samozagęszczalnych betonów zwykłych z cementami z popiołami lotnym wapiennymi

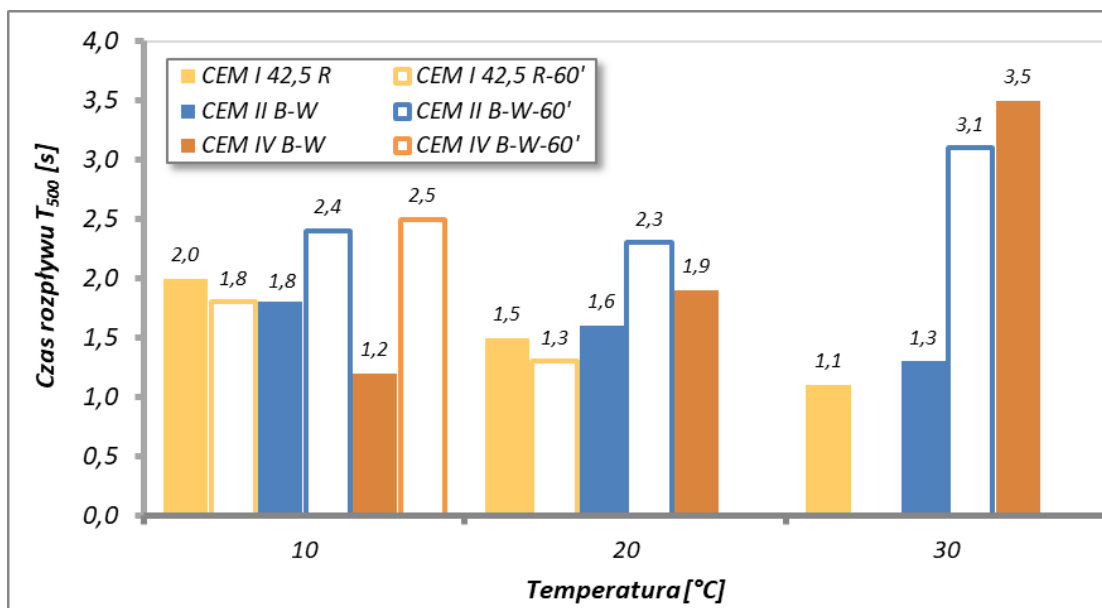
Mieszanki z cementem portlandzkim i z cementem, w którym ilość popiołów wapiennych nie przekracza 30 % (CEM II B-W) charakteryzują się największymi średnicami rozpląwu w temperaturze 20°C (rys.63). W temperaturze 10 °C średnice rozpląwu są początkowo najmniejsze, by po godzinie się zwiększyć, są jednak mniejsze niż te w temperaturze 20°C. Średnica rozpląwu mieszanek z CEM IV B-W (50 % PLW) zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury, po 1 godzinie w przedziale temperatur 20-30°C mieszanki te nie spełniają kryterium samozagęszczalności i wymagają zagęszczenia wibracyjnego bądź zastosowania dodatkowej ilości domieszki upłynniającej. Podobnych zabiegów wymaga mieszanka z CEM I po upływie 1 godziny w temperaturze 30°C. Jeśli ilość popiołu lotnego w cemencie zostanie ograniczona do 30% to możemy uzyskać mieszankę, która będzie spełniała kryteria samozagęszczalności w zakresie 10-30°C po upływie 1h od wymieszania.



Rys. 63. Wpływ temperatury i czasu na średnicę rozptywu mieszanek samozagęszczalnych betonów zwykłych z cementami z popiołami lotnym wapiennymi

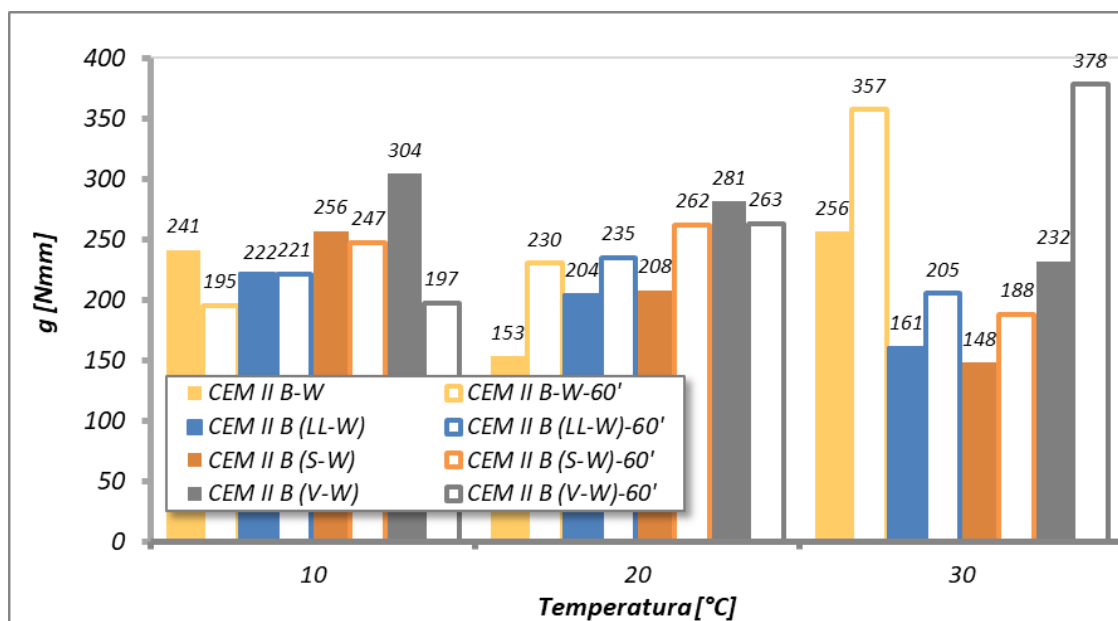
W temperaturze 30 °C średnice rozptywu zmniejszają się tym wyraźniej im więcej jest popiołu wapiennego. Wpływ wzrostu temperatury na średnice rozptywu mieszanek z CEM IV B-W (z 50 % ilością popiołu wapiennego) jest najwyraźniejszy. Mieszanki te zmniejszają swoją średnicę rozptywu wraz ze wzrostem temperatury. Po 60 minutach ta mieszanka tylko w temperaturze 10 °C może być uznana za samozagęszczalną. W temperaturze 20 i 30 °C, musi być zagęszczana mechanicznie bądź powinno się dodać domieszkę upłynniającą tak by osiągnąć zadowalający poziom właściwości reologicznych.

Bezpośrednio po wymieszaniu czas rozptywu mieszanek z CEM I i CEM II B-W maleje wraz ze wzrostem temperatury, po godzinie ten trend jest zachowany w zakresie 10-20°C (rys.64). Upływ czasu i temperatura 30 °C blisko dwukrotnie zwiększa czas rozptywu mieszanek z CEM II B-W. Czas rozptywu mieszanek z CEM IV B-W wydłuża się wraz ze wzrostem temperatury. Po godzinie w przypadku mieszanek z CEM IV i CEM I w temperaturze nie było możliwe określenie czasu rozptywu, gdyż rozptyw mieszanek był mniejszy od 50 cm. Zmiany czasu rozptywu spowodowane temperaturą i czasem pociągają za sobą konieczność odmiennej kwalifikacji mieszanek pod względem klasy lepkości. Ale jest to raczej spowodowane tym, że czas rozptywu mieszanek utrzymuje się w granicach 2s, a to jest wielkość graniczna dla klas lepkości VS1 i VS2. Wpływ czasu i temperatury mieszanek na czas rozptywu mieszanek, jeśli wykluczmy z rozważań mieszankę z CEM IV B-W możemy uznać za nieznaczący z praktycznego punktu widzenia.



Rys. 64. Wpływ temperatury na czas rozplywu T_{500} mieszanek samozagęszczalnych betonów zwykłych z cementami z popiołami lotnym wapiennymi

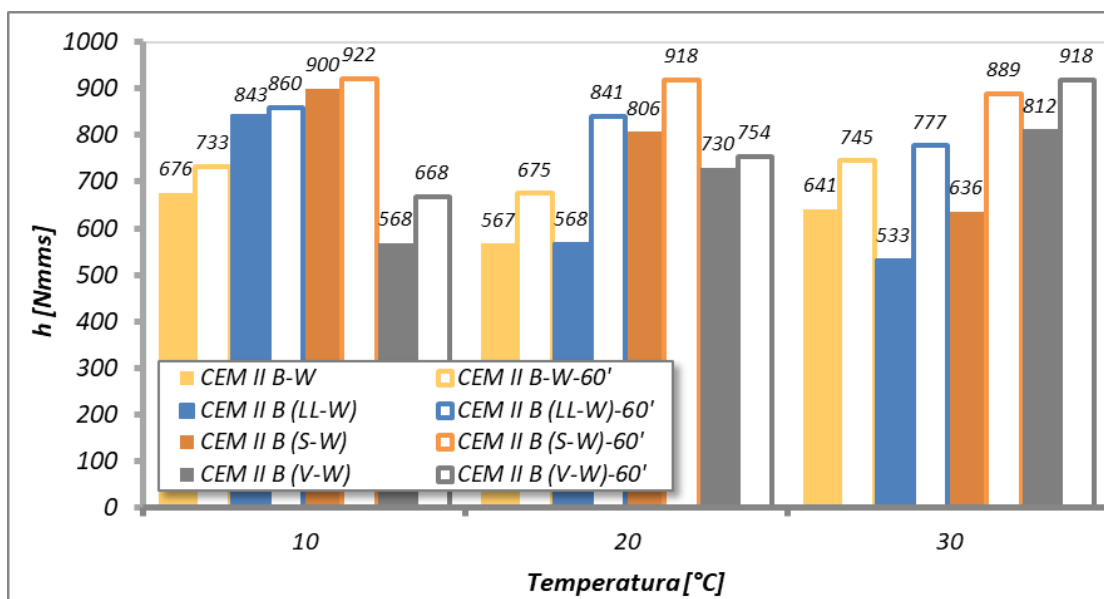
Zmiany parametru g mieszanek w których zastąpiono część popiołu i wapiennego w cemencie innym dodatkiem mineralnym w stosunku masowym 1:1 mogą być różne ilościowo i co ważniejsze jakościowo (rys.65).



Rys. 65. Wpływ temperatury na parametr g mieszanek samozagęszczalnych betonów zwykłych z cementami z popiołami lotnym wapiennymi i innymi dodatkami mineralnymi

Wpływ temperatury trudno z tego powodu uogólnić. Jeżeli drugim dodatkiem będzie popiół krzemionkowy to bezpośrednio po wymieszanu parametr g zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury, po godzinie ten trend ulega odwróceniu. Jeżeli część popiołu wapiennego zastąpimy mączką wapienną lub żużlem wielkopieczowym to parametr g

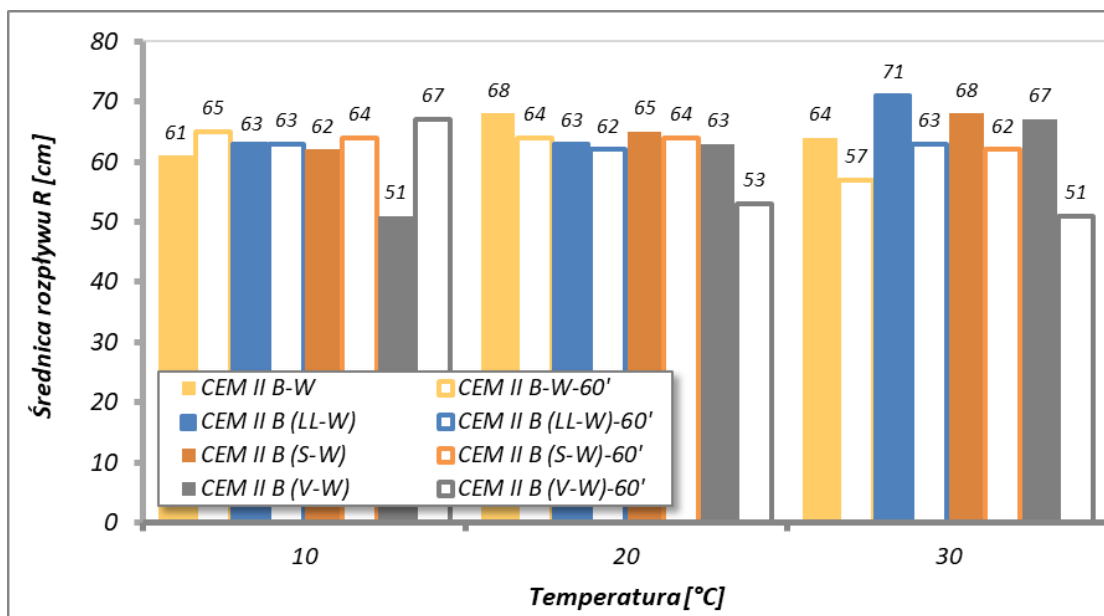
wraz ze wzrostem temperatury będzie się zmniejszał, zarówno po wymieszaniu jak i po godzinie. W temperaturze 10°C g tych mieszanek z upływem czasu nie zmienia się znacząco, w przedziale 20-30°C po 1 godzinie g rośnie, ale są to zmiany zdecydowanie mniejsze niż te obserwowane w mieszankach z samym popiołem wapiennym i mieszanką popiołów krzemionkowego i wapiennego. W temperaturze 10 °C mieszanki z popiołem krzemionkowym i popiołem wapiennym i z samym popiołem wapiennym upłynniają się wraz z upływem czasu, co jest wyrażone wyraźnym zmniejszeniem g po upływie 1 godziny. Tego efektu nie ma, gdy drugim dodatkiem w cemencie jest mączka wapienna bądź żużel wielkopiecowy. Dodatek mączki wapiennej czy żużla wielkopiecowego zwiększa odporność parametru g na zmiany wywołane wzrostem temperatury i upływem czasu



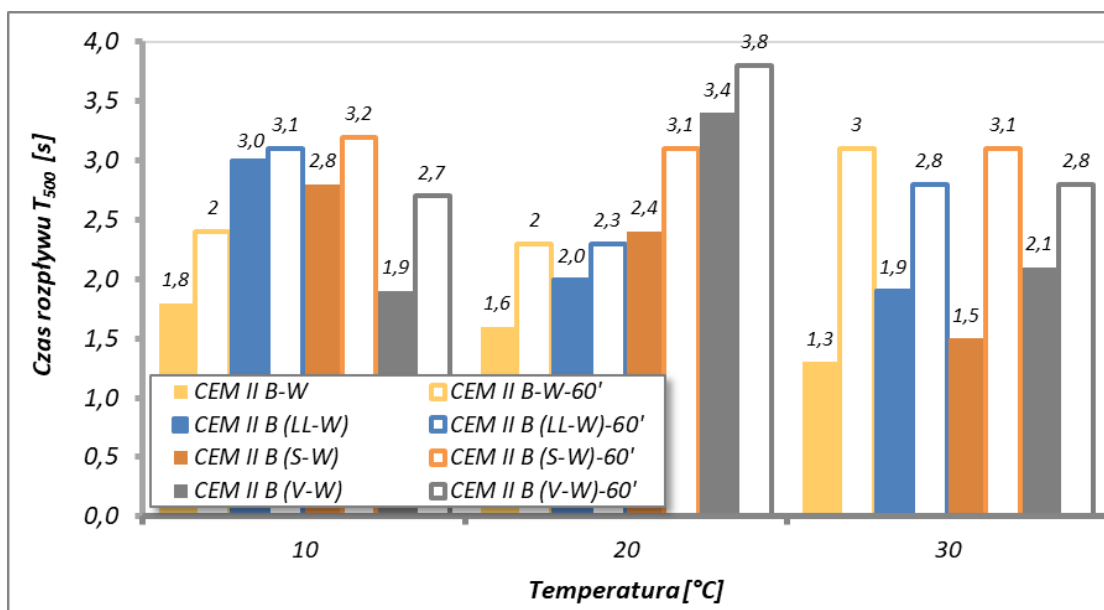
Rys. 66. Wpływ temperatury na parametr h mieszanek samozagęszczalnych betonów zwykłych z cementami z popiołami lotnym wapiennymi i innymi dodatkami mineralnymi

Parametr h mieszanek z popiołem wapiennym i popiołem krzemionkowym rośnie wraz ze wzrostem temperatury, jest to niezależne od czasu (rys.68). Mieszanki z popiołem wapiennym i kombinacją dodatków w postaci popiołu wapiennego i mączki wapiennej lub żużla wielkopiecowego zmniejszają swoją lepkość wraz wzrostem temperatury.

Zmiany średnic rozptywu wywołane zmianami temperatury są największe w przypadku mieszanki z popiołem wapiennym i krzemionkowym, w przypadku tej mieszanki zmiany parametru g wywołane zmianą temperatury również były największe. Bezpośrednio po wymieszaniu średnica rozptywu tych mieszanek rośnie wraz ze wzrostem temperatury, po godzinie temperatura wpływa w odwrotny sposób. Kombinacje dodatków w postaci PLW + MW i PLW+ ŻW w cemencie są korzystne, pozwalają na uzyskanie mieszanek, których urabialność nie ulega znaczącym zmianom w przedziale temperatur 10-30°C i w czasie 1 godziny.



Rys. 67. Wpływ temperatury na średnicę rozpląwy mieszanek samozagęszczalnych betonów zwykłych z cementami z popiołami lotnym wapiennymi



Rys. 68. Wpływ temperatury na czas rozpląwy T₅₀₀ mieszanek samozagęszczalnych betonów zwykłych z cementami z popiołami lotnym wapiennymi

Wpływ temperatury na granicę płynięcia i lepkość plastyczną mieszanek jest zgodny co do zasady z wynikami testów technicznych. Tam, gdzie średnica rozpląwy rośnie, maleje granica płynięcia i odwrotnie, gdzie czas rozpląwy rośnie wzrasta lepkość (maleje mobilność będąca odwrotnością lepkości plastycznej).

4.2.3 WPLYW TEMPERATURY NA URABIALNOŚĆ SAMOZAGĘSZCZALNYCH MIESZANEK BETONÓW WYSOKOWARTOŚCIOWYCH

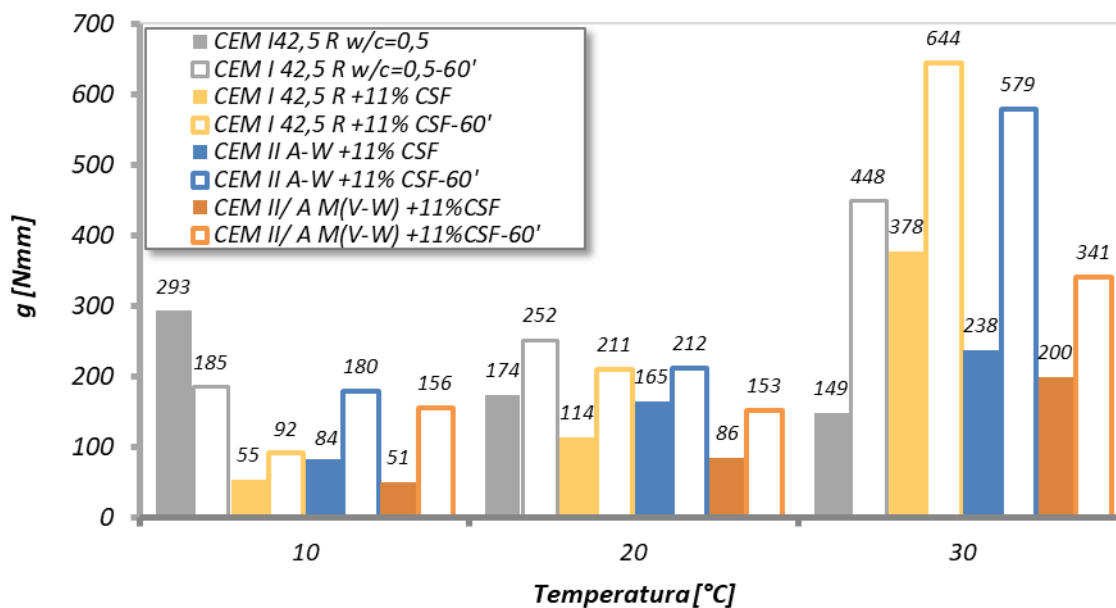
Urabialność mieszanek betonów wysokowartościowych zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury (tablica 22, rys.69-72). Parametry g i h rosną wraz ze wzrostem temperatury. Zmiana wielkości g i h wywołuje odpowiednie zmiany w średnicy i czasie rozplywu mieszanek. Wzrost g skutkuje mniejszą średnicą rozplywu a im większe h tym czas rozplywu T_{500} dłuższy.

W przedziale temperatur 10 do 20 °C średnice rozplywu, choć ulegają zmniejszeniu, są na tyle duże, że mieszanki można uznać za samozagęszczalne. Temperatura 30 °C, zmniejsza średnice rozplywu mieszanek tak znacznie, że nie są spełnione kryteria samozagęszczalności. Jest to szczególnie wyraźne w przypadku mieszanki z cementem portlandzkim. Zastosowanie cementów z dodatkami zmniejsza ten efekt. Korzystne działanie dodatków mineralnych w zwiększaniu odporności mieszanek na wzrost temperatury zanika po 60 minutach. Taki wniosek można wysnuć biorąc pod uwagę średnice rozplywu mieszanek określone w temperaturze 30 i po czasie 60 minut zawierają się one w granicach 40 – 45 cm. W przypadku tych mieszanek nie możliwe było zmierzenie czasu rozplywu do średnicy 50 cm, ale zmierzono czas do momentu ustania płynięcia, który zawierał się w granicach 10-20 s. Generalnie czas rozplywu wzrastał wraz ze wzrostem temperatury mieszanek, jest to zgodne z wpływem temperatury na lepkość mieszanek. W zbiorze mieszanek, dla których spełnione są kryteria samozagęszczalności wzrost temperatury mieszanki o 10°C powoduje dwukrotny wzrost jej czasu rozplywu. Na koniec należy zwrócić uwagę na mieszanki z cementami z dodatkami (CEM II A-W i CEM II/AM (V-W)), które w 30°C samozagęszczalne nie są, ale zdaniem autora w sprzyjających warunkach mogą prawidłowo wypełnić deskowanie. Te sprzyjające warunki to nieskomplikowany kształt deskowania, z niewielkim stopniem zbrojenia elementu.

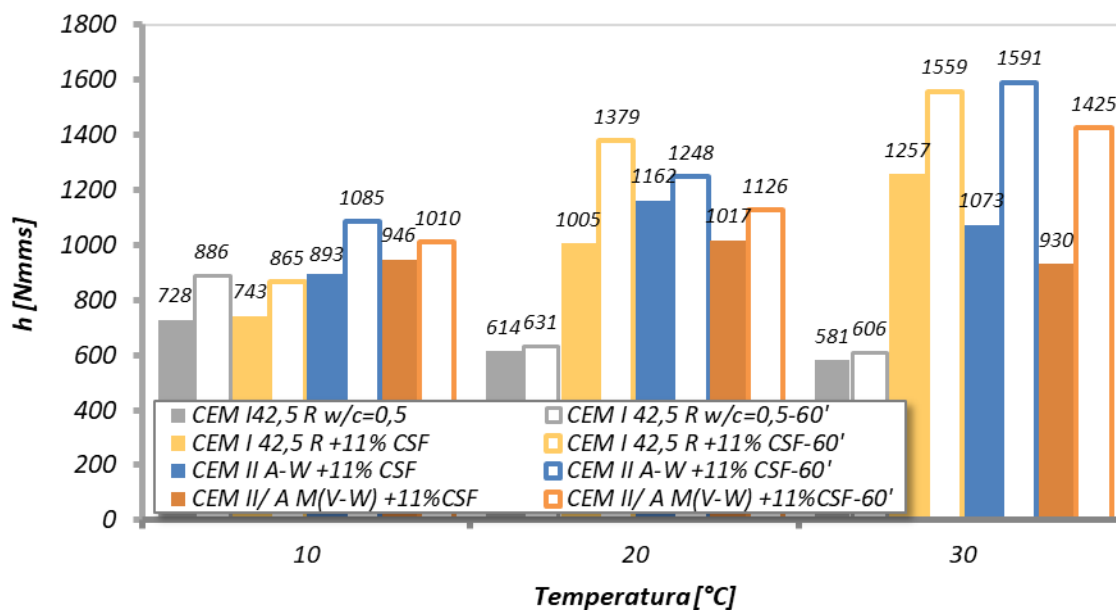
Tablica 22. Wyniki badań urabialności samozagęszczalnych mieszanek betonów wysokowartościowych

Spoiwo		CEM I 42,5 R +11% CSF		CEM II A-W +11% CSF		CEM II/A M (V-W) +11%CSF	
		5	60	5	60	5	60
Średnica rozplywu R [cm]	10 °C	74	71	73,5	64,5	77,0	66,5
	20 °C	70	62	68,0	58,0	74,0	66,5
	30 °C	44	40	54,0	41,0	56,0	45,0
g [Nmm]	10 °C	55	92	84	180	51	156
	20 °C	114	211	165	212	86	153
	30 °C	378	644	238	579	200	341
Czas rozplywu T_{50} [s]	10 °C	1,2	2,0	2,5	4,0	1,9	3,2
	20 °C	3,4	5,6	3,0	6,7	2,7	3,6
	30 °C	10,0*	15,0*	5,9	20,0*	5,1	15,0*
h [Nmms]	10 °C	743	865	893	1085	946	1010
	20 °C	1005	1379	1162	1248	1017	1126
	30 °C	1257	1559	1073	1591	930	1425

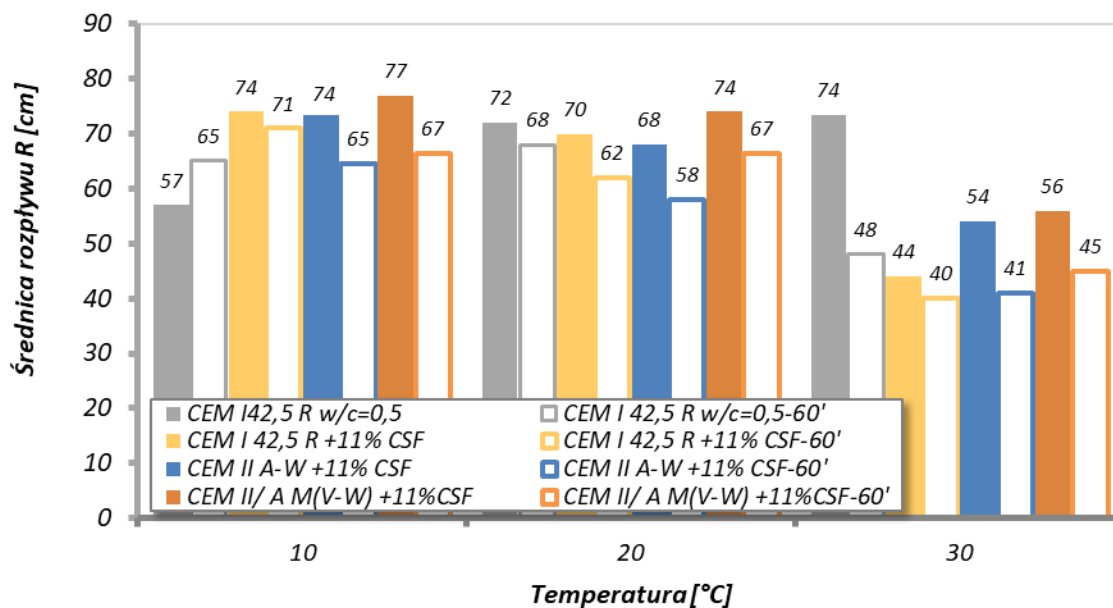
* czas płynięcia mieszanki



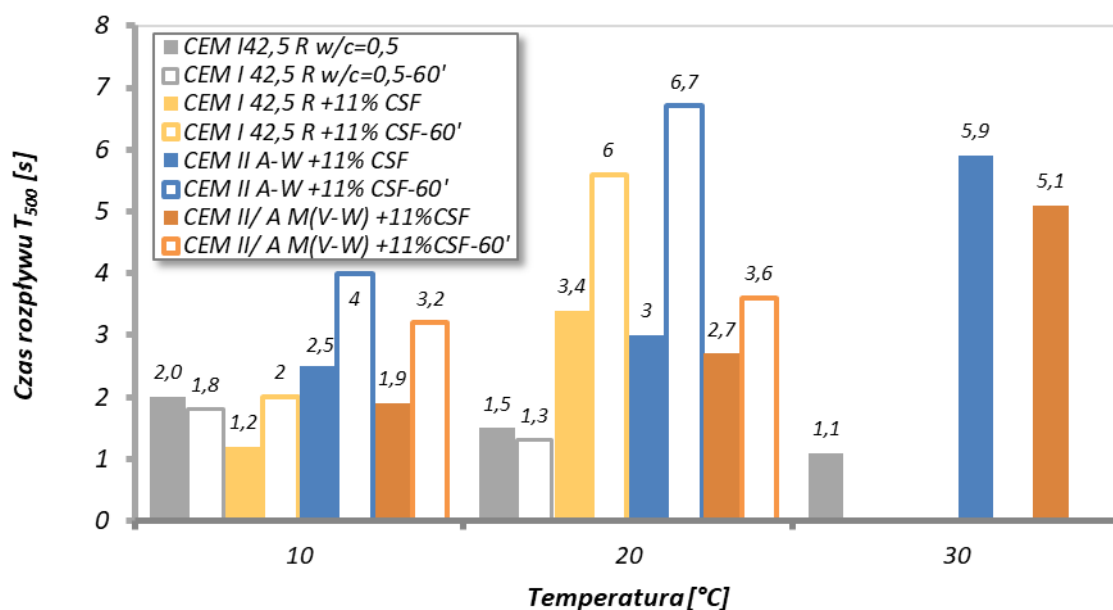
Rys. 69. Wpływ temperatury i czasu na parametr g mieszanek samozagęszczalnych betonów wysokowartościowych.



Rys. 70. Wpływ temperatury i czasu na parametr h mieszanek samozagęszczalnych betonów wysokowartościowych.



Rys. 71 Wpływ temperatury i czasu średnicę rozplywu mieszanek samozagęszczalnych betonów wysokowartościowych.



Rys. 72 Wpływ temperatury i czasu na czas rozplywu T_{500} mieszanek samozagęszczalnych betonów wysokowartościowych

Obydwie grupy betonów opisywane w tym paragrafie i wcześniej charakteryzują się zbliżoną ilością zaczynu cementowego jest to ok. $350 \text{ dm}^3/\text{m}^3$. W temperaturze $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ich średnice rozplywu również są zbliżone, można je uznać za mieszanki klasy SF 2. Czasy rozplywu mieszanek różnią się i w przypadku betonów wysokowartościowych są dłuższe. Jest to konsekwencją większej lepkości, ponieważ w/s jest niższe i też jest z tego względu konieczność stosowania większej ilości superplastyfikatora. Jeżeli w zaczynie cementowym jest mniej wody to jego lepkość jest większa. Odległość pomiędzy ziarnami cementu jest mniejsza i siły przyciągania różnego pochodzenia odgrywają większą rolę

w kształtowaniu lepkości. Sama domieszka upłynniająca, przez zawadę steryczną ma również tendencję do zwiększania lepkości.

Z uwagi na podobną ilość zaczynu cementowego, tym samym podobną wielkość wskaźnika wypełnienia kruszywa zaczynem cementowym porównując obie grupy mieszanek betonowych można przeprowadzić dyskusję na temat roli pyłu krzemionkowego w kształtowaniu odporności na działanie temperatury. Widoczne jest to, że mieszanki samozagęszczalnego betonu wysokowartościowego w temperaturze 30 °C wymagają w zasadzie zagęszczania mechanicznego. Wzrost temperatury mieszanki negatywnie wpływa na ich konsystencję. Mieszanki betonu zwykłego bez mikrokrzemionki wykazują odwrotne zachowanie, ponieważ początkowe średnice rozplywu rosną wraz ze wzrostem temperatury. Można zatem zakładać, że mikrokrzemionka odpowiada za zmianę układu pól adsorpcji dla domieszki upłynniającej. Zmiana ta może być wywołana przedstawionym w paragrafie 2.2.2 efektem inwersji potencjału mikrokrzemionki. W temperaturach poniżej 20°C mikrokrzemionka rekompensuje niedobór pól adsorpcji wywołany mniejszą ilością etryngitu. Dzięki temu to mieszanki betonów wysokowartościowych w temperaturze 10°C są najlepiej urabialne. W przypadku mieszanek betonów zwykłych (bez mikrokrzemionki) obserwowany był efekt odwrotny. W temperaturach powyżej 20°C sprotonowana mikrokrzemionka i etryngit tworzący się w znacznej ilości na fazie C₃A odpowiada za zbyt dużą powierzchnię adsorpcyjną dla domieszki. Jej ilość wyznaczona dla mieszanek o temperaturze 20°C nie jest w stanie jej pokryć i stąd wyraźnie gorsza konsystencja mieszanek betonów wysokowartościowych w temperaturze 30°C. Tego efektu nie obserwowano w przypadku mieszanek betonów bez mikrokrzemionki. Samozagęszczalne mieszanki betonów zwykłych o temperaturze 30°C początkowo charakteryzują się zbliżonymi średnicami rozplywu do mieszanek o temperaturze 20°C. Wzrost wielkości parametrów reologicznych mieszank BSZWW może mieć również swoje źródło w innych zjawiskach. Może być spowodowany selektywną bądź preferencyjną adsorpcją domieszki na powierzchniach cementu i mikrokrzemionki [121]. Zależne jest to od budowy domieszki, brak wiedzy na jej temat uniemożliwia dalszą dyskusję.

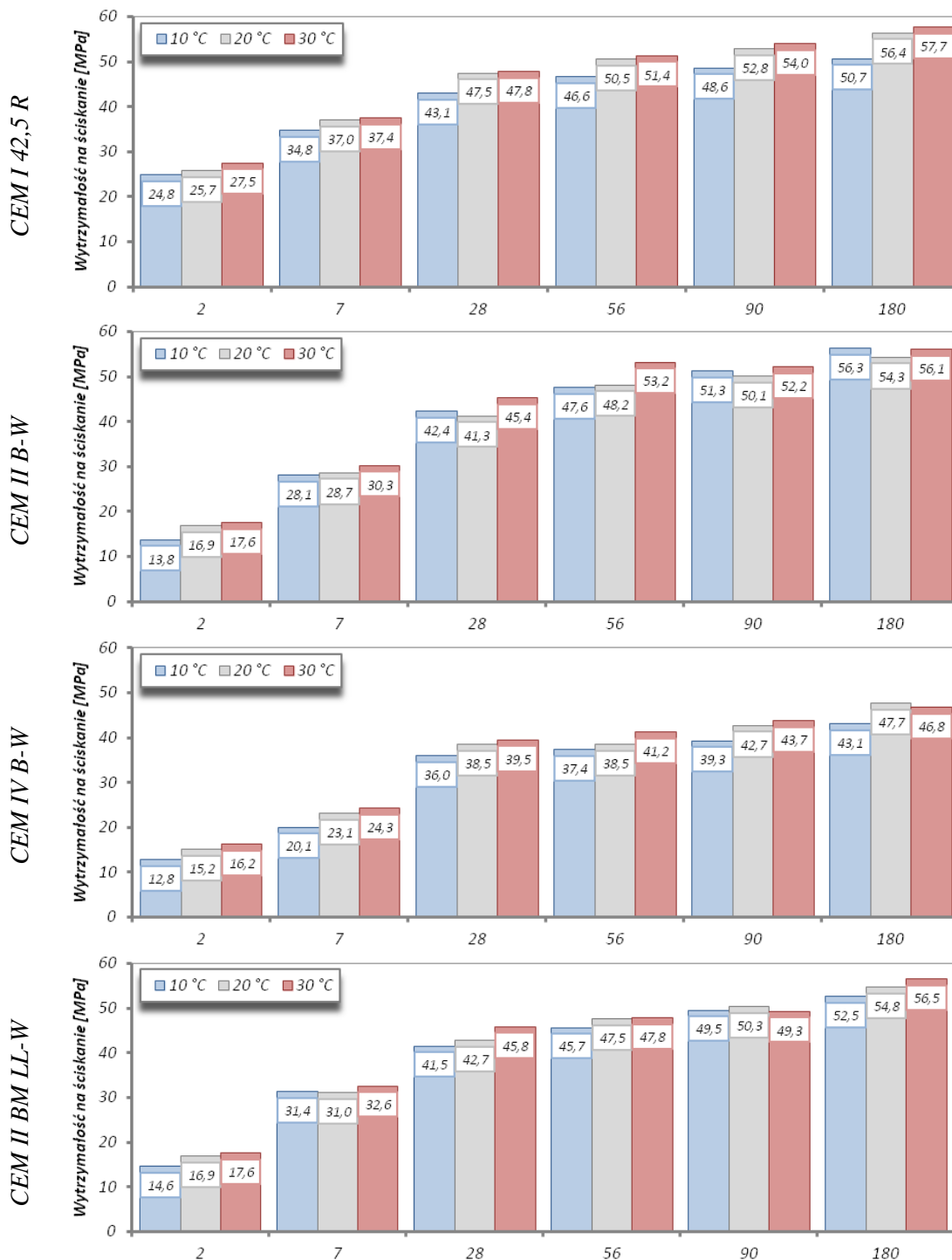
4.2.4 WPLYW TEMPERATURY NA WYTRZYMAŁOŚĆ NA ŚCISKANIE BETONÓW SAMOZAGĘSZCZONYCH

Procesy wiązania cementu i narastania wytrzymałości są uzależnione od temperatury, w której zachodzą. W wyższej temperaturze wiązanie następuje szybciej i jest krótsze, szybciej narasta wytrzymałość kompozytów cementowych. Wytrzymałość na ściskanie betonów dojrzewających w wyższej temperaturze jest wyższa niż tych dojrzewających w temperaturze niższej. Jest to słuszne zwłaszcza w początkowym okresie dojrzewania, gdy układ spoiwo woda ulega bardzo dynamicznym zmianom. Z biegiem czasu możemy zaobserwować zjawisko nazywane „crossover effect” po raz pierwszy sygnalizowane przez McIntosha w 1956 roku. Tym terminem określane jest zjawisko osiągnięcia większej wytrzymałości kompozytów cementowych dojrzewających np. w temperaturze z przedziału 10-20°C niż tych dojrzewających w temperaturze 20-30°C. Ma to swoje źródło w strukturze hydratyzującego zaczynu cementowego i jeśli jest widoczne to pojawia się po 28 dniu dojrzewania. Wpływ temperatury w jakiej dojrzewa beton na jego właściwości mechaniczne jest szeroko rozpoznany. W pracy określono wpływ temperatury początkowej mieszanki betonowej na wytrzymałość na ściskanie uzyskanych z nich betonów. Temperatura mieszanki 10, 20 lub 30 °C była utrzymywana przez ok. 80 minut, był to czas potrzebny na określenie właściwości zgodnych z założonym programem badań. Po tym czasie próbki umieszczano w formach, które przechowywano w temperaturze ok. 20 °C, do momentu rozformowania, od którego próbki dojrzewały w normowych warunkach (woda o temperaturze 20±2°C). Obserwowane zmiany wytrzymałości są zatem konsekwencją wpływu początkowej temperatury mieszanki i procesu jej chłodzenia lub ogrzewania do temperatury 20°C. Miało to miejsce w ciągu kilku godzin od zaformowania próbek. Taki tok postępowania ma uzasadnienie w normie PN-EN 12390-2:2011 Badania betonu – Część 2: Wykonywanie i pielęgnacja próbek do badań wytrzymałościowych [3]. Norma ta wyraźnie nakazuje pozostawienie próbek w formach przez co najmniej 16 godzin (maksymalnie 3 dni) po zabezpieczeniu ich przed wstrząsami, wibracją oraz utratą wody, w temperaturze 20°C ± 5°C. Czyli po zagęszczeniu próbek w warunkach placu budowy należy zadbać o to by formy były przechowywane w temperaturze 20 °C.

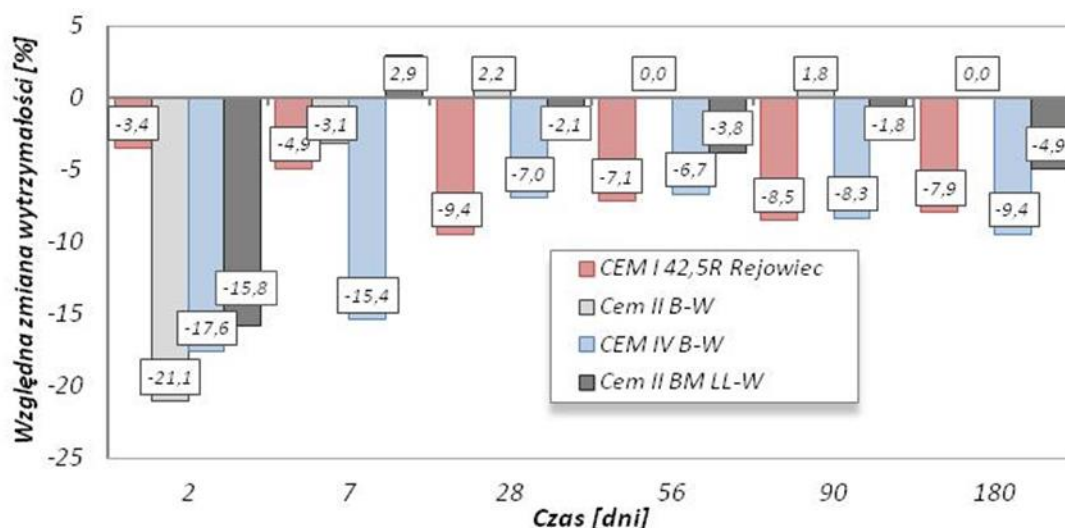
Betony o normalnej wytrzymałości wykonane z mieszanek o temperaturze 10 °C mają niższe wytrzymałości na ściskanie niż te z mieszanek o temperaturze 20 i 30 °C. Wytrzymałość betonów z mieszanek o temperaturze 30 °C jest największa. Takie uszeregowanie wytrzymałości utrzymuje się do 180 dnia dojrzewania i jest niezależne od rodzaju cementu. Rodzaj cementu wpływa natomiast na relacje ilościowe pomiędzy wytrzymałością betonów z mieszanek o różnych temperaturach.

Biorąc za poziom odniesienia temperaturę 20 °C, widać, że intensywność wpływu początkowej temperatury mieszanki na wytrzymałość jest uzależniona od rodzaju spoiwa i od czasu (rys. 74,75). Wytrzymałość na ściskanie betonu wykonanego z mieszanek z CEM I 42,5 R „Rejowiec” o temperaturze 10 i 30 °C w najmniejszym stopniu różni się od wytrzymałości betonu wykonanego z mieszanki o temperaturze 20 °C. Dodatki

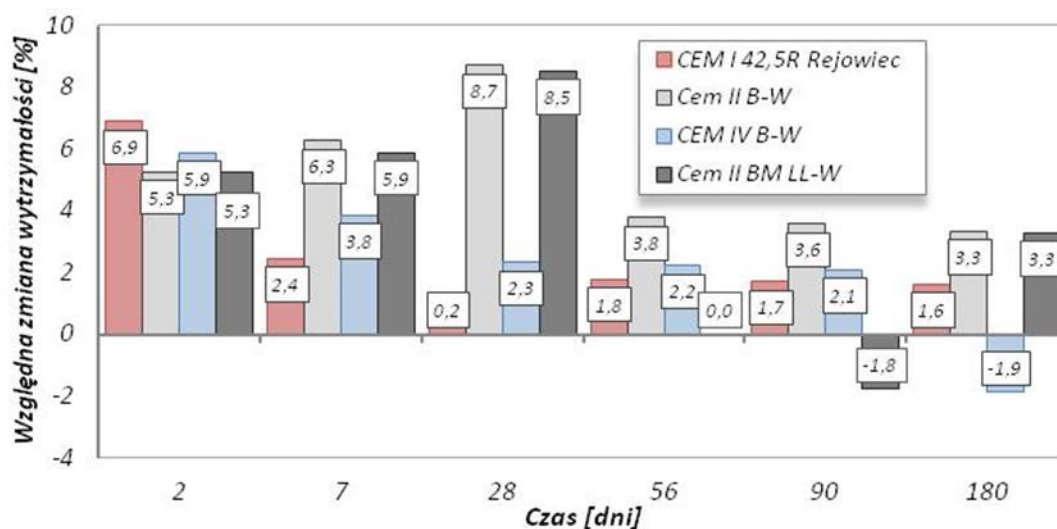
popiołów wapiennych i mielonego kamienia wapiennego wywołują większe różnice. Na uwagę zasługuje fakt, że wspomniane różnice ulegają dosyć wydatnemu zmniejszeniu w dalszej perspektywie czasowej. Przez co w dalszym okresie możliwe jest pojawienie się efektu „crossover”.



Rys. 73. Wpływ temperatury mieszanki betonowej na wytrzymałość na ściskanie betonów samozagęszczonych po 2, 7, 28, 56, 90 i 180 dniach dojrzewania.



Rys. 74. Zmiana wytrzymałości na ściskanie betonu z mieszanki o temperaturze 10°C względem wytrzymałości na ściskanie betonu z mieszanki o temperaturze 20°C.

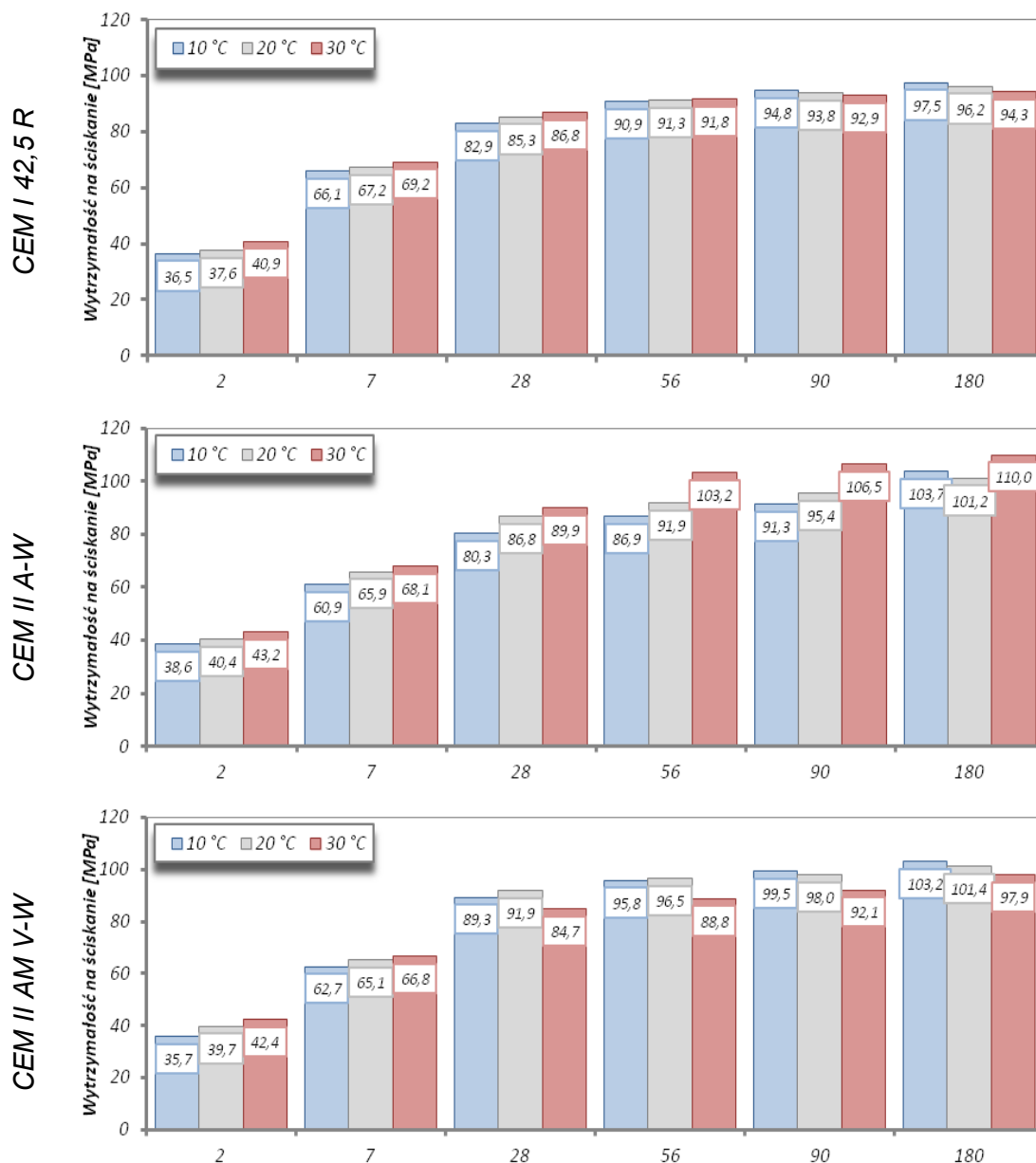


Rys. 75. Zmiana wytrzymałości na ściskanie betonu z mieszanki o temperaturze 30°C względem wytrzymałości na ściskanie betonu z mieszanki o temperaturze 20°C.

Wpływ temperatury mieszanek betonów wysokowartościowych na wytrzymałość uzyskanych z nich betonów, jest bardziej złożony niż w przypadku betonów zwykłych (rys.76). Do 28 dnia jest podobny, tzn. wytrzymałość rośnie wraz z temperaturą mieszanki betonowej, po tym czasie widoczne są różnice. Zapewne są one efektem odmiennych składów - niższe w/c, pył krzemionkowy, ale trudno wyrokować który czynnik jest istotniejszy.

W przypadku betonu z cementem portlandzkim i z cementem z dodatkiem popiołu krzemionkowego i wapiennego widoczny jest wyraźny „crossover effect”. Tego efektu nie ma w przypadku betonu samozagęszczalnego o normalnej wytrzymałości z cementem portlandzkim czy z cementem CEM II BM LL-W. Nie ma go również w przypadku betonu wysokowartościowego z cementem CEM II A-W w ciągu 90 dni dojrzewania, ale po dniu 180 się pojawia, ponieważ wytrzymałość betonu z mieszanki o temperaturze

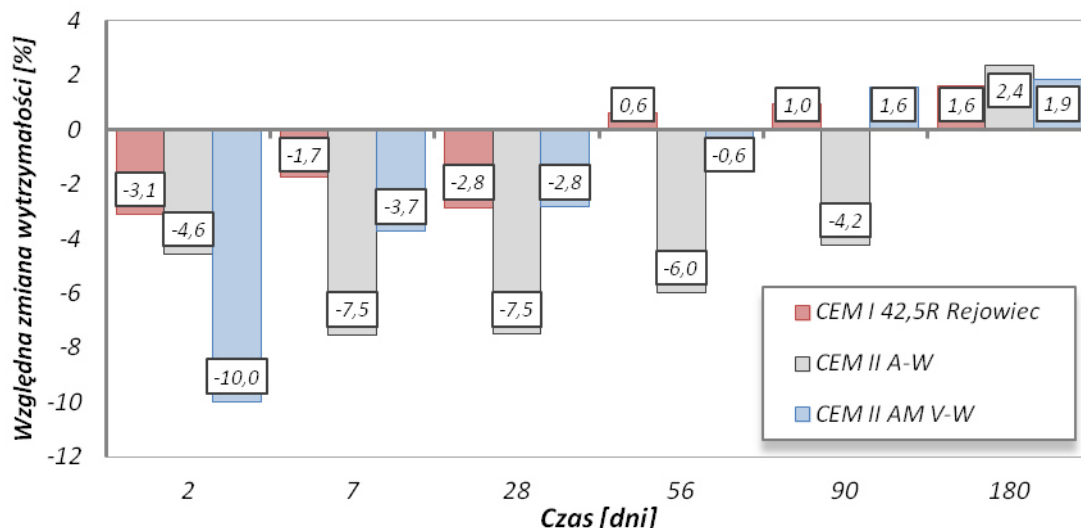
10°C jest większa od wytrzymałości betonu z mieszanki o temperaturze 20°C. Nie można wykluczyć jej dalszego wzrostu.



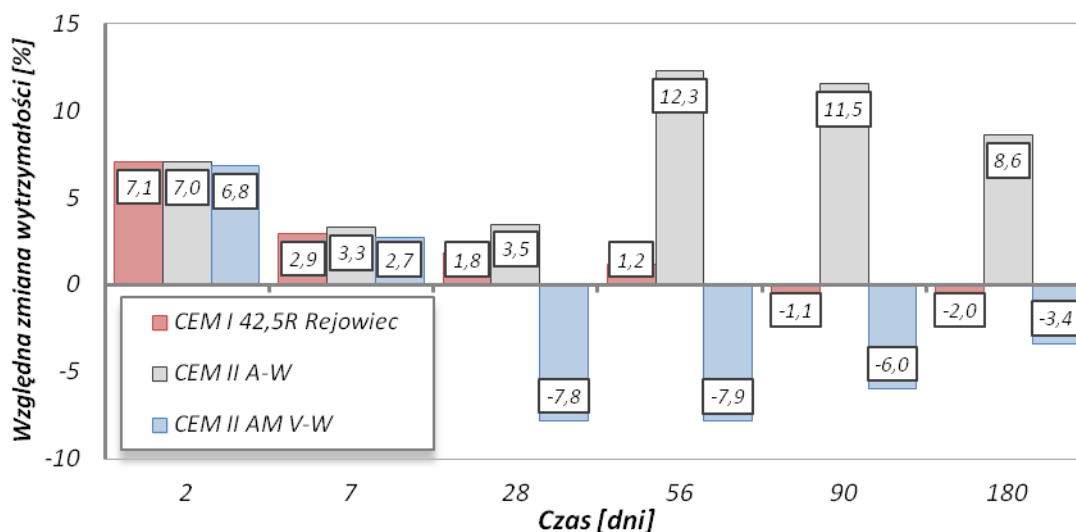
Rys. 76. Wpływ temperatury mieszanki betonowej na wytrzymałość na ściskanie betonów samo zagęszczonych wysokowartościowych po 2, 7, 28, 56, 90 i 180 dniach dojrzewania.

Dodatki mineralne w postaci 7,5% popiołu lotnego wapiennego i 7,5 % popiołu krzemionkowego (CEM II AM V-W) spowodowały 10% obniżenie wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach dojrzewania, ale różnica pomiędzy wytrzymałością próbek z mieszanek o temperaturze 10 i 20 °C, w wyraźny sposób się zmniejsza. Po 54 dniu dojrzewania uwidacznia się korzystny wpływ niższej temperatury mieszanki betonowej. Wzrost temperatury mieszanki betonowej z 20 na 30 °C w przypadku betonów, w których spoiwem był cement z popiołem lotnym wapiennym (CEM II A-W) jest korzystny w

całym rozpatrywanym okresie (2 - 180 dni dojrzewania). Popiół lotny wapienny i krzemionkowy (CEM II AM V-W) wraz ze wzrostem temperatury mieszanki betonowej powodują zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie po 28 dniu dojrzewania, które utrzymuje się do 180 dnia (rys. 76).



Rys. 77. Zmiana wytrzymałości na ściskanie betonu określona dla temperatury mieszanki 10°C względem wytrzymałości na ściskanie betonu dla temperatury mieszanki 20°C.



Rys. 78. Zmiana wytrzymałości na ściskanie betonu określona dla temperatury mieszanki 30 °C względem wytrzymałości na ściskanie betonu dla temperatury mieszanki 20 °C.

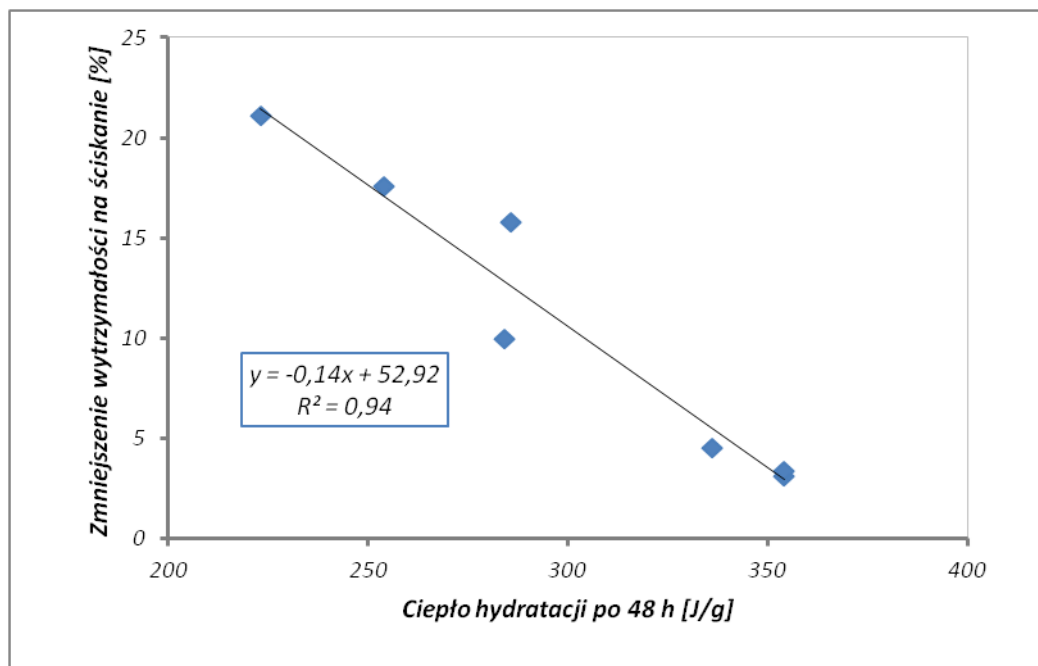
Temperatura, w której dojrzewa beton jest czynnikiem mocno wpływającym na wytrzymałość na ściskanie. Zmiana temperatury początkowej mieszanki również nie pozostaje bez wpływu na wytrzymałość na ściskanie. Wpływ ten można wyjaśnić na dwa sposoby. Zmiana temperatury wpływa na konsystencję mieszanki, powoduje to zmiany w stopniu zagęszczenia mieszanki, różna może być zawartość powietrza w zagęszczanej mieszance a to wpływa na wytrzymałość na ściskanie. Wpływu zmian w konsystencji w

przypadku technologii BSZ nie jesteśmy w stanie zmniejszyć poprzez zmianę parametrów procesu zagęszczania. Jediną siłą powodującą zagęszczanie jest obciążenie pochodzące od ciężaru własnego. Ten jest w nikłym stopniu zależny od temperatury. Temperatura jest czynnikiem wpływającym na przebieg reakcji wiązania cementu. Im wyższa to proces ten ulega przyspieszeniu, co oznacza większe wytrzymałości początkowe. W dalszej perspektywie czasowej jednak betony dojrzewające w niższych temperaturach często charakteryzują się wyższą wytrzymałością. Jest to związane z bardziej szczelną i jednorodną strukturą zaczynu cementowego dojrzewającego w niższych temperaturach.

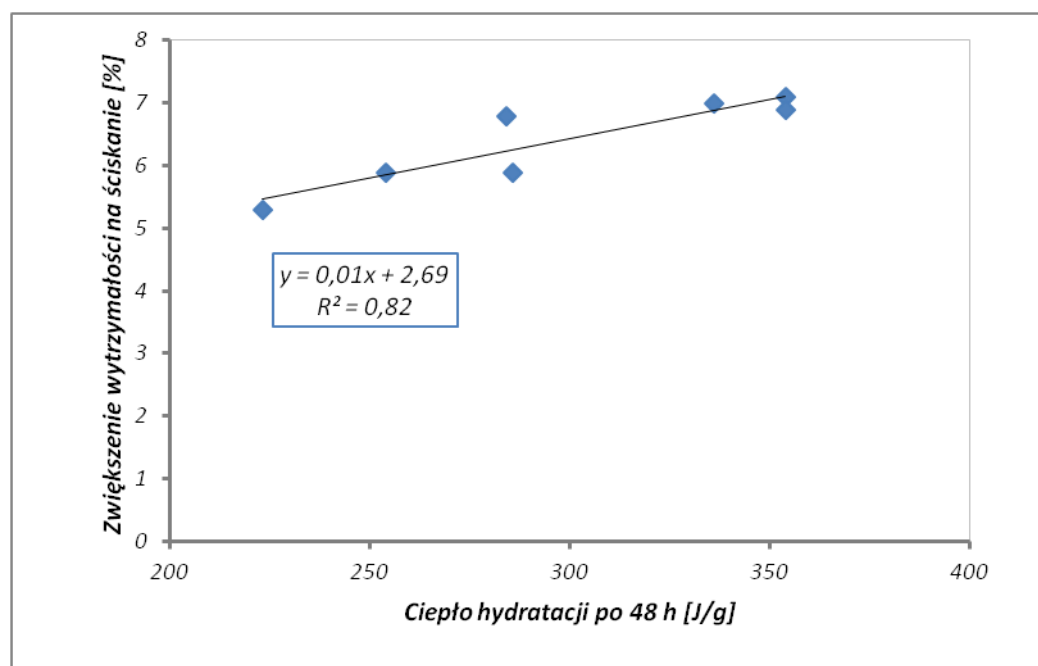
Przedstawione wyżej spostrzeżenia dotyczące wpływu temperatury mieszanki na wytrzymałość na ściskanie wykonanego z niej betonu sugerują zależność charakteru i istotności wpływu od rodzaju dodatków mineralnych. Brak badań dotyczących struktury stwardniałego zaczynu cementowego nie pozwala na wyciąganie wniosków wyjaśniających przyczyny odmiennego wpływu temperatury mieszanki na wytrzymałość na ściskanie. Nie mniej jednak, mechanizm oddziaływania temperatury wczesnej mieszanki betonowej na wytrzymałość wykonanego z niej betonu należy wiązać z procesami zachodzącymi w ciągu pierwszych kilkunastu godzin od momentu wykonania próbek. Dynamika procesów wiązania i twardnienia uzależniona jest od temperatury, która nie pozostaje bez wpływu na jakość produktów reakcji hydratacji, co widoczne jest w postaci zmian wytrzymałości. Pomimo tego, że obniżona lub podwyższona temperatura mieszanki była utrzymywana względnie krótko.

Zmniejszenie wytrzymałości na ściskanie betonów wywołane niższą temperaturą początkową mieszanki zależy od ciepła hydratacji cementu. Temperatura mieszanki betonowej równa 10 °C zmniejsza wytrzymałość betonu na ściskanie. Efekt ten jest tym mniejszy im ilość wydzielanego ciepła podczas reakcji hydratacji cementu jest większa. Przedstawia to rys. 79 przedstawiający relację względnego zmniejszenia wytrzymałości betonu z mieszanki o temperaturze 10 °C względem wytrzymałości betonu z mieszanki o temperaturze 20 °C i ciepła hydratacji cementów. Względna zmiana została określona dla wytrzymałości w 2 dniu dojrzewania, a ilość wydzielonego ciepła w 48 godzinie hydratacji. Ciepło hydratacji wyznaczone było w stałej temperaturze 20 °C, zmiana temperatury z 20 na 10 °C czy z 20 na 30 °C nie powinna zmienić uszeregowania cementów w zależności od ilości wydzielanego ciepła. Dlatego też znając wielkość ciepła hydratacji określonej w temperaturze 20°C, możemy prognozować, który beton będzie mniej podatny na zmniejszenie wytrzymałości wywołane niższą niż 20 °C temperaturą mieszanki betonowej.

Idąc dalej wyższa temperatura początkowa mieszanki (30 °C) i cement o większym ciepłe hydratacji sprawi, że zwiększenie wytrzymałości betonu będzie większe (rys.80). Liczba danych prezentowanych na wykresach (rys. 79 i 80) jest nie wielka, ale ogólna wiedza na temat reakcji hydratacji cementu potwierdza istnienie tego efektu.



Rys. 79. Relacja ciepła hydratacji cementu i zmniejszenia wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach wywołanego temperaturą początkową mieszanki 10 °C.



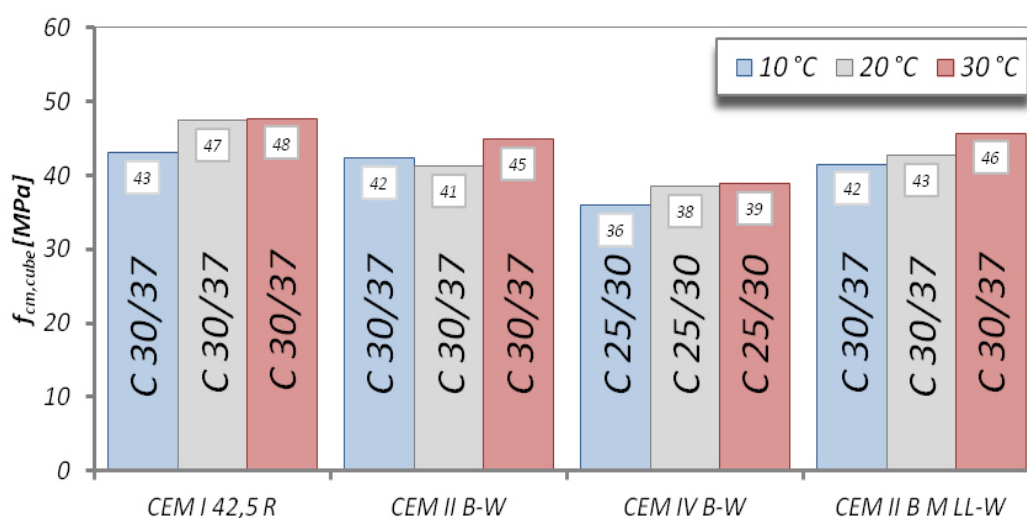
Rys. 80. Relacja ciepła hydratacji cementu i zwiększenia wytrzymałości na ściskanie po 2 dniach wywołanego temperaturą początkową mieszanki 30 °C

Wpływ ciepła hydratacji cementu na zmianę wytrzymałości betonu jest większy w zakresie temperatury 10-20°C. Wpływ ilości wydzielanego ciepła podczas hydratacji cementu na zmianę wytrzymałości 2 dniowej wywołaną wyższą temperaturą początkową mieszanki (30 °C) jest mniejszy.

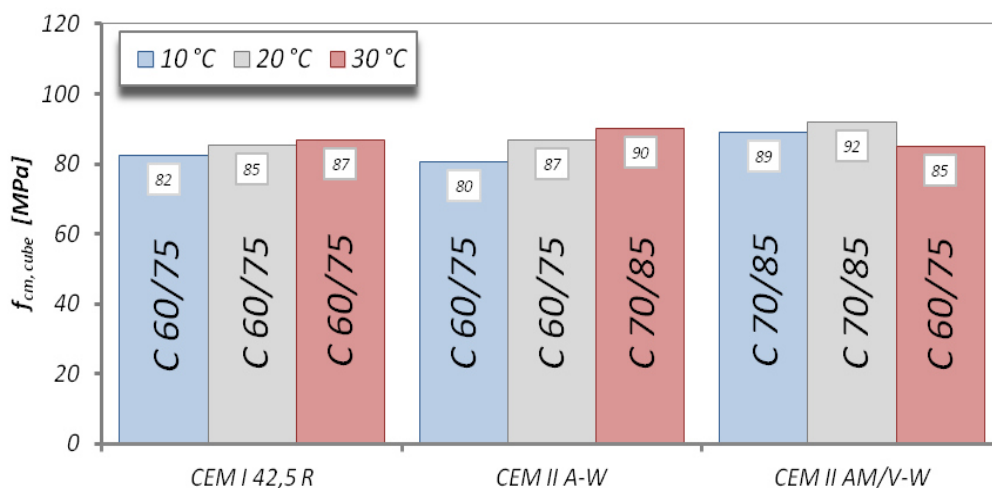
Przy zmniejszeniu temperatury początkowej mieszanki zmiana wytrzymałości na ściskanie wywołana rodzajem cementu zmienia się od ok. 4 % do ponad 20 %. Zmiana wytrzymałości na ściskanie spowodowana wzrostem temperatury mieszanki wynosi ok. 2 % w zależności o rodzaju cementu. Być może jest to spowodowane wpływem temperatury na urabialność, która ulega pogorszeniu. Pozytywny wpływ wyższej temperatury jaką osiągnąć jest w stanie wiążący beton w cieplejszych warunkach jest zmniejszany np. większą zawartością powietrza w betonie.

4.2.5 WPLYW TEMPERATURY POCZĄTKOWEJ MIESZANKI BETONOWEJ NA KLASĘ BETONU

W pracy określono wpływ temperatury początkowej mieszanki betonowej na rozwój wytrzymałości. Uzyskane wyniki wskazują na to, że temperatura początkowa mieszanki, wpływa na właściwości stwardniałego betonu. Wpływ ten jest widoczny pomimo tego, że relatywnie szybko mieszanki o różnych od normowej temperaturach tę temperaturę osiągały. Zmniejszenie bądź zwiększenie wytrzymałości 28 dniowej w przypadku betonów zwykłych nie jest tak duże, by wywołać konieczność odmiennej klasyfikacji betonu. Miało to natomiast miejsce w przypadku 2 betonów wysokowartościowych. Beton z mieszanki o temperaturze 30 °C z cementem CEM II A-W miał wyższą klasę niż betony z mieszanek o temperaturze 10 i 20 °C, ale już dla betonu z cementem CEM II AM V-W miała miejsce sytuacja odwrotna. To beton z mieszanki o temperaturze 30° C miał klasę najniższą. Należy zaznaczyć, że obserwowany wpływ temperatury początkowej mieszanki betonowej choć nie wielki, może zostać wzmocniony przez na przykład błędy technologiczne. To może prowadzić do większych różnic w wytrzymałości na ściskanie i tym samym w klasie wytrzymałości. Z uwagi na to, że klasa betonu jest główną determinantą jego jakości, wpływ temperatury początkowej mieszanki nie powinien być bagatelizowany.



Rys. 81. Wpływ temperatury początkowej mieszanki na klasę wytrzymałościową samozagęszczonych betonów zwykłych



Rys. 82. Wpływ temperatury początkowej mieszanki na klasę wytrzymałościową samozagęszczonych betonów wysokowartościowych

4.2.6 PODSUMOWANIE

Wpływ temperatury na właściwości mieszanek betonu samozagęszczalnego, nabiera szczególnego znaczenia. Każda zmiana w wielkości granicy płynięcia czy lepkości plastycznej wpływa na zdolność do samozagęszczania, która jest trudna lub wręcz nie możliwa do zmiany w warunkach budowy. Uzyskane wyniki świadczą, o tym, że przypadku mieszanek betonu samozagęszczalnego trudno wpływ temperatury na urabialność mieszanek uogólnić.

W tym bloku badań stosowany był superplastyfikator jednego rodzaju, wszelkie zmiany wpływu temperatury na urabialność są spowodowane zmianą rodzaju dodatku mineralnego. Dodatek mineralny i jego interakcje z cementem będą odpowiedzialne za zmianę wielkości pól adsorpcji dla domieszki upłynniającej. Stosowana była domieszka trzeciej generacji, której główny mechanizm działania opiera się na wprowadzeniu zawady sterycznej. By była ona rozwinięta domieszka musi ulec adsorpcji na powierzchniach ziaren cementu i wczesnych produktach hydratacji.

Generalnie można zauważyć w przypadku mieszanek betonu samozagęszczalnego zwykłego to, że średnice rozplywu po przygotowaniu mieszanki wzrastają wraz ze wzrostem temperatury, po 60 minucie trend ten ulega odwróceniu. Mieszanka z cementem CEM IV B-W jest tutaj odstępstwem tzn. po wymieszaniu jej rozplyw jest największy w temperaturze 10°C by maleć w temperaturach 20 i 30°C.

Granica płynięcia g mieszanek jest początkowo maleje wraz ze wzrostem temperatury, z upływem czasu następuje efekt odwrotny. Ponieważ w temperaturze 10°C mieszanki mają najniższą wielkość granicy płynięcia g. Jeżeli ilość popiołu wapiennego jako dodatku do cementu będzie ograniczona do 30 %, to nie wzmocni on oddziaływania temperatury właściwości reologiczne. Zastąpienie części popiołu wapiennego innym dodatkiem mineralnym w stosunku masowym 1:1, jest korzystne. Mielony kamień wapienny wydaje się tutaj szczególnie korzystnym dodatkiem. Mieszanka z CEM II BM

(LL-W), który ma w składzie 15 % mączki wapiennej i 15 % popiołu lotnego wapiennego ma szczególnie stabilne właściwości reologiczne w zakresie temperatur 10-30°C. Podobnymi właściwościami charakteryzuje się również mieszanka z cementem CEM II BM (S-W), który ma w składzie 15 % żużla wielkopieczowego i 15 % popiołu lotnego wapiennego. W kontekście problemów z zapewnieniem odpowiedniej ilości żużla w naszym kraju, to cement z mączką i popiołem wapiennym wydaje się szczególnie wartościowym rozwiązaniem. Po pierwsze pozwala uzyskać mieszankę betonu samozagęszczalnego, której konsystencja nie jest wrażliwa na zmianę temperatury przez co najmniej 1 godzinę. Po wtóre, pozwala zagospodarować popiół lotny wapienny, którego w kraju są znaczne ilości i wykorzystuje tanią dostępną mączkę wapienną. Zastosowanie mączki wapiennej pozwala również na zredukowanie śladu węglowego towarzyszącego produkcji cementu, a w konsekwencji betonu.

W przypadku mieszanek betonu samozagęszczalnego wysokowartościowego z dodatkiem mikrokrzemionki możemy zaobserwować to, że wpływ temperatury na ich konsystencję odmienny niż w mieszankach bez mikrokrzemionki. Średnice rozplywu maleją wraz ze wzrostem temperatury i upływ czasu tego nie zmienia, tylko wzmacnia. Na siłę tego efektu możemy wpływać poprzez rodzaj dodatku mineralnego stosowanego w cemencie. Tutaj również korzystnymi właściwościami charakteryzuje się cement z dodatkiem popiołu lotnego wapiennego. Mieszanka z takim cementem jest mniej podatna na wzrost granicy płynięcia g i lepkości plastycznej h wywołany wzrostem temperatury i upływem czasu.

Temperatura początkowa mieszanki betonu samozagęszczalnego wpływa na wytrzymałość na ściskanie. Wczesne wytrzymałości na ściskanie są z reguły niższe dla mieszanek o temperaturze 10°C i rosną wraz ze wzrostem temperatury. W późniejszych okresach dojrzewania różnice wytrzymałości betonów wykonanych z mieszanek o temperaturach 10, 20 i 30°C ulegają zmniejszeniu. Możemy również zaobserwować zjawisko crossover effect, który jest wyraźniejszy w przypadku betonów samozagęszczonych wysokowartościowych.

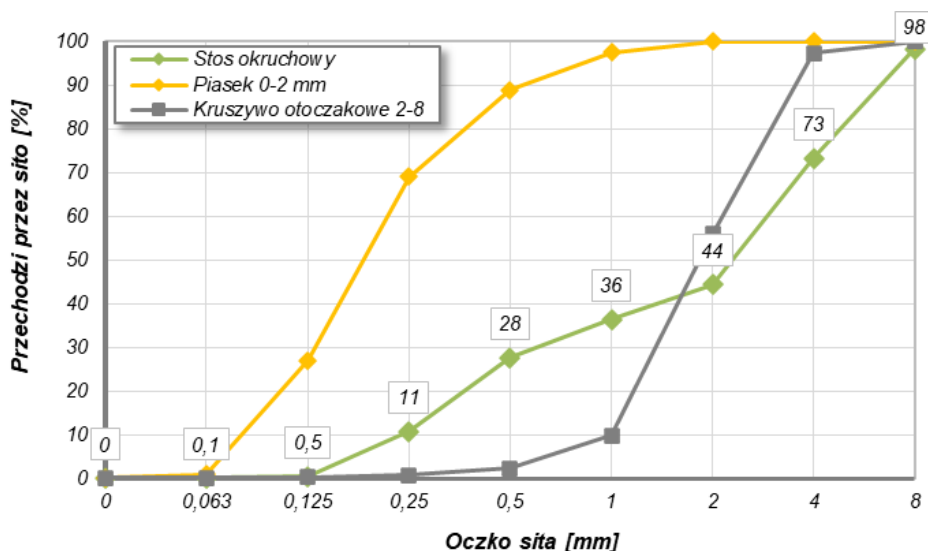
Wpływ temperatury początkowej mieszanki na wytrzymałość wykonanej z niej betonu nie jest na tyle duży by wymuszał konieczność odmiennej klasyfikacji betonu pod względem wytrzymałości na ściskanie. Należy mieć na uwadze, że może ulec wzmocnieniu przez inne czynniki a wtedy taka konieczność może zaistnieć.

4.3 WPŁYW TEMPERATURY NA URABIALNOŚĆ BETONÓW ZAGĘSZCZANYCH WIBRACYJNIE – BLOK II

Rozdział zawiera wyniki badań wpływu temperatury na urabialność mieszanek betonowych bez domieszek, z plastyfikatorem i superplastyfikatorem. W badaniach nie było zmieniane uziarnienie stosu okruszowego kruszywa, zmieniany był rodzaj cementu. Zasadniczym celem badań jest usystematyzowanie wiedzy na temat wpływu temperatury na urabialność betonów zwykłych i wykazanie ewentualnych różnic w stosunku do betonów samozagęszczalnych.

4.3.1 SKŁADY I WŁAŚCIWOŚCI SKŁADNIKÓW MIESZANEK

Mieszanki wykonano na takich samych kruszywach jak w bloku I. Zmieniono relację piasku do kruszywa otoczkowego, biorąc pod uwagę specyfikę składu mieszanek zagęszczanych wibracyjnie. Krzywa uziarnienia kruszyw przedstawiona jest na rys. 1. Jest to stos okruszowy o uziarnieniu ciągłym, o punkcie piaskowym równym 44 %.



Rys. 83 Krzywa przesiewu mieszanek betonowych badanych w bloku II

Mieszanki wykonano z użyciem takich samych cementów jak w bloku I. Były to cement portlandzki CEM I 42,5R, cementy z dodatkiem popiołów lotnych wapiennych, popiołów lotnych krzemionkowych, granulowanego żużla wielkopieczowego i mielonego kamienia wapiennego. Skład i właściwości spoiw przedstawiają tablice 15,16,17 w paragrafie 4.2.1. Mieszanki były wykonane ze stałą ilością spoiwa równą 350 kg/m³. Zmienny był stosunek w/c mieszanek, dla mieszanek bez i z plastyfikatorem był równy 0,6. Stosunek w/c mieszanek z superplastyfikatorem i z superplastyfikatorem oraz domieszką napowietrzającą był mniejszy i wynosił 0,45. Według normy PN-EN 206 mieszanki o w/c =0,6 można stosować w klasach ekspozycji X0, XC1, 2 i 3. Spektrum możliwego zastosowania mieszanek o w/c=0,45 jest znacznie szersze i przy spełnieniu odpowiednich wymagań dotyczących kruszywa i cementów pozwala stosować mieszanki praktycznie w każdym środowisku, za wyjątkiem środowiska, w którym występuje agresja chemiczna

w najsilniejszym natężeniu. Oczywiście jest to wstępne szacowanie, które powinno być zweryfikowane doświadczalnie. Tablica 23 przedstawia składy mieszanek.

Tablica 23. Skład mieszanek betonowych

Składnik / właściwość	Mieszanki bez domieszki	Mieszanki z plastyfikatorem Chryso V70	Mieszanki z Superplastyfikatorem FM 30
Cement, kg	350	350	350
Piasek 0-2, kg	688	687	728
Żwir 2-8, kg	1063	1061	1125
Plastyfikator Chryso V70, kg	-	3,5	-
Superplastyfikator FM 30, kg	-	-	10,5
W/C	0,6	0,6	0,45
Objętość zaczynu cementowego, dm ³	339	340	301

4.3.2 WYNIKI BADAŃ WPŁYWU TEMPERATURY NA KONSYSTENCJĘ MIESZANEK I JEJ ZMIANĘ W CZASIE

W tablicach 24-29 zestawiono wyniki badań konsystencji mieszanek betonów zwykłych bez domieszek, z plastyfikatorem i superplastyfikatorem. Wzrost temperatury powoduje zmniejszenie średnicy rozplywu mieszanek. Zmiany w niektórych przypadkach są duże i wymuszają konieczność odmiennej klasyfikacji mieszanki pod względem klasy konsystencji. Tak duże zmiany w konsystencji mieszanek, wpływają na ich urabialność. Jeżeli ta utrata urabialności nie będzie skompensowana przez odpowiednie zagęszczanie, może prowadzić do większej zawartości powietrza. Wtedy wytrzymałość na ściskanie ulegnie obniżeniu. Mieszanki dla których zmiana temperatury prowadzi do polepszenia urabialności, mogą ulec segregacji w wyniku niewłaściwego zagęszczenia. To może prowadzić do defektów struktury betonu lub jego powierzchni, a to może zmniejszać jego trwałość.

Tablica 24. Średnice rozplywu mieszanek betonowych bez domieszek i odpowiadająca im klasa konsystencji według PN-EN 12350-5

Cement	Czas [min]	10 °C		20 °C		30 °C	
		R [cm]	Klasa	R [cm]	Klasa	R [cm]	Klasa
CEM I 42,5 R	5	48,0	F3	43,0	F3	39,0	F2
	60	44,0	F3	39,0	F2	33,0	F1
CEM II A-W	5	45,5	F3	41,0	F2	38,0	F2
	60	40,0	F2	37,5	F2	33,5	F1
CEM II B-W	5	43,5	F3	36,0	F2	33,0	F1
	60	38,0	F2	34,0	F1	30,0	F1
CEM IV B-W	5	40,0	F2	35,0	F2	29,0	F1
	60	36,0	F2	32,0	F1	27,0	F1
CEM II B (LL-W)	5	55,0	F4	45,0	F3	39,5	F2
	60	51,5	F4	39,0	F2	33,0	F1
CEM II B (S-W)	5	47,5	F3	39,5	F2	34,0	F1
	60	42,0	F3	33,5	F1	30,0	F1
CEM II B (V-W)	5	47,0	F3	39,5	F2	34,0	F1
	60	47,0	F3	33,5	F1	30,0	F1

Tablica 25. Właściwości reologiczne mieszanek betonowych bez domieszki

Cement	Czas [min]	10 °C		20 °C		30 °C	
		g [Nmm]	h [Nmms]	g [Nmm]	h [Nmms]	g [Nmm]	h [Nmms]
CEM I 42,5 R	5	959	2011	1356	2306	1399	4211
	60	1450	2458	1750	3749	3470	5685
CEM II A-W	5	823	2458	1019	4166	1555	3638
	60	898	2293	1275	5165	4045	8312
CEM II B-W	5	1268	2663	1840	5338	2774	9985
	60	1830	2748	2651	9234	4492	11523
CEM IV B-W	5	2062	3120	7463	7288	5937	14045
	60	2414	3521	9577	9577	8862	17193
CEM II B (LL-W)	5	317	1207	700	3413	1422	4956
	60	587	865	1337	6252	3456	11082
CEM II B (S-W)	5	592	3461	982	7402	2040	9440
	60	851	5176	2004	10131	2721	14975
CEM II B (V-W)	5	1125	5000	1525	6471	3587	9583
	60	1457	1472	2504	13074	4839	16874

Tablica 26. Średnice rozplywu mieszanek betonowych z plastyfikatorem Chryso V70 i odpowiadająca im klasa konsystencji według PN-EN 12350-5

Cement	Czas [min]	10 °C		20 °C		30 °C	
		R [cm]	Klasa	R [cm]	Klasa	R [cm]	Klasa
CEM I 42,5 R	5	56,0	F5	52,0	F4	41,0	F2
	60	49,0	F4	46,0	F3	38,5	F2
CEM II A-W	5	57,0	F5	52,0	F4	47,0	F3
	60	51,0	F4	45,0	F3	44,0	F3
CEM II B-W	5	59,0	F5	55,0	F4	51,0	F4
	60	53,0	F4	46,0	F3	45,0	F3
CEM IV B-W	5	54,0	F4	47,0	F3	43,0	F3
	60	48,0	F3	45,0	F3	39,0	F2
CEM II B (LL-W)	5	57,0	F5	56,0	F5	54,0	F4
	60	53,0	F4	52,0	F4	48,0	F3
CEM II B (S-W)	5	55,0	F4	52,0	F4	55,0	F4
	60	51,5	F4	46,0	F3	45,0	F3
CEM II B (V-W)	5	58,0	F5	58,0	F5	51,0	F4
	60	53	F4	53	F4	49	F4

Tablica 27. Właściwości reologiczne mieszanek betonowych z plastyfikatorem Chryso V70

Cement	Czas [min]	10 °C		20 °C		30 °C	
		g [Nmm]	h [Nmms]	g [Nmm]	h [Nmms]	g [Nmm]	h [Nmms]
CEM I 42,5 R	5	410	449	476	507	947	372
	60	432	416	1027	449	1160	492
CEM II A-W	5	284	345	478	345	566	392
	60	481	450	562	450	814	500
CEM II B-W	5	248	225	378	225	390	356
	60	287	293	562	293	858	419
CEM IV B-W	5	307	306	589	306	715	360
	60	416	402	613	402	1174	591
CEM II B (LL-W)	5	344	377	404	280	298	291
	60	585	389	528	288	612	354
CEM II B (S-W)	5	382	450	547	403	422	318
	60	636	461	859	459	778	445
CEM II B (V-W)	5	264	284	381	365	424	406
	60	288	334	463	377	510	459

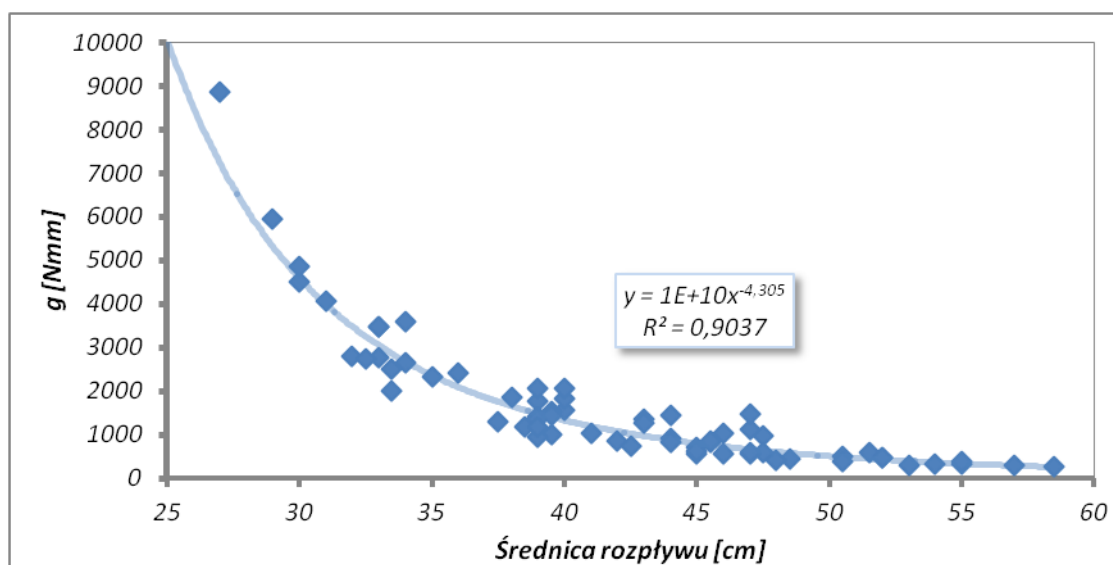
Tablica 28. Średnice rozptywu mieszanek betonowych z superplastyfikatorem FM 30 i odpowiadająca im klasa konsystencji według PN-EN 12350-5

Cement	Czas [min]	10 °C		20 °C		30 °C	
		R [cm]	Klasa	R [cm]	Klasa	R [cm]	Klasa
CEM I 42,5 R	5	59,0	F5	53,5	F4	51,0	F4
	60	52,0	F4	53,0	F4	50,0	F4
CEM II A-W	5	56,5	F5	55,5	F4	45,0	F3
	60	46,0	F4	46,0	F3	35,5	F2
CEM II B-W	5	56,5	F5	52,5	F4	41,0	F2
	60	40,0	F2	38,5	F2	34,5	F2
CEM IV B-W	5	45,0	F3	43,0	F3	30,0	F1
	60	38,0	F2	33,0	F1	28,0	F1
CEM II B (LL-W)	5	56	F5	47	F3	35	F2
	60	42	F3	39	F2	31	F1
CEM II B (S-W)	5	64	F6	55	F4	51	F4
	60	60	F5	52	F4	44	F3
CEM II B (V-W)	5	56	F5	54	F4	53	F4
	60	49	F5	46	F3	41	F2

Tablica 29. Właściwości reologiczne mieszanek betonowych z superplastyfikatorem FM 30

Cement	Czas [min]	10 °C		20 °C		30 °C	
		g [Nmm]	h [Nmms]	g [Nmm]	h [Nmms]	g [Nmm]	h [Nmms]
CEM I 42,5 R	5	379	536	401	621	471	545
	60	444	734	591	708	606	789
CEM II A-W	5	333	609	389	646	1085	881
	60	939	978	840	898	2252	1290
CEM II B-W	5	543	1068	718	897	1071	881
	60	1311	862	1578	1552	3118	1069
CEM IV B-W	5	1325	1481	1453	1994	1939	2645
	60	2720	862	2621	2105	4640	4225
CEM II B (LL-W)	5	378	531	573	697	1985	854
	60	1081	904	874	1245	3221	1047
CEM II B (S-W)	5	170	237	307	323	382	338
	60	181	304	386	414	644	487
CEM II B (V-W)	5	378	625	401	752	441	534
	60	643	851	1054	1279	688	673

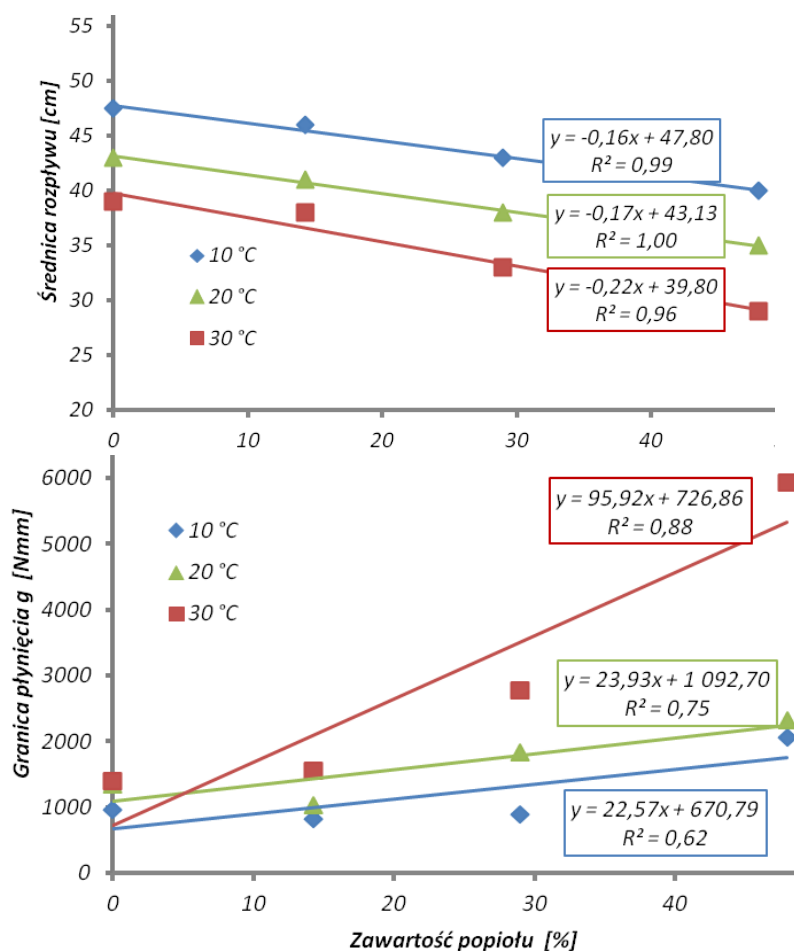
Korelacja średnicy rozpląwu i granicy płynięcia g jest zwykle wysoka i tak też jest w tym przypadku (rys.84). Wzrost granicy płynięcia skutkuje zmniejszeniem się średnicy rozpląwu.



Rys. 84. Zależność granicy płynięcia mieszanek od ich średnicy rozpląwu, określonej według PN-EN 12350-5

Punkty przedstawione na wykresie to wyniki badań zestawione w tablicach 19-24. Z tego, że dla mieszanek o średnicy rozpląwu mniejszej niż 35 cm obserwujemy bardzo wyraźny wzrost granic płynięcia, wynika ważny wniosek. Mianowicie ocena wpływu zmiennych czynników technologicznych (takich jak np.: czas, temperatura, rodzaj i ilość domieszki, rodzaj cementu) na podstawie jednopunktowego testu technicznego może być obarczona dużym błędem. Dlatego też każda z normatywnych metod badania konsystencji ma swój zakres stosowania. Dla badania konsystencji metodą stolika wstrząsowego jest to przedział od 34 do 60 cm średnicy rozpląwu mieszanki. Dla mieszanek o średnicy

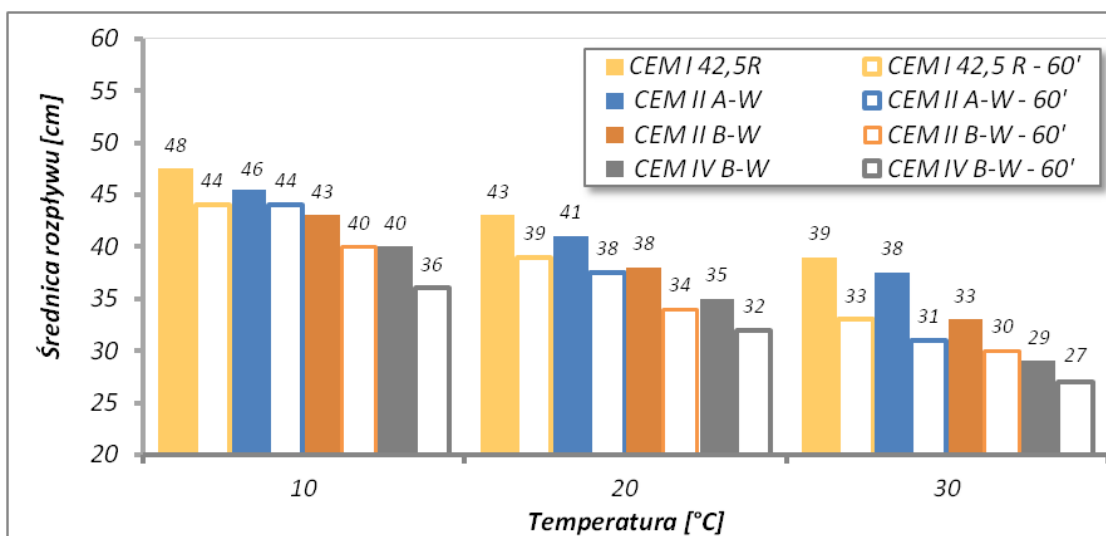
rozpływu poniżej 34 cm, niewielkie zmniejszenie średnicy rozpływu powoduje wyraźne zwiększenie granicy płynięcia. Dla lepszego zobrazowania, rozpatrzmy wpływ temperatury na średnicę rozpływu mieszanek w kontekście zwiększającej się ilości popiołu. Na wykresie (rys.86) ilustrującym wpływ popiołu na średnicę rozpływu, jest widoczny nie wielki tylko efekt wzmocnienia negatywnego działania popiołu przez wzrost temperatury mieszanek. Współczynniki kierunkowe prostych aproksymujących punkty, o współrzędnych odpowiadającym ilości popiołu i średnicom rozpływu, nie różnią się znacząco. Dopiero porównanie zmian granicy płynięcia daje prawdziwy obraz wpływu temperatury. Współczynnik kierunkowy prostej aproksymującej punkty pomiarowe właściwe dla mieszanek o temperaturze 30 °C jest blisko 4 krotnie większy niż ten dla prostych aproksymujących zmiany granic płynięcia w temperaturach 10 i 20°C. Stawianie wniosków na temat wpływu temperatury na urabialność mieszanek betonowych na podstawie testów technicznych, może prowadzić do błędnej oceny intensywności wpływu temperatury. Na ich podstawie można na pewno dokonywać oceny jakościowej tego wpływu. Ocena ilościowa również się wydaje możliwa, ale pod pewnymi warunkami. Zmiany konsystencji wywołane temperaturą muszą mieścić się w granicach czułości metody badania konsystencji. Gdy tak nie jest, najwłaściwsza jest ocena na podstawie dwupunktowego testu reometrycznego lub też zastosowanie innej metody badania konsystencji.



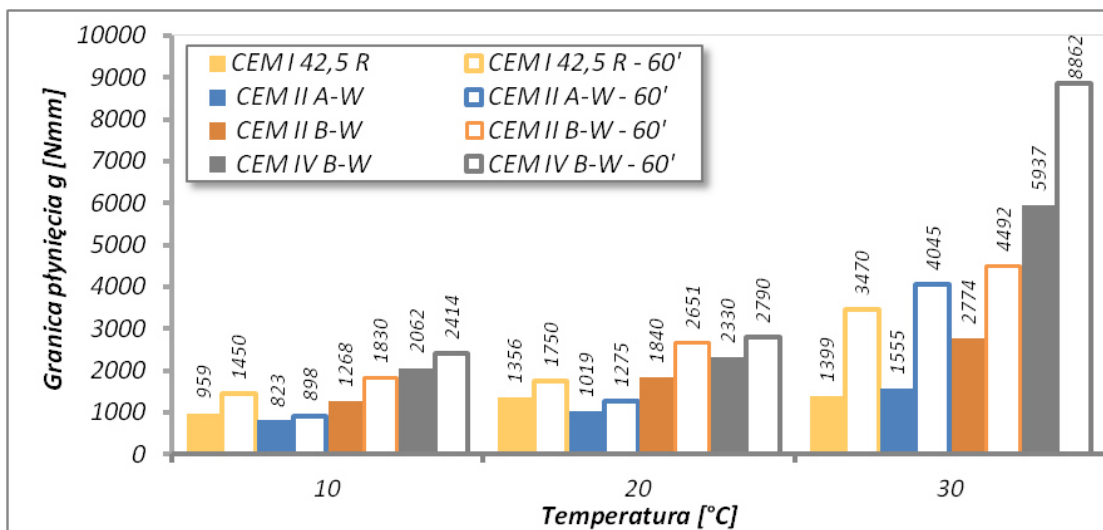
Rys. 85. Wpływ temperatury i popiołu lotnego wapiennego na granicę płynięcia i średnicę rozpływu.

4.3.3 WPLYW TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK BETONOWYCH Z CEMENTAMI Z POPIOŁEM WAPIENNYM

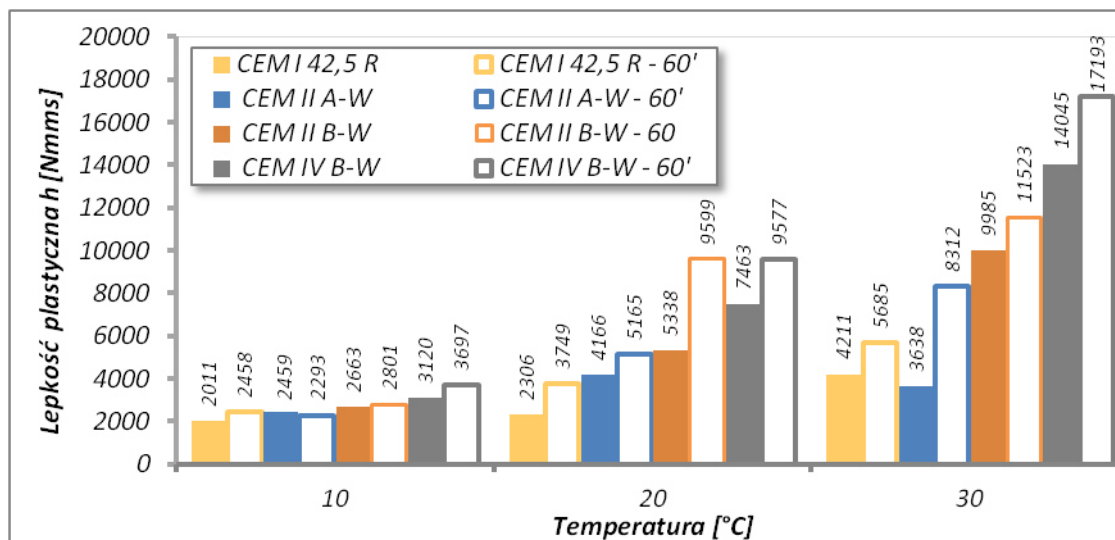
Rysunki 86-88 przedstawiają wykresy, na których zobrazowano wpływ temperatury na średnicę rozplwy, granicę płynięcia i lepkość plastyczną mieszanek. Temperatura mieszanek zmienia właściwości reologiczne mieszanek, granica płynięcia wzrasta, podobnie jak lepkość. Wzrost tych parametrów skutkuje zmniejszeniem się średnic rozplwy mieszanek. Popiół lotny wapienny zawarty w cementach również pogarsza urabialność mieszanek. Wraz ze wzrostem jego ilości zmniejszeniu ulega średnica rozplwy tym samym granica płynięcia i lepkość plastyczna się zwiększa.



Rys. 86. Wpływ temperatury na średnicę rozplwy mieszanek betonowych bez domieszek, po 5 minucie i 60 minucie od rozpoczęcia mieszania.



Rys. 87. Wpływ temperatury na granicę płynięcia mieszanek betonowych bez domieszek, po 5 minucie i 60 minucie od rozpoczęcia mieszania.



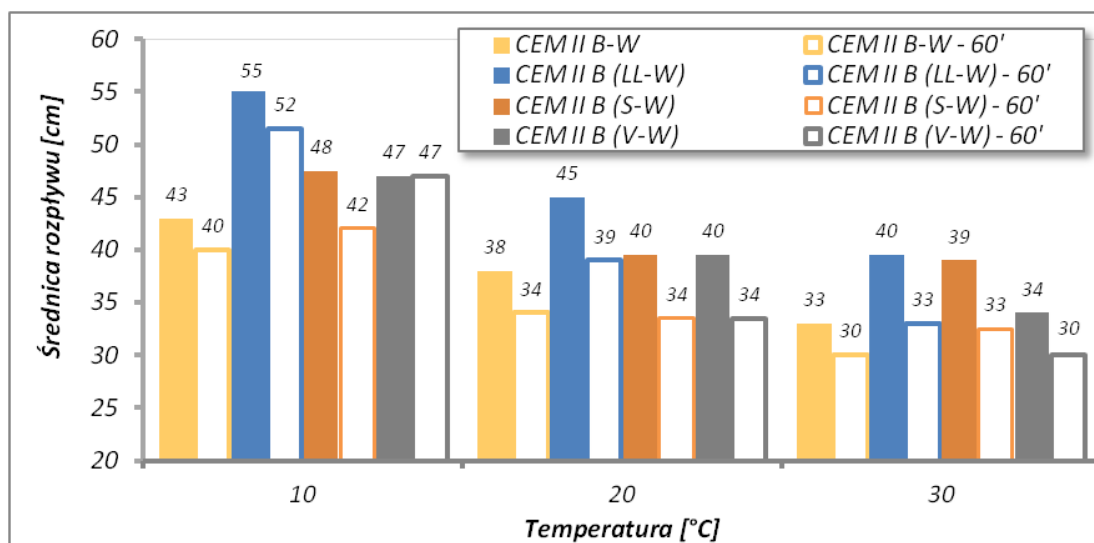
Rys. 88. Wpływ temperatury na lepkość plastyczną mieszanek betonowych bez domieszek, po 5 minucie i 60 minucie od rozpoczęcia mieszania.

Wpływ temperatury jest tym silniejszy im większa jest ilość popiołu w cemencie, jest to szczególnie widoczne jeśli weźmiemy pod uwagę granicę płynięcia (rys. 87).

Efekt pogorszenia urabialności wywołany popiołem lotnym wapiennym jest ogólnie znany a jego źródła są rozpoznane. Głównym powodem jest obecność niespalonego węgla i kształt ziaren popiołu. Wpływa to na adsorpcję wody, jeżeli są stosowane domieszki to pojawia się konieczność stosowania ich w większej ilości, gdyż i one są absorbowane.

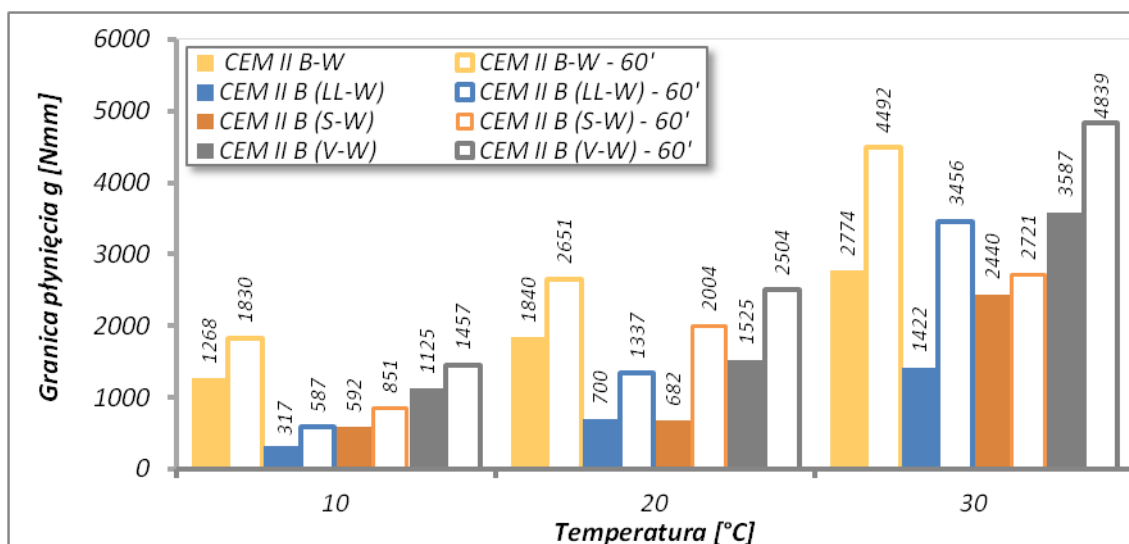
4.3.4 WPLYW TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK BETONOWYCH Z CEMENTAMI Z DODATKAMI MINERALNYMI

Wpływ dodatków w postaci mielonego żużla wielkopieczowego, mielonego kamienia wapiennego i popiołu krzemionkowego został określony dla cementów CEM II. Zastąpiono w nich część popiołu lotnego wapiennego wybranym dodatkiem w stosunku masowym 1:1. Cementem odniesienia jest tutaj CEM II B-W, czyli cement z dodatkiem samego popiołu wapiennego. Rysunki 89-91 przedstawiają wpływ temperatury na konsystencję mieszanek betonowych, granicę płynięcia i lepkość plastyczną. W postaci tabelarycznej wyniki zestawiono w tablicach 24,25 w paragrafie 4.3.2.

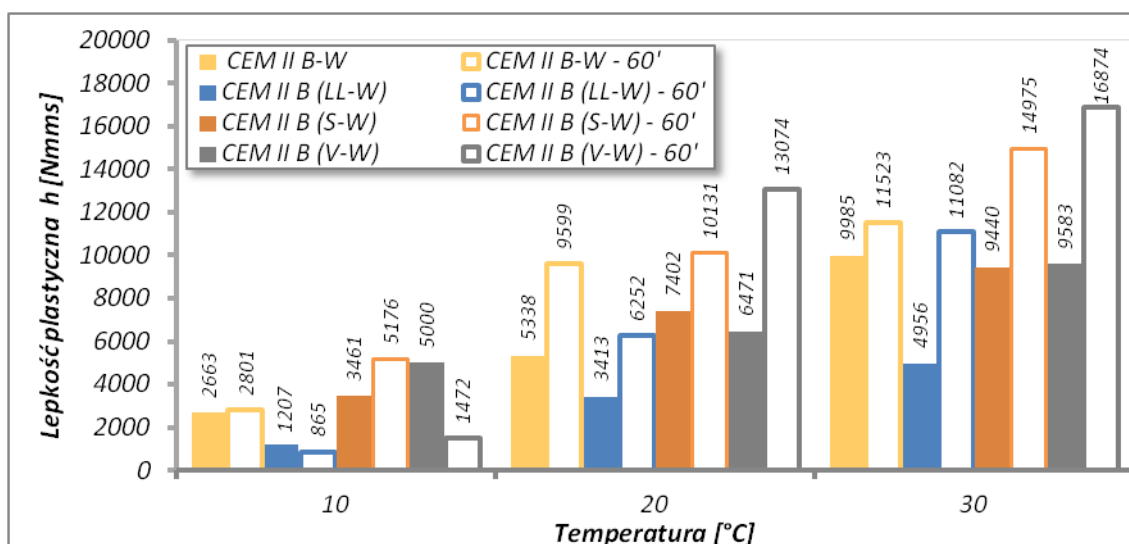


Rys. 89. Wpływ temperatury na średnicę rozplywu mieszanek betonowych z cementami z dodatkami (CEM II), po 5 minucie i 60 minucie od rozpoczęcia mieszania.

Zastąpienie części popiołu lotnego wapiennego innym dodatkiem, jest korzystne. Bezpośrednio po wymieszaniu, średnica rozplywu tych mieszanek jest zawsze większa niż mieszanki z samym popiołem wapiennym. Jest tak we wszystkich temperaturach. Po 60 minutach ten trend się utrzymuje dla wszystkich mieszanek w temperaturze 10 °C, w temperaturze 20 °C jest zachowany w przypadku mieszanek z popiołem wapiennym i mielonym kamieniem wapiennym. W temperaturze 30 °C z punktu widzenia konsystencji badanej metodą stolika rozplywu, wszystkie mieszanki można uznać za mieszanki o konsystencji F1, czyli takie o średnicy rozplywu mniejszej niż 34 cm. Porównując jednak granicę płynięcia, po raz kolejny widać niemiernodajność pomiaru konsystencji testem jednopunktowym. Z pozoru te same mieszanki charakteryzują się wyraźnie różnymi granicami płynięcia i lepkościami.



Rys. 90. Wpływ temperatury na granicę płynięcia mieszanek betonowych z cementami z dodatkami (CEM II), po 5 minucie i 60 minucie od rozpoczęcia mieszania.



Rys. 91. Wpływ temperatury na lepkość plastyczną mieszanek betonowych z cementami z dodatkami (CEM II), po 5 minucie i 60 minucie od rozpoczęcia mieszania.

Granica płynięcia i lepkość plastyczna wzrasta wraz ze wzrostem temperatury. Dokonując gradacji wpływu dodatków mineralnych na kształtowanie odporności urabialności na zmianę temperatury widać, że najkorzystniejszy jest mielony kamień wapienny, następnie żużel wielkopiecowy. Popiół lotny krzemionkowy należy uznać jako dodatek, który sprawia, że zmiany urabialności wywołane zmianami temperatury są najbardziej wyraźne.

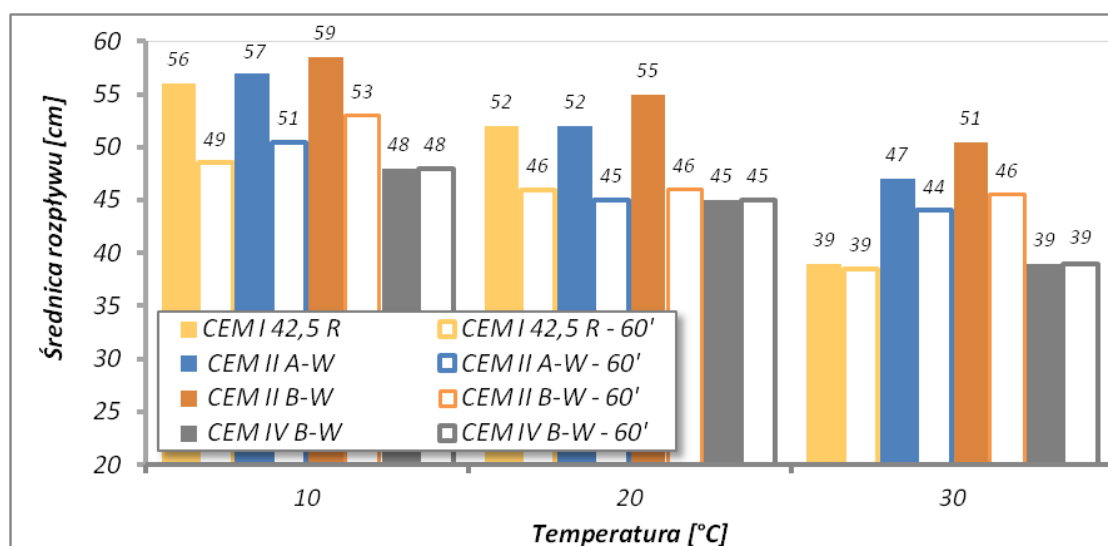
4.3.5 WPŁYW DOMIESZEK CHEMICZNYCH NA KSZTAŁTOWANIE ODPORNOŚCI NA ZMIANĘ TEMPERATURY MIESZANEK ZAGĘSZCZANYCH MECHANICZNE

Wpływ temperatury na konsystencję mieszanek z domieszką plastyfikującą Chryso V70 jest podobny jak w przypadku mieszanek betonowych bez domieszek. Wzrost

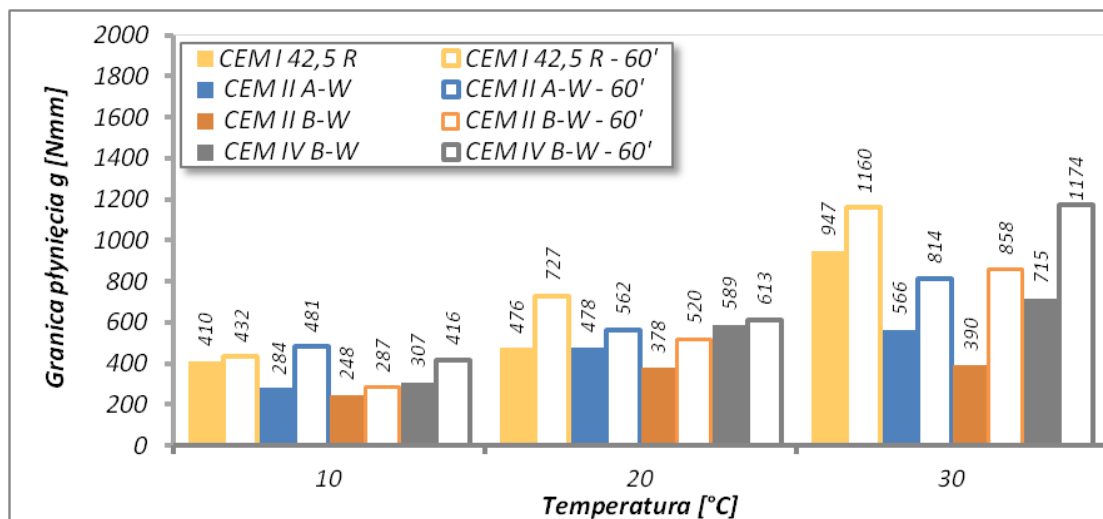
temperatury powoduje zmniejszenie średnic rozptyłu, wzrost granicy płynięcia i lepkości (rys.56-58).

Odmienny jest jednak wpływ popiołu wapiennego na urabialność mieszanek, którego charakter należy wiązać niewątpliwie z wpływem temperatury i domieszki. Dla mieszanek z cementami o zawartości popiołu 15-30% widoczne jest zwiększenie średnic rozptyłu w porównaniu do mieszanki z cementem portlandzkim. Efekt ten jest widoczny we wszystkich temperaturach, ale w temperaturze 30°C jest najwyraźniejszy. Wyraźne zwiększenie średnic rozptyłu, które ma również odzwierciedlenie w redukcji granicy płynięcia obserwowane dla mieszanek o temperaturze 30° C może mieć związek z procesami sorpcji domieszki i wody przez niespalony węgiel, a ściślej z ograniczeniem procesów sorpcji w wyniku podwyższonej temperatury. Składniki mieszanek o wyjściowej temperaturze 30 °C były ogrzewane. Ziarna kruszywa, cementu a w nim ziarna popiołu w wyniku działania podwyższonej temperatury ulegały powiększeniu. Powiększały się również pory w ziarnach niespalonego węgla, który ma strukturę „koksiku” jest więc dobrym absorberem. Zdolność sorpcji przez kapilary jest zależna od ich średnicy, która ulega zwiększeniu, w wyniku rozszerzalności termicznej ziaren.

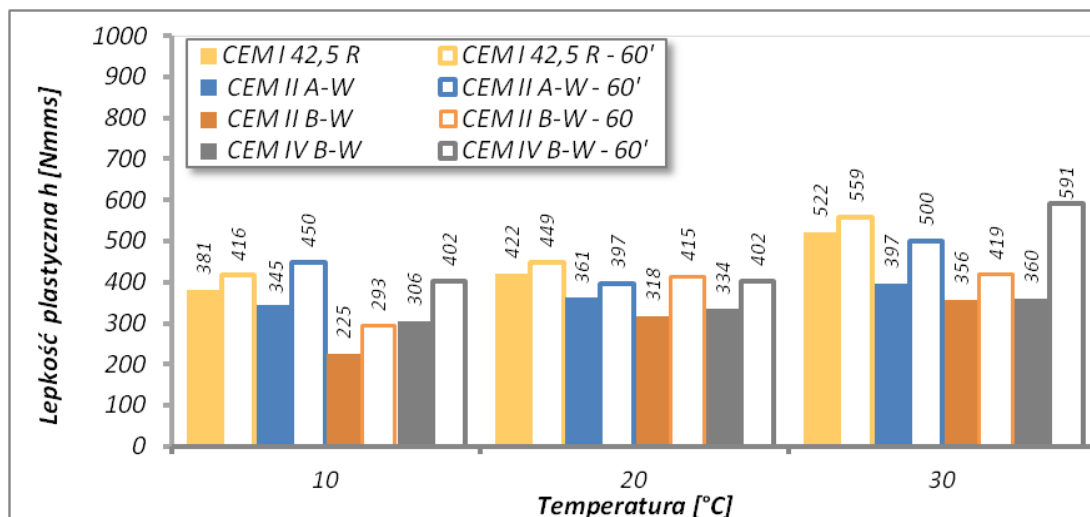
Zmniejsza się tym samym ciśnienie kapilarne odpowiedzialne za sorpcję, która ulega zmniejszeniu. W rezultacie jest dostępna większa ilość wody i domieszki co skutkuje większymi średnicami rozptyłu mieszanek. Gdy ilość popiołu jest zwiększona do 48 %, średnica rozptyłu się zmniejsza, być może ilość domieszki jest zbyt mała w stosunku do ilości popiołu wapiennego. Większą rolę odgrywają efekty związane z absorpcją domieszki przez popiół. Należy jednak podkreślić, że średnice rozptyłu mieszanek z CEM IV B-W, są zbliżone do średnic mieszanek z cementem portlandzkim. Zdolność do utrzymywania konsystencji jest zdecydowanie lepsza niż mieszanek bez domieszki. Zmniejszenie średnic równe jest maksymalnie 5 cm.



Rys. 92. Wpływ temperatury na średnicę rozptyłu mieszanek betonowych z plastyfikatorem V70, po 5 i 60 minutach od rozpoczęcia mieszania – cementy z popiołem lotnym wapiennym

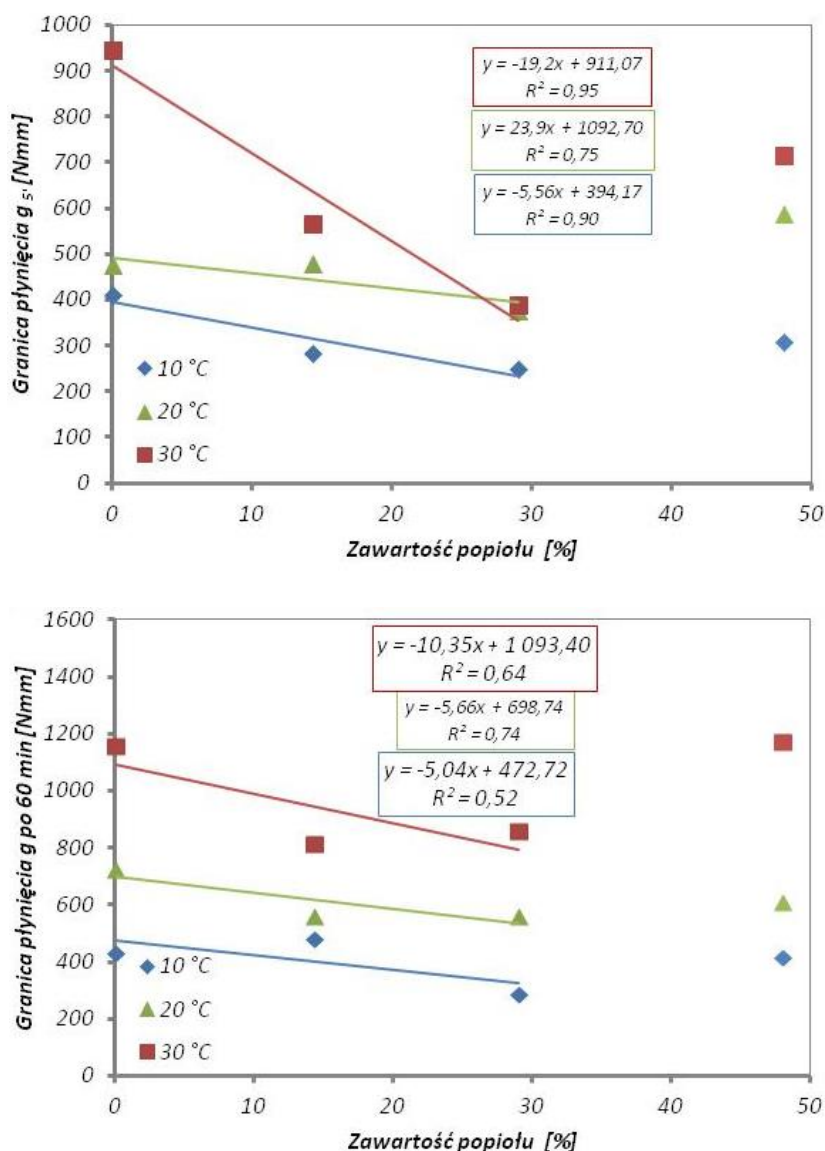


Rys. 93. Wpływ temperatury na granicę płynięcia mieszanek betonowych z plastyfikatorem V70, po 5 minucie i 60 minucie od rozpoczęcia mieszania.



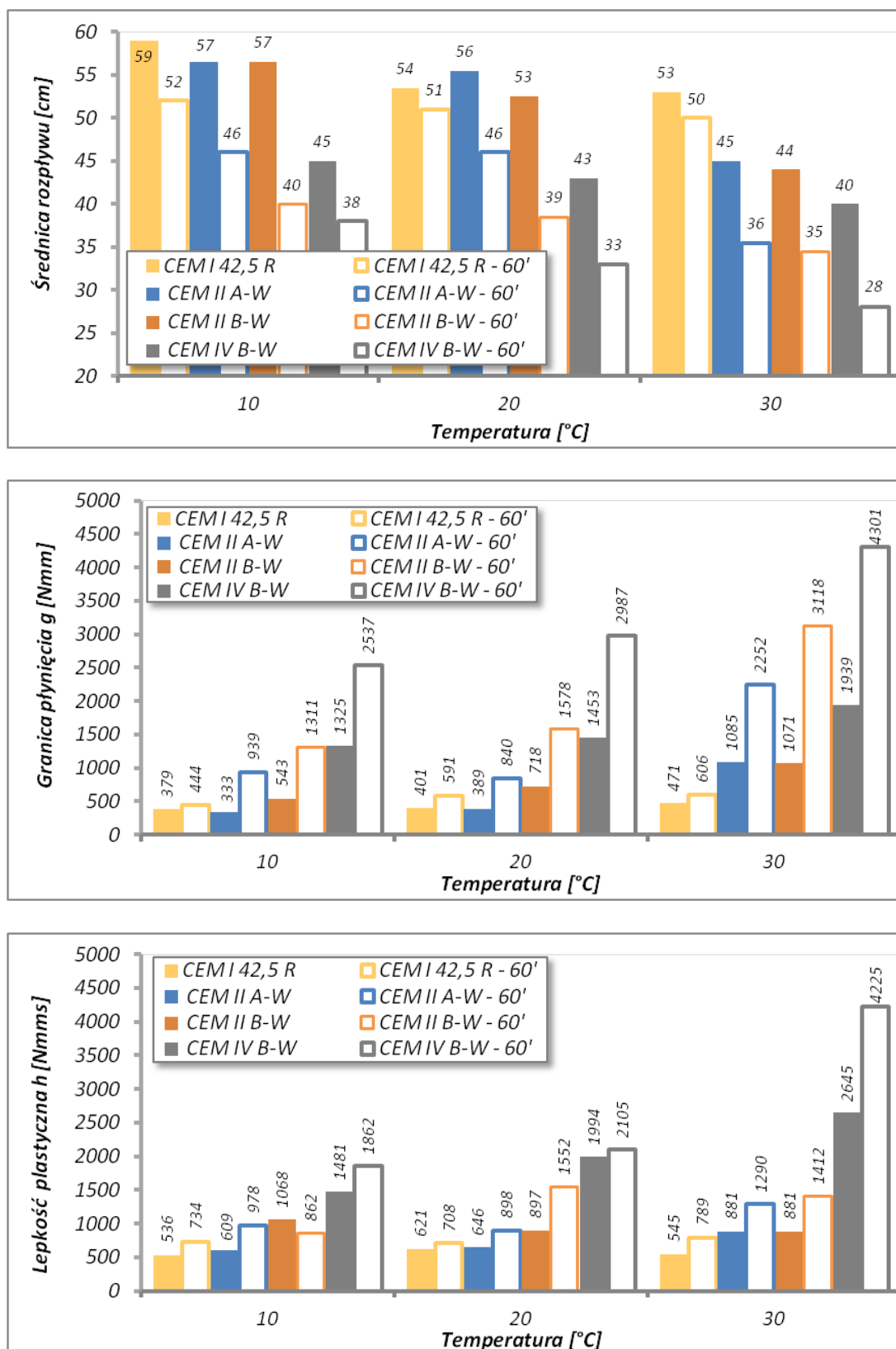
Rys. 94. Wpływ temperatury na lepkość plastyczną mieszanek betonowych z plastyfikatorem, po 5 minucie i 60 minucie od rozpoczęcia mieszania.

Porównując zmianę granicy płynięcia w relacji do ilości popiołu wapiennego w cemencie widać, że im więcej popiołu lotnego wapiennego w cemencie to wpływ temperatury jest mocniejszy – świadczą o tym nachylenia prostych aproksymujących (rys.95). Ale trzeba zaznaczyć, że w tym wypadku jest to pozytywny efekt, ponieważ zmniejsza się granica płynięcia. Zmniejsza się tym bardziej im wyższa temperatura i im więcej popiołu w cemencie. Ten korzystny efekt działania temperatury, popiołu wapiennego i plastyfikatora V70 zachodzi wtedy, gdy ograniczymy ilość popiołu lotnego wapiennego w cemencie do 30% masy klinkieru portlandzkiego. Po 1 godzinie nachylenie prostych aproksymujących jest zbliżone, czyli wpływ temperatury na urabialność zanika.



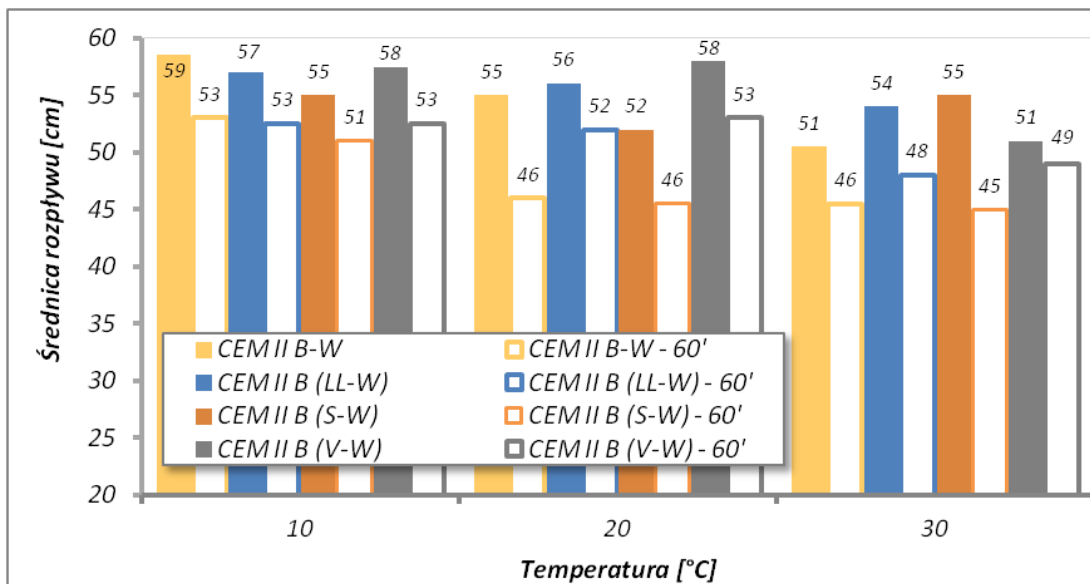
Rys. 95. Wpływ zawartości popiołu lotnego wapiennego granicę płynięcia g w 5 i 60 minucie, określony w temperaturze 10,20 i 30 °C.

Modyfikacja właściwości reologicznych mieszanek przez zastosowanie superplastyfikatora FM 30 pozwala w przypadku mieszanki z cementem portlandzkim zmniejszyć wpływ temperatury. Mieszanki te przez 60 minut utrzymują konsystencję klasy F5 – F4 w przedziale temperatur 10-30 °C (rys.96). W przypadku dodatku popiołu lotnego wapiennego o podobnym stopniu odporności na działanie temperatur możemy mówić tylko w przypadku mieszanek z cementami o ilości popiołu 15-30 % i to bezpośrednio po wymieszaniu, w zakresie temperatur 10 - 20°C. Po 1 godzinie w zakresie temperatur 10-30°C następuje wyraźne zmniejszenie średnic rozplywu mieszanek. Jest tym większe im więcej jest popiołu lotnego wapiennego i im wyższa temperatura. Wpływ temperatury na granice płynięcia jest wyraźniejszy niż na lepkość plastyczną (rys. 96). Rosnąca temperatura powoduje wzrost granicy, tym większy im więcej popiołu wapiennego w składzie cementu.

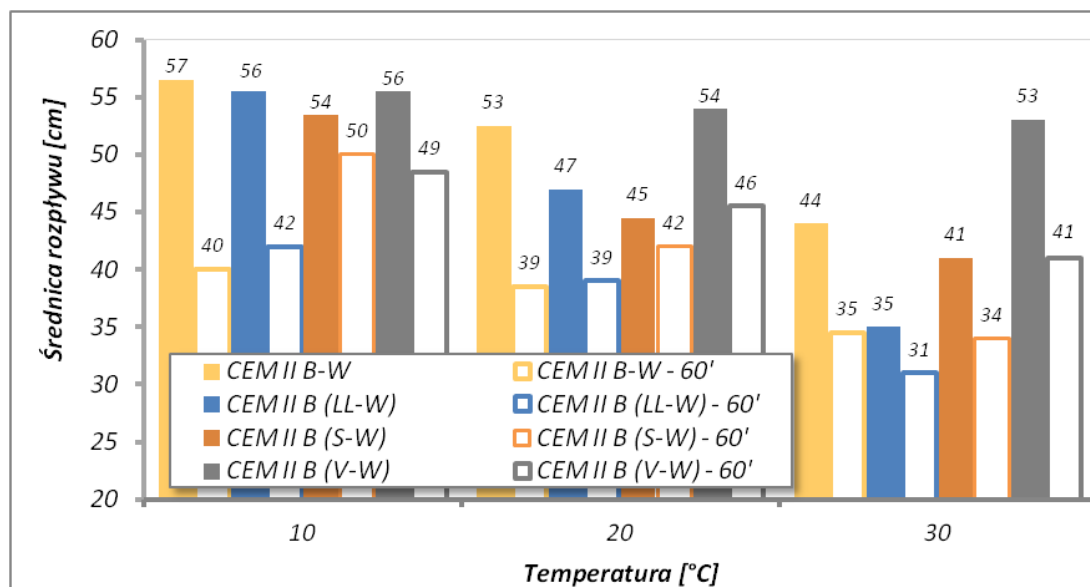


Rys. 96. Wpływ temperatury na średnicę rozptywu i właściwości reologiczne mieszanek z superplastyfikatorem FM 30, po 5 i 60 minutach od rozpoczęcia mieszania.

Dodatki mineralne w postaci mielonego kamienia wapiennego (LL) granulowanego żużla wielkopieczowego (S) i popiołu krzemionkowego (V) stosowane jako zastąpienie części popiołu lotnego wapiennego pozwalają zmniejszyć wpływ temperatury na konsystencję mieszanek z plastyfikatorem V 70. Widoczny jest negatywny wpływ temperatury na konsystencję, szczególnie po 1 godzinie. Należy zaznaczyć, że zmiany konsystencji są niewielkie, skutkujące zmianą klasy konsystencji w najgorszym razie z klasy F5 na klasę F3.



Rys. 97. Wpływ temperatury na średnicę rozplywu mieszanek betonowych z plastyfikatorem V70, po 5 i 60 minutach od rozpoczęcia mieszania – cementy z popiołem lotnym wapiennym i innymi dodatkami mineralnymi.



Rys. 98. Wpływ temperatury na średnicę rozplywu mieszanek betonowych z superplastyfikatorem FM 30, po 5 i 60 minutach od rozpoczęcia mieszania – cementy z popiołem lotnym wapiennym i innymi dodatkami mineralnymi.

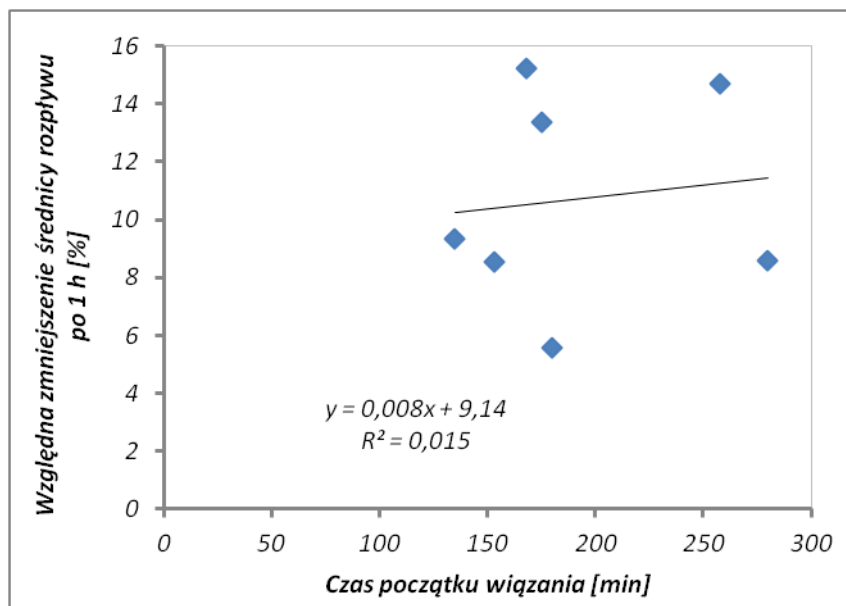
Wpływ temperatury na konsystencje mieszanek z cementami z popiołem lotnym wapiennym i innymi dodatkami jest bardzo wyraźny. W jednym przypadku możemy mówić o niewrażliwości mieszanki na zmianę temperatury. Jest to mieszanka z cementem z popiołem lotnym wapiennym i krzemionkowym CEM II B (V-W). Odporność ta utrzymuje się również po 1 godzinie, ponieważ średnice rozpląwu po 1 godzinie pozwalają zakwalifikować mieszankę do klasy konsystencji F 4 w przedziale temperatur 10-30°C. Efekt działania czasu i temperatury w przypadku mieszanek z pozostałymi cementami jest silniejszy. Zastąpienie części popiołu lotnego wapiennego mączką wapienną bądź żużlem wielkopieczowym nie daje możliwości zmniejszenia wpływu temperatury na konsystencję w relacji do mieszanki z cementem z samym popiołem wapiennym.

4.3.6 WŁAŚCIWOŚCI CEMENTU A RETENCJA URABIALNOŚCI W ZMIENNYCH TEMPERATURACH

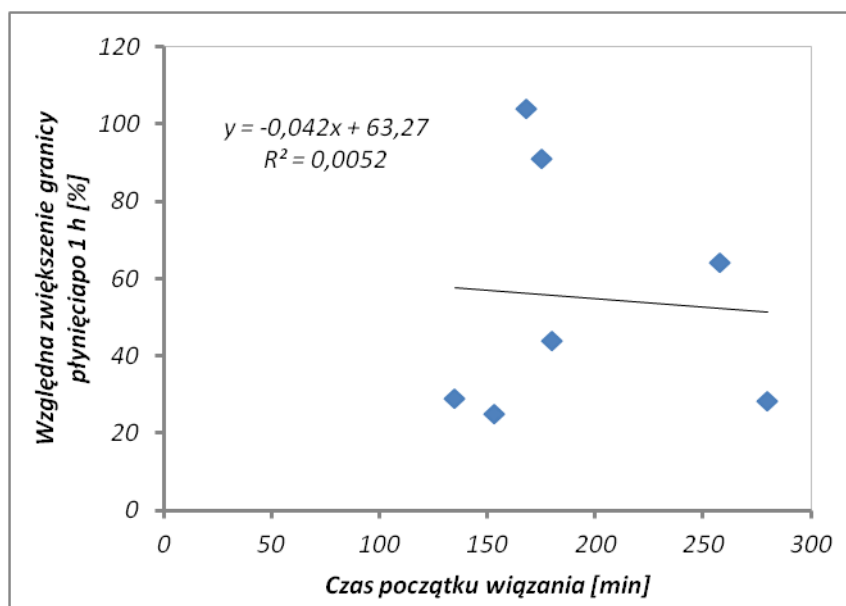
Projektując skład mieszanki betonowej, jednym z pierwszych wyborów jest wybór rodzaju cementu. Rodzi się pytanie czy podstawowe właściwości cementu – czas początku wiązania, powierzchnia właściwa i wodożądność są w stanie pomóc w wyborze cementu zapewniającego największą retencję urabialności.

Czas wiązania cementów jest właściwością, którą stosunkowo łatwo się określa, co więcej jest ogólnie dostępną np. na stronach internetowych producentów cementu.

Uzyskane wyniki badań, nie pozwalają twierdzić, że mieszanka z cementem, który wiąże szybciej będzie szybciej traciła urabialność. Początek wiązania spoiwa określony według PN EN 196-1, nie pozwala w żaden sposób rozstrzygać o podatności na utratę urabialności mieszanek betonowych. Widoczne jest to na rysunkach 99, 100 i 101, które przedstawiają czas początku wiązania cementów i względne zmniejszenie średnicy rozpląwu mieszanki po 1 h oraz względne zwiększenie granicy płynięcia mieszanek również po upływie 1 godziny. Widoczny jest brak zależności oraz to, że cementy które zaczynają później wiązać wcale nie gwarantują dłuższego utrzymywania urabialności mieszanek betonowych. Jeżeli takiego związku nie stwierdzono w przypadku zaczynów cementowych i mieszanek betonowych bez domieszek, to jest mało prawdopodobne by taki związek istniał w przypadku mieszanek i zaczynów modyfikowanych domieszkami. Zmian urabialności mieszanek, które są wywołane temperaturą nie można wiązać tylko i wyłącznie z niewątpliwym wpływem temperatury na czas wiązania. Porównując względną utratę urabialności mieszanek w ciągu godziny z czasem początku wiązania określonym w temperaturze 20 °C, nie możemy powiedzieć, że mieszanki z cementów o późniejszym początku wiązania charakteryzują się lepszą retencją urabialności.



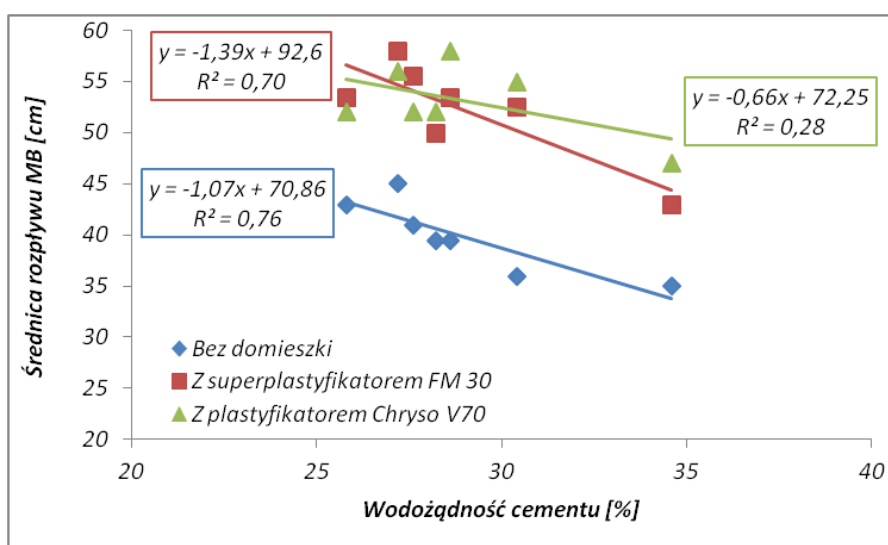
Rys. 99. Relacja względnego zmniejszenia średnicy rozplywu mieszanki betonowej po 1h z czasami początku wiązania spoiw określonych wg. PN EN 196-1.



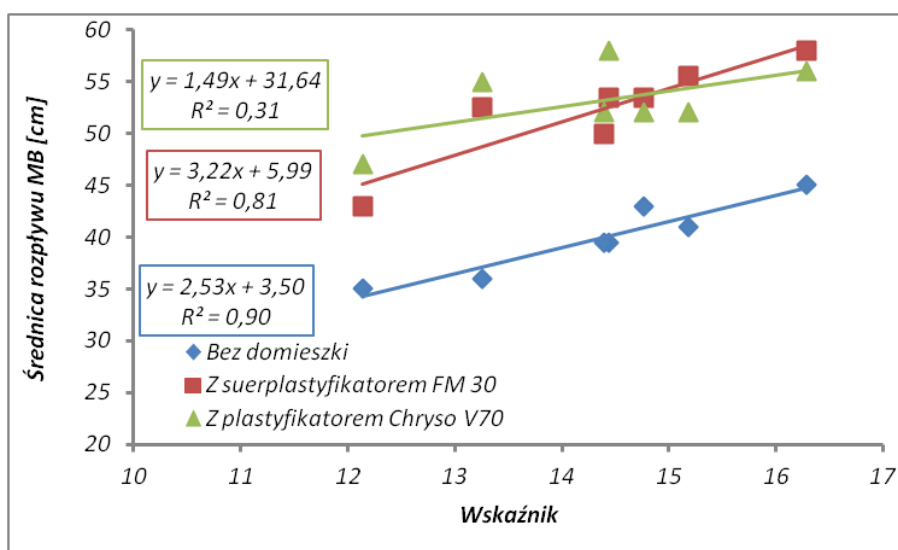
Rys. 100. Relacja względnego zwiększenia granicy płynięcia mieszanek betonowych po 1h z czasami początku wiązania spoiw określonych wg. PN EN 196-1.

Samo badanie czasu wiązania cementu wykonane według PN EN 196-1 jeśli wykonane nawet w wyższej temperaturze to i tak jest wykonywane w kąpeli wodnej i nie odda warunków w jakich jest mieszanka betonowa, która podczas transportu w betonowozie w wyniku parowania może utracić znaczną ilość wody. W wyższych temperaturach odgrywa rolę retencja wody przez mieszankę, czyli zdolność jej wiązania w mieszance tak by nie ulegała ona odparowaniu.

Średnice rozplywu mieszanek bez domieszek określone w temperaturach 10, 20 i 30 °C wykazują dobrą zgodność z wodożądnością cementów – im więcej potrzeba wody do uzyskania konsystencji zaczynu normowego tym mniejszą średnicą rozplywu charakteryzuje się mieszanka betonowa. Z chwilą modyfikowania właściwości mieszanek domieszkami – plastyfikatorami czy superplastyfikatorami współczynnik korelacji się zmniejsza. Jest to zrozumiałe, ponieważ wodożądności cementów określone są dla zaczynów cementowych niemodyfikowanych domieszkami. Zapewne relacja wodożądności cementów i średnic rozplywu mieszanek betonowych była by w tym przypadku również satysfakcjonująca, gdyby wodożądność byłaby określona w obecności domieszek. Dobry współczynnik korelacji istnieje dla wskaźnika będącego stosunkiem wodożądności cementu do jego powierzchni właściwej i średnic rozplywu mieszanek betonowych (rys.102).



Rys. 101 Korelacja wodożądności cementu z rozplywem mieszanek betonowych



Rys. 102. Korelacja wskaźnika (wodożądność/pow. wł. cementu) z rozplywem mieszanek betonowych

4.3.7 PODSUMOWANIE

Niewrażliwość, czy odporność urabialności mieszanek betonów zagęszczanych mechanicznie na działanie zmiennej temperatury może być kształtowana przez czynniki technologiczne. Charakter możliwości jakie są dostępne będą zależne od tego czy mieszanka będzie miała w swoim składzie domieszki chemiczne. Jeżeli będzie to mieszanka bez jakichkolwiek domieszek chemicznych jedyną możliwością jaka jest dostępna to zmniejszenie negatywnego wpływu wzrostu temperatury na urabialność. Ponieważ mieszanki bez domieszek, niezależnie od składu cementu wykazywały wraz ze wzrostem temperatury zawsze pogorszenie urabialności, wywołane zmniejszeniem się średnicy rozptyłu i wzrostem wielkości parametrów reologicznych g i h . Negatywny wpływ wzrostu temperatury można jedynie zmniejszać w tym przypadku przez stosowanie dodatków mineralnych. Wyniki badań sugerują szczególnie korzystny wpływ mączki wapiennej i granulowanego żużla wielkopiecowego, podczas gdy popiół krzemionkowy wespół z popiołem lotnym wapiennym negatywny wpływ temperatury na urabialność wzmacnia.

Szersze spektrum możliwości pojawia się, gdy w składzie pojawiają się domieszki chemiczne. Stosując je możemy uzyskać mieszankę, której konsystencja nie będzie wrażliwa na wzrost temperatury. Nie zawsze tak musi być, wiele zależy od tego jaka to będzie domieszka i jaki dodatek mineralny będzie zastosowany.

Dla przykładu stosując w składzie cementu popiół lotny wapienny możemy spodziewać się większej podatności na utratę urabialności wywołaną rosnącą temperaturą. Zastosowanie odpowiedniej domieszki (w tym wypadku plastyfikatora V70) może wywołać odmienną tendencję. Domieszki chemiczne pozwalają modyfikować odporność urabialności na zmianę temperatury, jest to jednak zależność trudna do uogólnienia. Potwierdzają to wyniki badań mieszanek modyfikowanych domieszką upłynniającą FM 30. Stojące w opozycji do tych uzyskanych dla mieszanek z plastyfikatorem V70. Pojawienie się w składzie mieszanek modyfikowanych domieszkami dodatków mineralnych, jeszcze bardziej problem komplikuje. Z drugiej strony pozwala na uzyskanie mieszanek, których urabialność nie jest wrażliwa na zmianę temperatury i to zarówno po wymieszaniu jak i po 1 godzinie. Takimi właściwościami charakteryzowała się mieszanka z cementem z popiołem lotnym wapiennym i krzemionkowym oraz superplastyfikatorem FM 30.

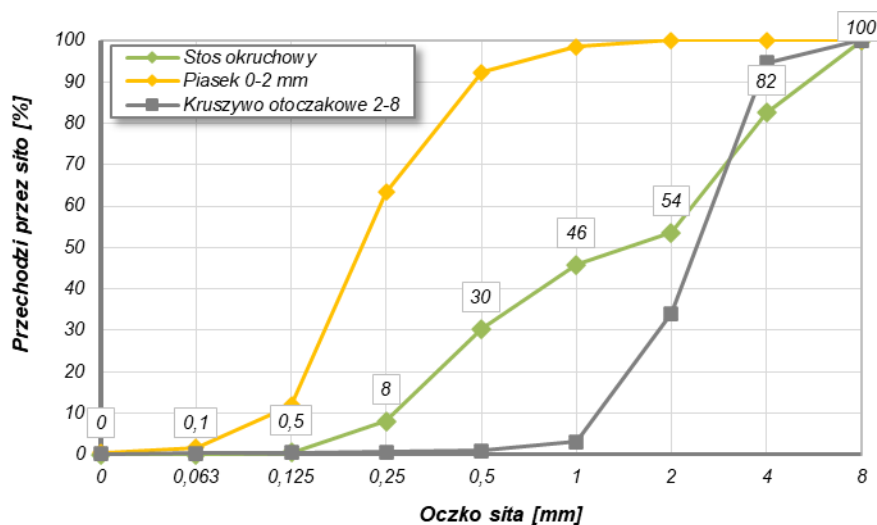
Uogólniając istnieje możliwość kształtowania odporności mieszanek na zmiany urabialności wywołane zmianami temperatury. Możemy to osiągnąć poprzez odpowiedni dobór składników mieszanki. Trudno jednak stawiać uniwersalne wytyczne. Wyniki badań pozwalają na pewne zawężenie spektrum możliwości jakie mamy do wyboru, ostateczny wybór powinien jednak być zweryfikowany doświadczalnie.

4.4 WPŁYW TEMPERATURY NA PARCIE MIESZANEK BETONU SAMOZAGĘSZCZALNEGO NA ŚCIANY DESKOWANIA – BLOK III.

Zasadniczym celem badań przedstawionych w tym rozdziale było określenie zależności pomiędzy właściwościami reologicznymi mieszanek a wywieranym przez nie parciem na deskowanie pionowe. W tym celu wykonano łącznie 18 modeli słupów 20x20x120cm, których deskowanie wyposażone było w system rejestrujący parcie mieszanki. Badania parcia wykonano dla 6 rodzajów mieszanek wykonanych w 3 temperaturach 10, 20 i 30°C

4.4.1 SKŁADY I WŁAŚCIWOŚCI SKŁADNIKÓW MIESZANEK

Mieszanki o dwóch stosunkach w/c wykonane były z użyciem trzech rodzajów cementów. Były to dostępne w ofercie handlowej Cementowni Górażdze: cement portlandzki CEM I 42,5 R, cement hutniczy CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA i cement wieloskładnikowy CEM V/A (S-V) 32,5 R-LH. Właściwości cementów są przedstawione w tablicach 30-32. Stos okruszowy o maksymalnej wielkości ziarna 8 mm przedstawia rys.103. Mieszanki zaprojektowano przy założeniu stałej ilości zaczynu cementowego wynoszącej 370 dm³/m³.



Rys. 103. Krzywe przesiewu kruszywa i stosu okruszowego samozagęszczalnych mieszanek betonowych badanych w bloku III

Tablica 30. Skład cementów użytych w bloku III

Cement	Klinkier portlandzki	Gips	Popiół lotny krzemionkowy	Żużel wielkopiecowy
CEM I 42,5 R	97,0	3,0	-	-
CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA	43,0	2,0	-	55
CEM V/A (S-V) 32,5R-LH	43,0	4,0	19,0 (18-30)	34 (18-30)

Tablica 31. Właściwości fizyczne i skład chemiczny cementów (wg danych producenta)

Cement	LOI [%]	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O _{eq}	K ₂ O
CEM I 42,5 R	2,10	21,6	64,4	4,5	2,2	1,3	0,4	
CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA	1,00	30,2	52,2	6,4	1,6	3,5	0,8	1,54
CEM V/A (S-V) 32,5 R-LH	1,27	29,2	49,3	9,5	2,8	2,4	1,3	1,05

Tablica 32. Fizyczne właściwości cementów

Cement	Gęstość [g/cm ³]	Wodochłonność [%]	Czas wiązania [min]		Średnica rozplywu [cm]	SO ₃ [%]	Powierzchnia właściwa [m ² /kg]
			Początek	Koniec			
CEM I 42,5 R	3,10	25,8	168	180	19,2	3,1	3330
CEM III/A 42,5N-LH/HSR/NA	2,99	34,0	200	345	15,4	3,30	3850
CEM V/A (S-V) 32,5 R-LH	2,88	29,4	210	315	17,5	2,20	3380

Tablica 33. Skład samozagęszczalnych mieszanek betonowych o w/c = 0,3

	CEM I 42,5 R		CEM III/A 42,5N-HSR/NA		CEM V/A(S-V) 32,5R-LH	
	SP 1	SP2	SP1	SP2	SP1	SP2
Superplastyfikator	SP 1	SP2	SP1	SP2	SP1	SP2
Superplastyfikator, % m.c	3,0	2,0	1,75	1,0	2,5	2,0
Superplastyfikator, [kg]	17,2	11,6	10,0	5,8	13,9	11,2
Cement, kg	572	580	573	579	555	559
Woda, kg	172	175	172	174	167	168
Piasek 0-2, kg	884					
Żwir 2-8, kg	780					
Objętość zaczynu cementowego, dm ³	372	372	373	372	372	372

Tablica 34. Skład samozagęszczalnych mieszanek betonowych o w/c = 0,4

	CEM I 42,5 R		CEM III/A 42,5N-HSR/NA		CEM V/A(S-V) 32,5R-LH	
	SP 1	SP2	SP1	SP2	SP1	SP2
Superplastyfikator	SP 1	SP2	SP1	SP2	SP1	SP2
Superplastyfikator, % m.c	1,0	0,75	0,75	0,50	1,50	0,75
Superplastyfikator, kg	5,1	3,8	3,8	2,5	7,3	3,7
Cement, kg	508	510	502	504	489	493
Woda, kg	203	204	201	202	195	197
Piasek 0-2, kg	884					
Żwir 2-8, kg	780					
Objętość zaczynu cementowego, dm ³	372	372	372	373	372	372

Mieszanki modyfikowano dwoma domieszkami upłynniającymi, których producentem był koncern BASF. Były to superplastyfikatory na bazie eterów polikarboksylianowych. Brak jest informacji na temat struktury polimerów budujących domieszkę. Z kart technologicznych dostępnych na stronie internetowej producenta wynika, że domieszka

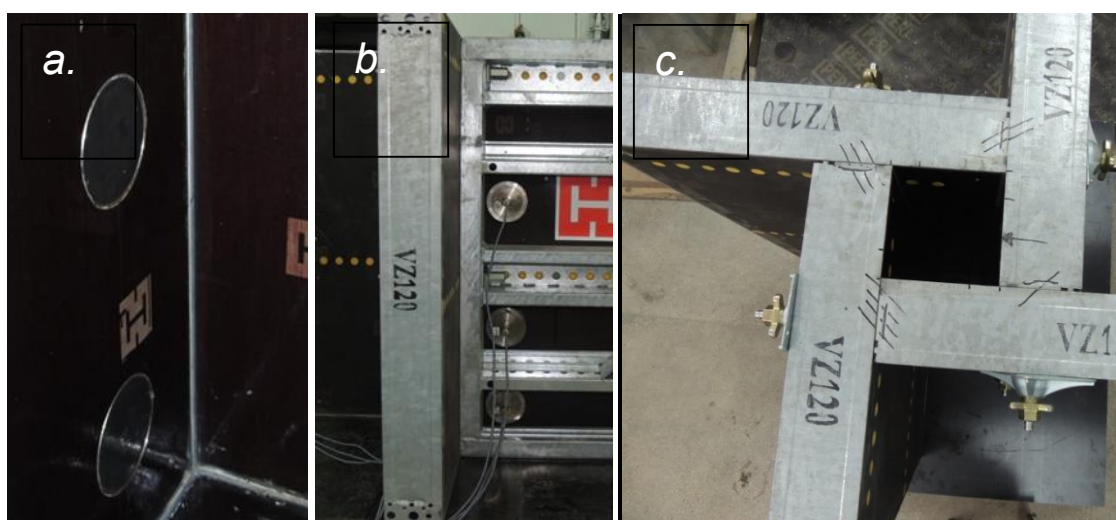
Glenium SKY 115 (SP 1) jest domieszką zalecaną w przypadku stosowania w podwyższonych temperaturach, posiadającą zdolność do relatywnie długiego utrzymywania konsystencji. Glenium ACE 430 (SP 2) natomiast przeznaczona jest głównie do stosowania w zakładach prefabrykacji, gdzie retencja urabialności nie ma kluczowego znaczenia. Wymagany jest natomiast szybki przyrost wytrzymałości. Dobrze współdziała z mniej reaktywnymi cementami.

Tablica 35. Domieszki chemiczne i ich podstawowe właściwości

	<i>Producent</i>	<i>Nazwa handlowa</i>	<i>Baza domieszki</i>	<i>Gęstość g/cm³</i>	<i>Zalecane dozowanie [% m.c]</i>
<i>SP 1</i>	<i>BASF (dawniej Woerment)</i>	<i>Glenium Sky 115</i>	<i>Eter polikarboksylowy</i>	<i>1,07</i>	<i>0,1-1,1</i>
<i>SP 2</i>	<i>BASF</i>	<i>Glenium Ace 430</i>	<i>Eter polikarboksylanowy</i>	<i>1,06</i>	<i>0,3-3,0</i>

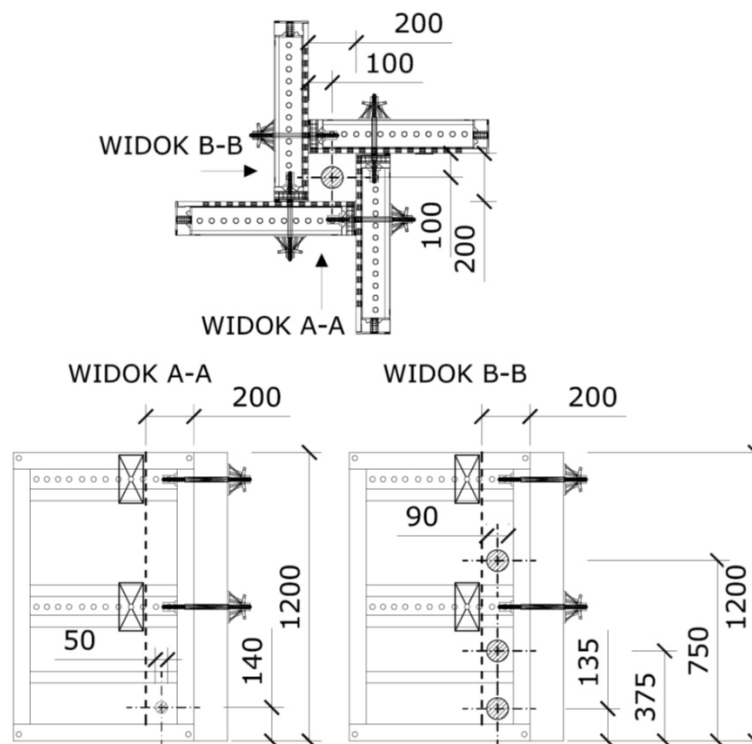
4.4.2 METODYKA BADAŃ PARCIA SAMOZAGĘSZCZALNYCH MIESZANEK BETONOWYCH NA ŚCIANY DESKOWANIA

Parcie mieszanek betonu samozagęszczalnego wykonano z użyciem systemowego deskowania modelu słupa o wymiarach 20x20x120cm. Deskowanie przedstawia rys wyposażone było w membranowe tensometryczne czujniki ciśnienia, których powierzchnia pomiarowa miała średnicę 97 mm. Czujniki o zakresie pomiarowym 0-200 kPa, posiadały taką charakterystykę, że potrafiły określić zmiany parcia, wywołane zmianami struktury mieszanki. Słupy betonowano stałą szybkością równą 7,0 m/h. Jest to duża prędkość, podyktowana koniecznością relatywnie szybkiego zakończenia badań z uwagi na trudności z utrzymaniem założonych warunków (temperatura 10, 20 i 30°C). Gwoli przypomnienia należy nadmienić, że szybsza prędkość betonowania oznacza większe obciążenie deskowania.

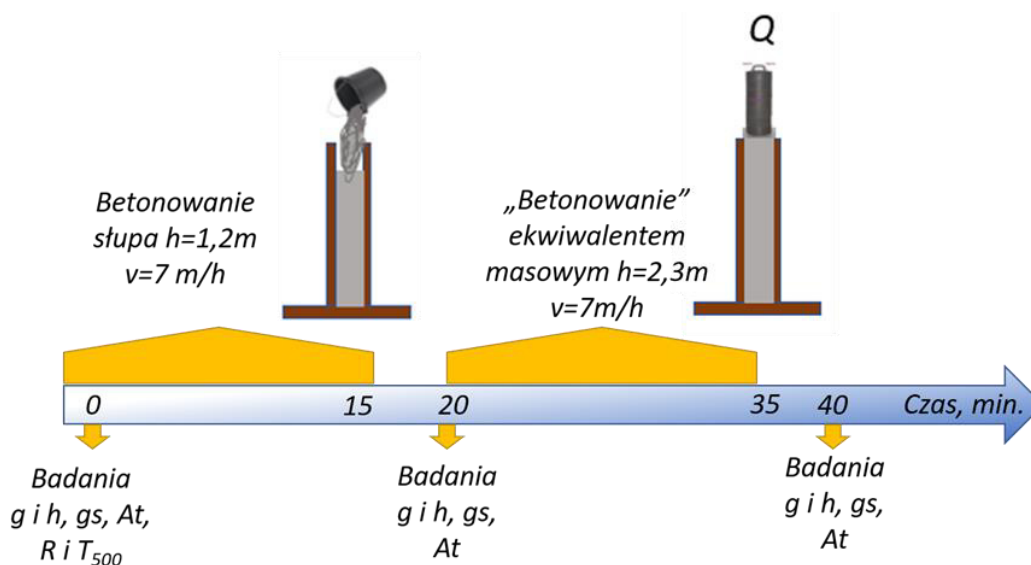


Rys. 104. Deskowanie słupa. a) czujniki od strony wewnętrznej deskowania, b) czujniki od zewnętrznej, c) widok deskowania z góry

Czujniki były umieszczone w odległości 135, 375 i 750 mm mierząc od dna deskowania do ich środka. Po zakończeniu betonowania słupa co przy założonej prędkości trwało ok 17-20 minut. Symulowano dalszą część betonowania na wysokość 2,3 m, poprzez umieszczenie na wierzchu słupa ekwiwalentu masowego mieszanki niezbędnej do osiągnięcia tej wysokości.



Rys. 105. Rzuty deskowania używanego w badaniach parcia mieszanek betonu samozagęszczalnego



Rys. 106. Sekwencja badań właściwości reologicznych mieszanek i betonowania słupa w badaniach bloku III

4.4.3 WPLYW TEMPERATURY NA WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE SAMOZAGĘSZCZALNYCH MIESZANEK BETONOWYCH W STANIE PŁYNIĘCIA

Wyniki badań diskutowane w paragrafie obejmują właściwości charakteryzujące urabialność określone bezpośrednio po wymieszaniu i po 80 minucie od wymieszania. W 80 minucie następowało ponowne wymieszanie mieszanki betonowej w mieszarce. Pomiary prowadzone w 20, 40 i 100 minucie służyły ocenie zdolności mieszanki do budowy struktury, która mogłaby przenieść część ciężaru mieszanki, prowadząc do redukcji parcia. Zostały one poddane analizie w pkt następnym W kontekście oceny wpływu temperatury na urabialność, wzięcie pod rozwagę parametrów mieszanek pozostających w spoczynku jest nieuzasadnione. Przed rozpoczęciem procesu betonowania mieszanka zawsze jest intensywniej mieszana, ma to symulować mieszanie przed badaniem właściwości reologicznych w 80 minucie. Wyniki badań reologicznych, średnicy i czasu rozplywu mieszanek przedstawione są w tablicach 36-38 i na rys. 107-109.

Tablica 36. Wyniki badań konsystencji i właściwości reologicznych mieszanek betonowych z cementem portlandzkim CEM I 42,5 R.

Cement		CEM I 42,5 R							
w/c		0,3				0,4			
Superplastyfikator		SP1		SP2		SP1		SP2	
Czas [min]		5	80	5	80	5	80	5	80
Średnica rozplywu R [cm]	10 °C	57	78	70	71	61	70	58	74
	20 °C	79	75	80	75	77	47	65	53
	30 °C	72	70	71	20	71	45	78	42
g [Nmm]	10 °C	262	87	164	123	234	93	251	32
	20 °C	29	38	21	20	38	47	196	201
	30 °C	24	39	20		56	207	11	423
Czas rozplywu T ₅₀ [s]	10 °C	11,1	8,2	10,0	9,0	13,0	8,0	9,0	2,0
	20 °C	5,9	7,1	9,0	11,0	2,0	2,4	2,8	3,1
	30 °C	6,0	6,3	8,0		1,0	1,8	2,0	2,3
h [Nmms]	10 °C	4646	3905	4695	5493	1548	787,8	1821	1975
	20 °C	4103	4218	3796	4438	1244	862	1072	862
	30 °C	3375	3881	3878		901	509,7	878	953

Mieszanka niesamozagęszczalna	SF 1	SF2	SF3
-------------------------------	------	-----	-----

Tablica 37. Wyniki badań konsystencji i właściwości reologicznych mieszanek betonowych z cementem hutniczym CEM III/A 42,5 N

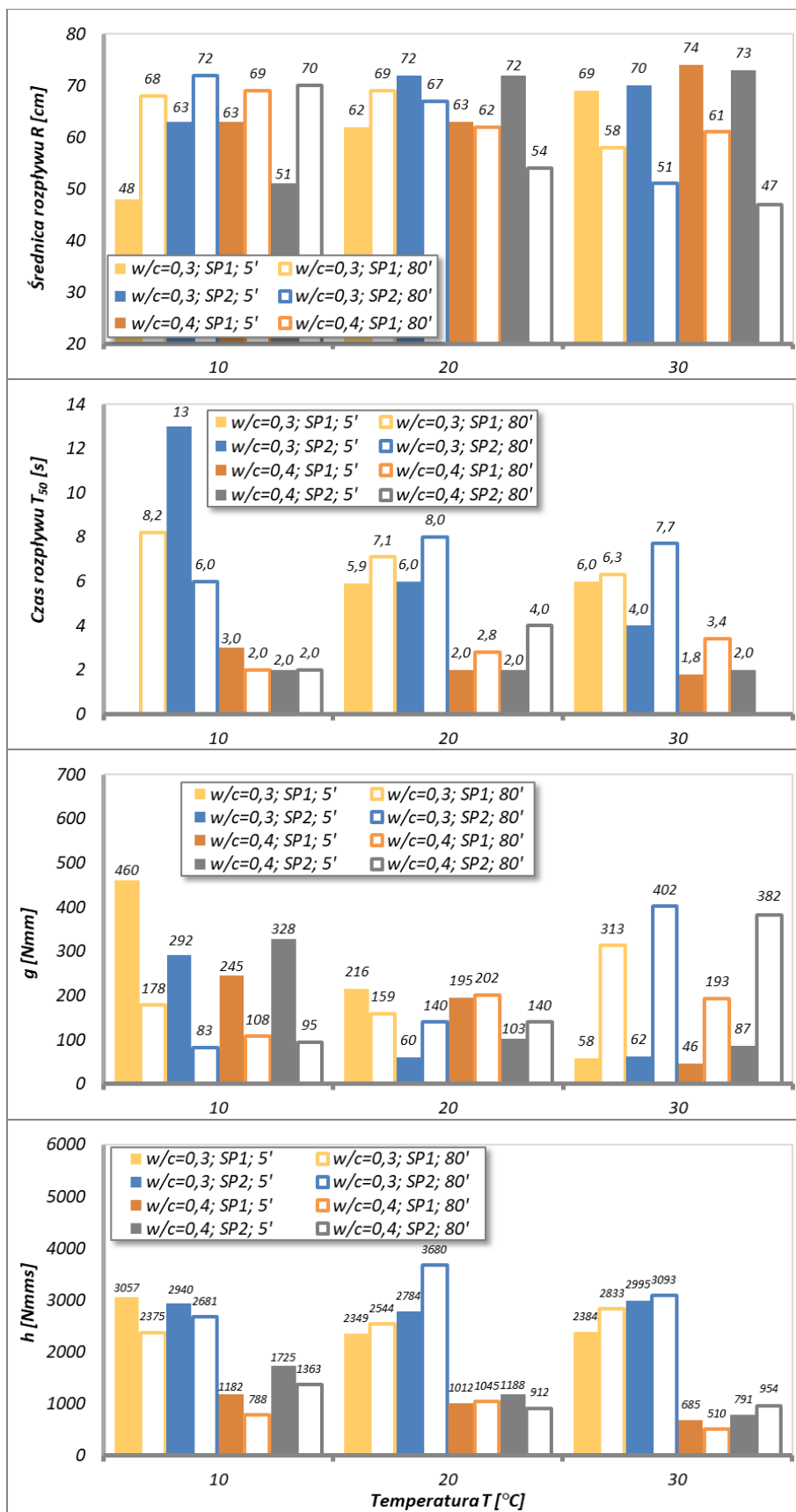
Cement		CEM III/A 42,5 N							
w/c		0,3				0,4			
Superplastyfikator		SP1		SP2		SP1		SP2	
Czas [min]		5	80	5	80	5	80	5	80
Średnica rozptywu R [cm]	10 °C	57	78	70	71	61	70	58	74
	20 °C	79	75	80	75	77	47	65	53
	30 °C	72	70	71	20	71	45	78	42
g [Nmm]	10 °C	262	87	164	123	234	93	251	32
	20 °C	29	38	21	20	38	47	196	201
	30 °C	24	39	20		56	207	11	423
Czas rozptywu T ₅₀ [s]	10 °C	11,1	8,2	10,0	9,0	13,0	8,0	9,0	2,0
	20 °C	5,9	7,1	9,0	11,0	2,0	2,4	2,8	3,1
	30 °C	6,0	6,3	8,0		1,0	1,8	2,0	2,3
h [Nmms]	10 °C	4646	3905	4695	5493	1548	788	1821	1975
	20 °C	4103	4218	3796	4438	1244	862	1072	862
	30 °C	3375	3881	3878		901	510	878	953

Mieszanka niesamozagęszczalna	SF 1	SF2	SF3
-------------------------------	------	-----	-----

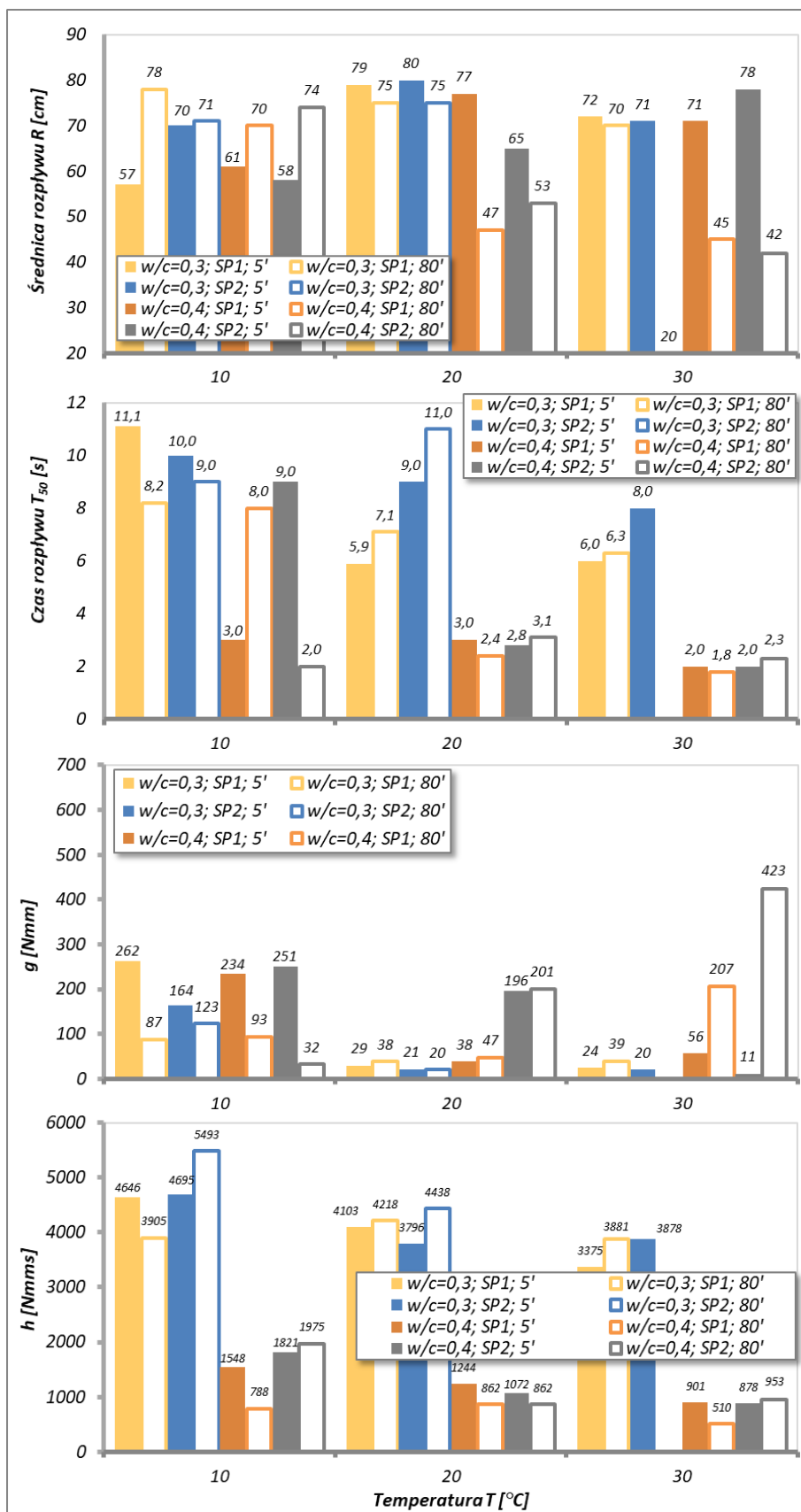
Tablica 38. Wyniki badań konsystencji i właściwości reologicznych mieszanek betonowych z cementem wieloskładnikowym CEM V/A (S-V) 32,5 R

Cement		CEM V/A (S-V) 32,5 R							
w/c		0,3				0,4			
Superplastyfikator		SP1		SP2		SP1		SP2	
Czas [min]		5	80	5	80	5	80	5	80
Średnica rozptywu R [cm]	10 °C	51	66	48	68	66	70	59	66
	20 °C	74	73	74	72	68	73	66	39
	30 °C	68	66	69	69	75	69	70	37
g [Nmm]	10 °C	204	165	384	149	274	110	257	138
	20 °C	24	73	38	91	168	80	153	518
	30 °C	31	119	93	108	52	82	100	594
Czas rozptywu T ₅₀ [s]	10 °C	34	8	10	10	3	4	5	3,4
	20 °C	8,3	6	7	10	3	2	3	
	30 °C	11	9	10	10	2	3	2	2,3
h [Nmms]	10 °C	4553	3710	4325	4003	1615	1618	1541	1006
	20 °C	3256	3398	2803	3398	1164	1403	1476	1272
	30 °C	2951	2588	3845	3317	1032	842	877	953

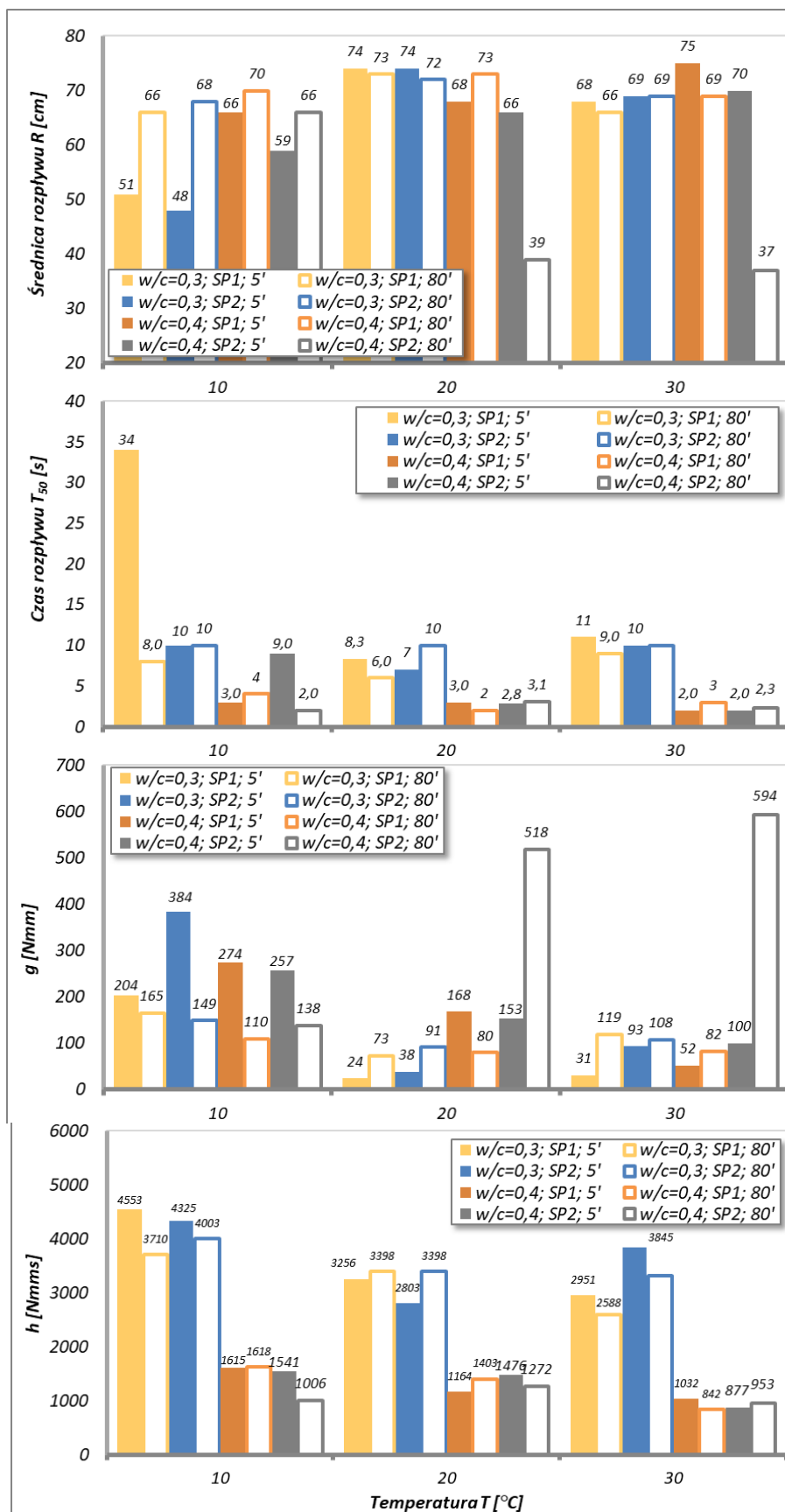
Mieszanka niesamozagęszczalna	SF 1	SF2	SF3
-------------------------------	------	-----	-----



Rys. 107. Wpływ temperatury, czasu na średnicę i czas rozplywu oraz na parametry reologiczne mieszanek z cementem portlandzkim CEM I 42,5 R



Rys. 108. Wpływ temperatury, czasu na średnicę i czas rozplywu oraz na parametry reologiczne mieszanek z cementem hutniczym CEM III/A 42,5 N



Rys. 109. Wpływ temperatury i czasu na średnicę i czas rozplywu oraz na parametry reologiczne mieszanek z cementem wieloskładnikowym CEM V/A (S-V) 32,5 R

Zmiany średnic i czasu rozplywu mieszanek wywołane zmianami temperatury są istotne. Skutkuje to koniecznością odmiennej klasyfikacji mieszanek pod względem klasy rozplywu i klasy lepkości. Może wywołać to trudności w prawidłowym wykorzystaniu mieszanek. Możliwa jest sytuacja w której wzrost temperatury mieszanki będzie skutkowało powiększeniem średnic rozplywu. Na pierwszy rzut oka jest to efekt pozytywny i pożądany, ale z drugiej strony jeśli zwiększeniu średnicy rozplywu będzie towarzyszyło np. zmniejszenie lepkości może dojść do segregacji mieszanki. Nadmierna płynność to również większe prawdopodobieństwo wystąpienia skurczu od osiadania plastycznego co skutkuje pojawieniem się zarysowań nad zbrojeniem. Wyższa temperatura intensyfikując parowanie wody z mieszanki, może ten efekt wzmocnić.

Uzyskane wyniki badań wskazują, że efektywność działania domieszek upłynniających w temperaturze 10 °C zwiększa się wraz z upływem czasu. Jest to nie zależne od rodzaju cementu, domieszki upłynniającej i stosunku w/c. Wyżej wymienione czynniki wpływają na intensywność tego efektu, ale nie są w stanie całkowicie go wyeliminować. W temperaturze 10 °C wszystkie mieszanki wymagają dłuższego mieszania tak by osiągnąć maksymalny efekt upłynnienia. Zależny jest od stopnia zaadsorbowania domieszki na produktach hydratacji pokrywających ziarna cementu. Jest to szczególnie istotne w przypadku produkcji mieszanek w zakładach prefabrykacji, kiedy pożądane jest aby mieszanka charakteryzowała się założoną płynnością w możliwie krótkim czasie mieszania. W przypadku betonu towarowego, mieszanka oprócz mieszania na węźle jest również mieszana w betonowozie, dlatego efekt upłynnienia związany ze stopniem zaadsorbowania domieszki może osiągnąć swoje maksimum w momencie układania mieszanki w deskowaniu. Należy podkreślić, że różnice we właściwościach reologicznych w temperaturze 10°C po 5 i 80 minutach są zdecydowanie mniejsze dla mieszanek o w/c =0,4. Można to wytłumaczyć tym, że w mieszance o większej ilości wody za kształtowanie urabialności w mniejszym stopniu odpowiada efektywność domieszki upłynniającej, która jest w znacznej mierze zależna od temperatury.

W temperaturze 20°C mieszanki na ogół po 5 minutach charakteryzują się większymi średnicami rozplywu niż mieszanki w temperaturze 10°C, mieszanki o w/c =0,3 utrzymują na zadowalającym poziomie urabialność - największe zmniejszenie średnicy rozplywu obserwowane jest w przypadku mieszanki z CEM I i domieszką SP2 wynosi ono 6 cm przy zwiększonym o 6 s czasie rozplywu do średnicy 50 cm. Mieszanki o w/c = 0,4 i domieszką SP2 w większym stopniu ulegają sztywnieniu, jest to domieszka przeznaczona według producenta do stosowania w zakładach prefabrykacji, czyli wymagane jest od niej efektywne działanie na początku, a sprawą w zasadzie drugorzędną jest utrzymywanie konsystencji przez dłuższy czas. Mieszanka z CEM V i SP 2 po 80 minutach wymaga zagęszczania wibracyjnego ponieważ jej średnica rozplywu wynosi 39 cm co jest równoważne opadowi stożka rzędu 20 cm. Warte zauważenia jest to, że domieszka SP 2 w mieszankach o w/c =0,3 bardzo dobrze utrzymuje urabialność w ciągu 80 minut od dodania wody. Jest to zapewne związane z jej ilością (1,0÷2,0 % m. c), która gwarantuje pokrycie łańcuchami polimerów wszystkich produktów wczesnej fazy hydratacji cementu i skuteczne jej zablokowanie przez efekt zawady sterycznej.

W przypadku mieszanek o temperaturze 30 °C obserwowane jest odwrotne zachowanie niż mieszanek o temperaturze 10 °C. Skuteczne działanie domieszki widoczne jest w zasadzie od razu, już podczas obserwacji procesu mieszania. Co wiązać należy z pojawieniem się dogodnych warunków do adsorpcji domieszki. Wyższa temperatura przyspiesza reakcje zachodzące w mieszance czego skutkiem może być pojawienie się związków o dużym powinowactwie do domieszki, przez co zawada steryczna może zostać rozwinięta. Z drugiej strony może nastąpić wyraźne zmniejszenie płynności mieszanek z upływem czasu. Nastąpi ono wtedy, gdy zaadsorbowana domieszka nie będzie w stanie spowolnić procesu wiązania, przez co pojawią się w roztworze substancje, które przykryją łańcuchy boczne. Skutkuje to tym, że zdyspergowane początkowo cząstki na powrót będą ulegały flokulacji. Może się dzieć tak, gdy domieszka będzie w pewnym niedomiarze, czyli jej ilość będzie mniejsza niż ilość właściwa dla tzw. punktu saturacji. To też tłumaczy, dlaczego poziom właściwości reologicznych mieszanek o $w/c=0,4$ zwiększa się w większym stopniu.

4.4.4 WPLYW TEMPERATURY NA EFEKT SZTYWNIENIA SAMOZAGĘSZCZALNYCH MIESZANEK BETONOWYCH

Sztywnienie mieszanek betonu samozagęszczalnego, jest uważane za zjawisko o pozytywnym charakterze mogące prowadzić do redukcji parcia mieszanek na ściany deskowania. Pojawia się wraz z upływem czasu, w którym mieszanka pozostaje w stanie spoczynku. W praktyce jest to czas mierzony od momentu umieszczenia jej w deskowaniu, wtedy to w mieszankach buduje się struktura, mogąca przenosić część obciążeń pochodzących od ciężaru własnego mieszanki. Sztywnienie może mieć odwracalny lub nieodwracalny charakter. Z praktycznego punktu widzenia bardziej pożądanym jest drugi przypadek, gdyż zabezpiecza przed gwałtownym wzrostem parcia spowodowanym pojawieniem się obciążeń pochodzących od układanej w następnych etapach mieszanki. Za miarę tendencji mieszanek do sztywnienia uważa się statyczną granicę płynięcia g_s i wskaźnik AT . Dynamiczna granica płynięcia g związana ze średnicą rozplywu mieszanki dobrze koreluje z wielkością maksymalnego parcia mieszanki na ściany deskowania. Im granica płynięcia większa tym możemy spodziewać się mniejszego parcia, parcie zmniejsza się wraz ze zmniejszeniem średnicy rozplywu mieszanki. Wynik uzyskany po przeprowadzeniu prostego testu rozplywu może być wykorzystany do oszacowania parcia mieszanki na deskowanie. Test rozplywu mieszanki nie daje informacji na temat możliwej redukcji parcia, nawet gdy jest przeprowadzony w zmodyfikowanej wersji dla mieszanki pozostającej w spoczynku w odpowiednio przygotowanym (obciążonym) stożku opadowym. W związku z tym te wyniki nie będą brane pod uwagę w dalszej dyskusji. w tablicach i na rysunkach zestawiono wyniki badań wpływu temperatury na właściwości reologiczne mieszanek z trzech różnych spoiw, o dwóch poziomach w/c i upłynnionych dwoma rodzajami domieszek.

Tablica 39. Wyniki badań dynamicznych i statycznych właściwości reologicznych mieszanek betonowych o w/c=0,3 z cementem portlandzkim CEM I 42,5 R,

Cement		CEM I 42,5 R							
w/c		0,3							
Superplastyfikator		SP1				SP2			
Czas [min]		5	20	40	80	5	20	40	80
g [Nmm]	10 °C	460	259	184	178	292	94	85	83
	20 °C	216	194	221	159	60	125	175	140
	30 °C	58	161	186	313	62	58	124	402
h [Nmms]	10 °C	3904	3256	2409	2375	2940	3577	3191	2681
	20 °C	2700	2819	2514	2544	2784	3152	3658	3680
	30 °C	2356	2290	2395	2833	2995	3766	3815	3093
g _s [Nmm]	10 °C	534	1460	2221	383	1540	2125	2351	376
	20 °C	602	1805	2948	533	788	2012	2751	322
	30 °C	805	2339	3819	624	558	2007	2480	751
AT [Nmm/s]	10 °C	165	310	348	97	237	452	584	165
	20 °C	159	311	322	132	252	404	637	226
	30 °C	136	304	382	140	584	165	459	255

Tablica 40. Wyniki badań dynamicznych i statycznych właściwości reologicznych mieszanek betonowych o w/c=0,4 z cementem portlandzkim CEM I 42,5 R

Cement		CEM I 42,5 R							
w/c		0,4							
Superplastyfikator		SP1				SP2			
Czas [min]		5	20	40	80	5	20	40	80
g [Nmm]	10 °C	245	121	137	108	328	253	240	95
	20 °C	158	204	212	202	103	112	119	140
	30 °C	46	85	135	193	87	96	274	382
h [Nmms]	10 °C	1182	1411	1349	788	1725	1959	1955	1363
	20 °C	1012	1211	1369	1045	1188	1315	1433	912
	30 °C	685	848	882	510	791	965	1736	954
G _s [Nmm]	10 °C	739	2770	2848	197	1591	2075	2096	296
	20 °C	946	2490	3268	422	1138	1547	1325	427
	30 °C	1345	2228	3394	611	615	1144	1687	984
AT [Nmm/s]	10 °C	175	367	149	28	112	349	236	67
	20 °C	119	174	127	30	100	167	130	61
	30 °C	34	185	99	11	117	346	277	165

Tablica 41. Wyniki badań dynamicznych i statycznych właściwości reologicznych mieszanek betonowych o w/c=0,3 z cementem hutniczym CEM III/A 42,5 N

Cement		CEM III/A 42,5 N							
w/c		0,3							
Superplastyfikator		SP1				SP2			
Czas [min]		5	20	40	80	5	20	40	80
g [Nmm]	10 °C	262	91	68	87	164	56	113	123
	20 °C	29	56	77	38	21	42	44	20
	30 °C	24	26	33	39	20			
h [Nmms]	10 °C	4646	4315	4569	3905	4695	5224	4815	5493
	20 °C	4103	4182	4142	4218	3796	4489	4679	4438
	30 °C	3375	3534	3917	3881	3878			
g _s [Nmm]	10 °C	493	1656	2760	162	1471	1552	1963	273
	20 °C	761	1457	2538	205	1562	1624	1781	367
	30 °C	862	1375	3086	45	1625			
AT [Nmm/s]	10 °C	124	413	459	195	368	432	519	238
	20 °C	210	299	390	192	208	476	490	210
	30 °C	217	286	297	317	328			

Tablica 42. Wyniki badań dynamicznych i statycznych właściwości reologicznych mieszanek betonowych o w/c=0,4 z cementem hutniczym CEM III/A 42,5 N

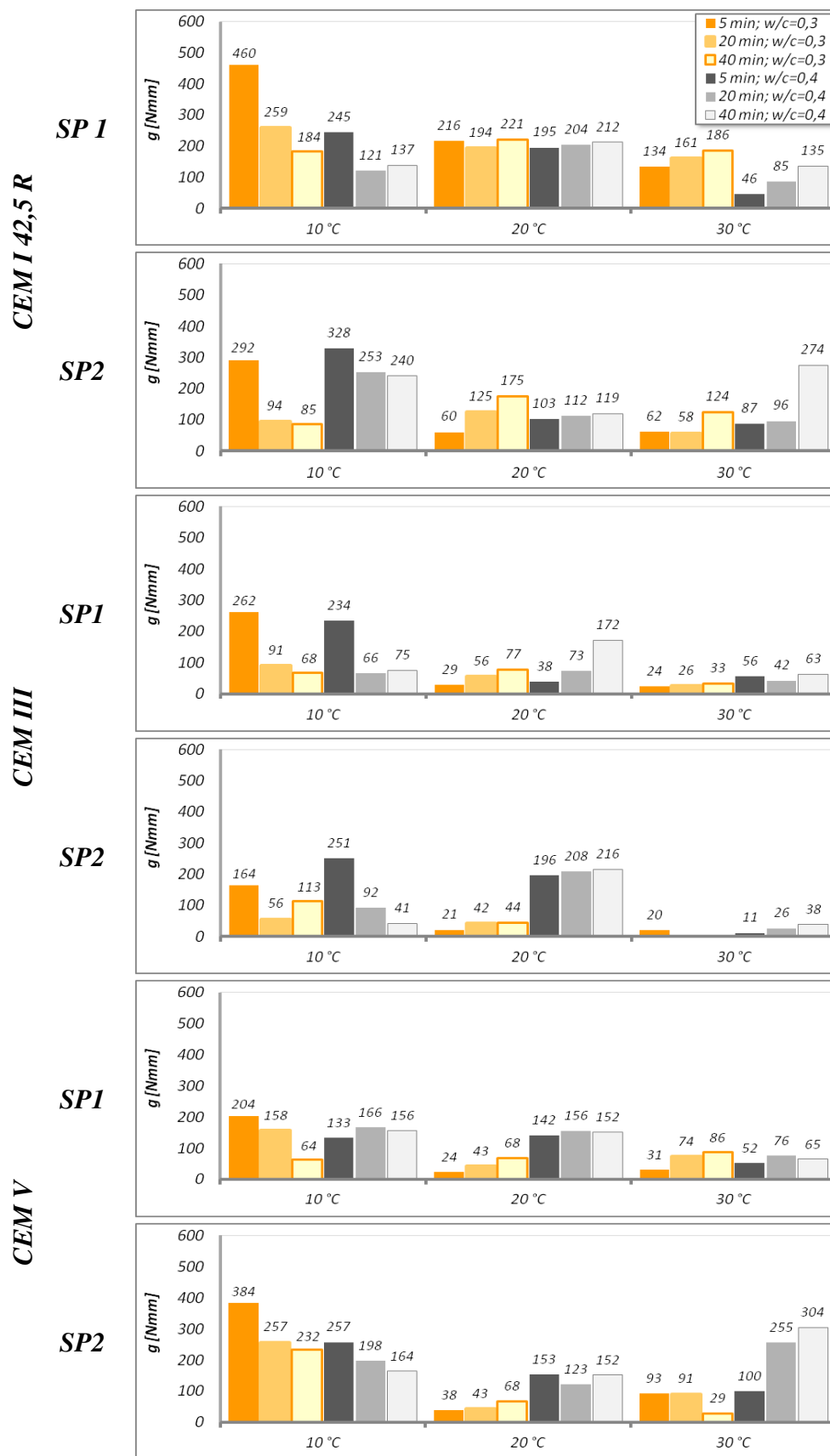
Cement		CEM III/A 42,5 N							
w/c		0,4							
Superplastyfikator		SP1				SP2			
Czas [min]		5	20	40	80	5	20	40	80
g [Nmm]	10 °C	234	66	75	87	251	92	41	32
	20 °C	38	73	172	334	196	208	216	201
	30 °C	56	42	189	396	11	26	38	223
h [Nmms]	10 °C	1548	1390	1310	787,8	1821	1734	1896	1975
	20 °C	1244	1217	1151	862	1072	1281	1347	862
	30 °C	901	926	1032	509,7	878	787	901	953
g _s [Nmm]	10 °C	1179	2648	2932	162	1293	2059	2254	417
	20 °C	1387	3278	3751	1127	1796	1816	2941	380
	30 °C	1921	3887	4087	145	1827	2392	3395	1071
AT [Nmm/s]	10 °C	75	167	149	28	436	512	608	57
	20 °C	45	149	68	22	50	176	66	29
	30 °C	34	85	99	11	381	372	428	50

Tablica 43. Wyniki badań dynamicznych i statycznych właściwości reologicznych mieszanek betonowych o $w/c=0,3$ z cementem wieloskładnikowym CEM V/A (S-V) 32,5 R

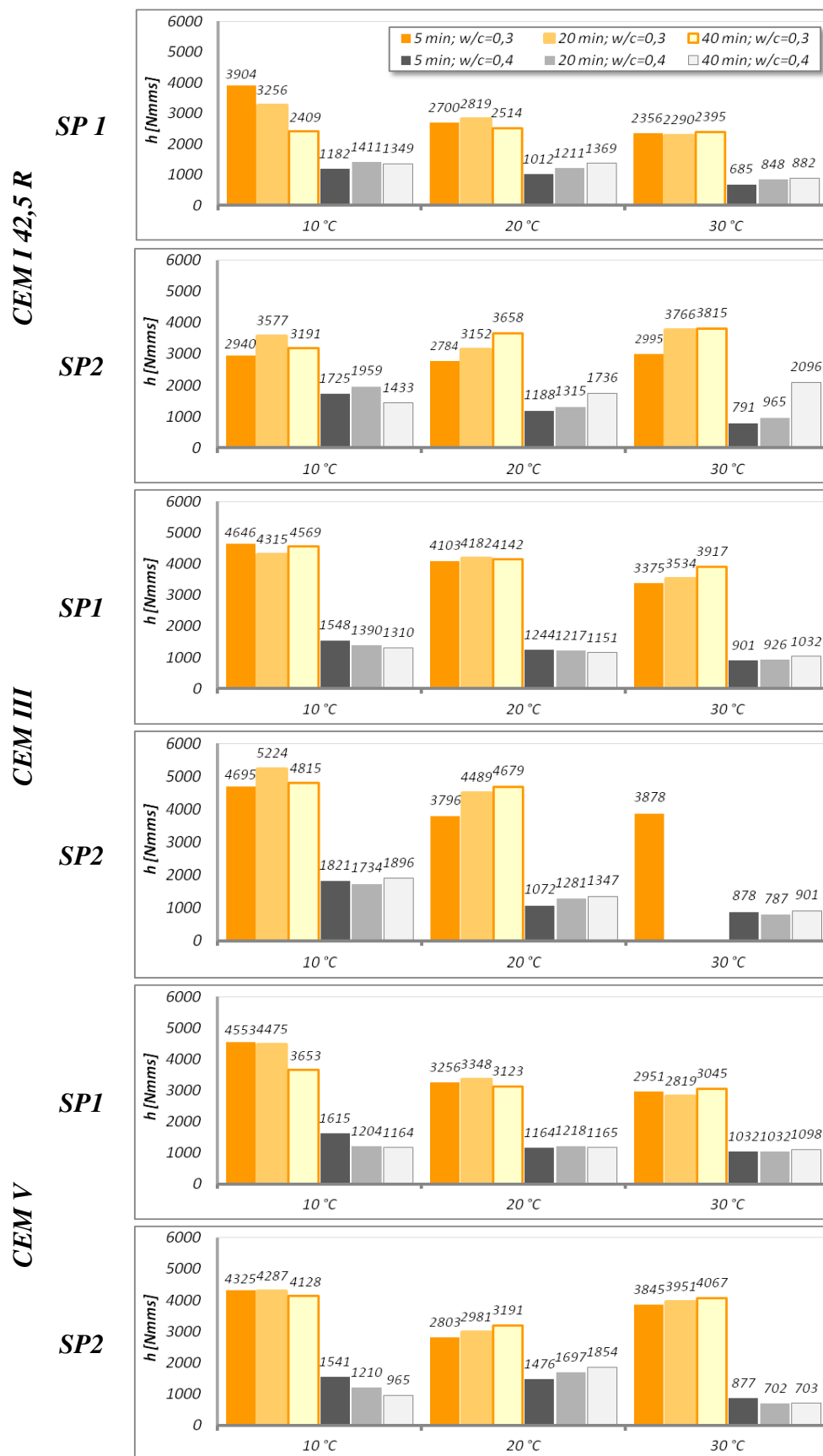
Cement		CEM V/A (S-V) 32,5 R							
w/c		0,3							
Superplastyfikator		SP1				SP2			
Czas [min]		5	20	40	80	5	20	40	80
g [Nmm]	10 °C	204	158	64	165	384	257	232	149
	20 °C	24	43	68	73	38	43	68	91
	30 °C	31	74	86	119	93	91	29	108
h [Nmms]	10 °C	4553	4475	3653	3710	4325	4287	4128	4003
	20 °C	3256	3348	3123	3398	2803	2981	3191	3398
	30 °C	2951	2819	3045	2588	3845	3951	4067	3317
g _s [Nmm]	10 °C	480	954	2248	184	569	1884	2668	59
	20 °C	474	1054	2570	417	792	1957	2592	269
	30 °C	486	1703	3442	199	290	2115	2802	37
AT [Nmm/s]	10 °C	277	465	377	248	305	398	229	122
	20 °C	228	468	518	413	132	169	218	145
	30 °C	212	351	274	155	209	245	283	174

Tablica 44. Wyniki badań dynamicznych i statycznych właściwości reologicznych mieszanek betonowych, o $w/c=0,4$ z cementem wieloskładnikowym CEM V/A (S-V) 32,5 R

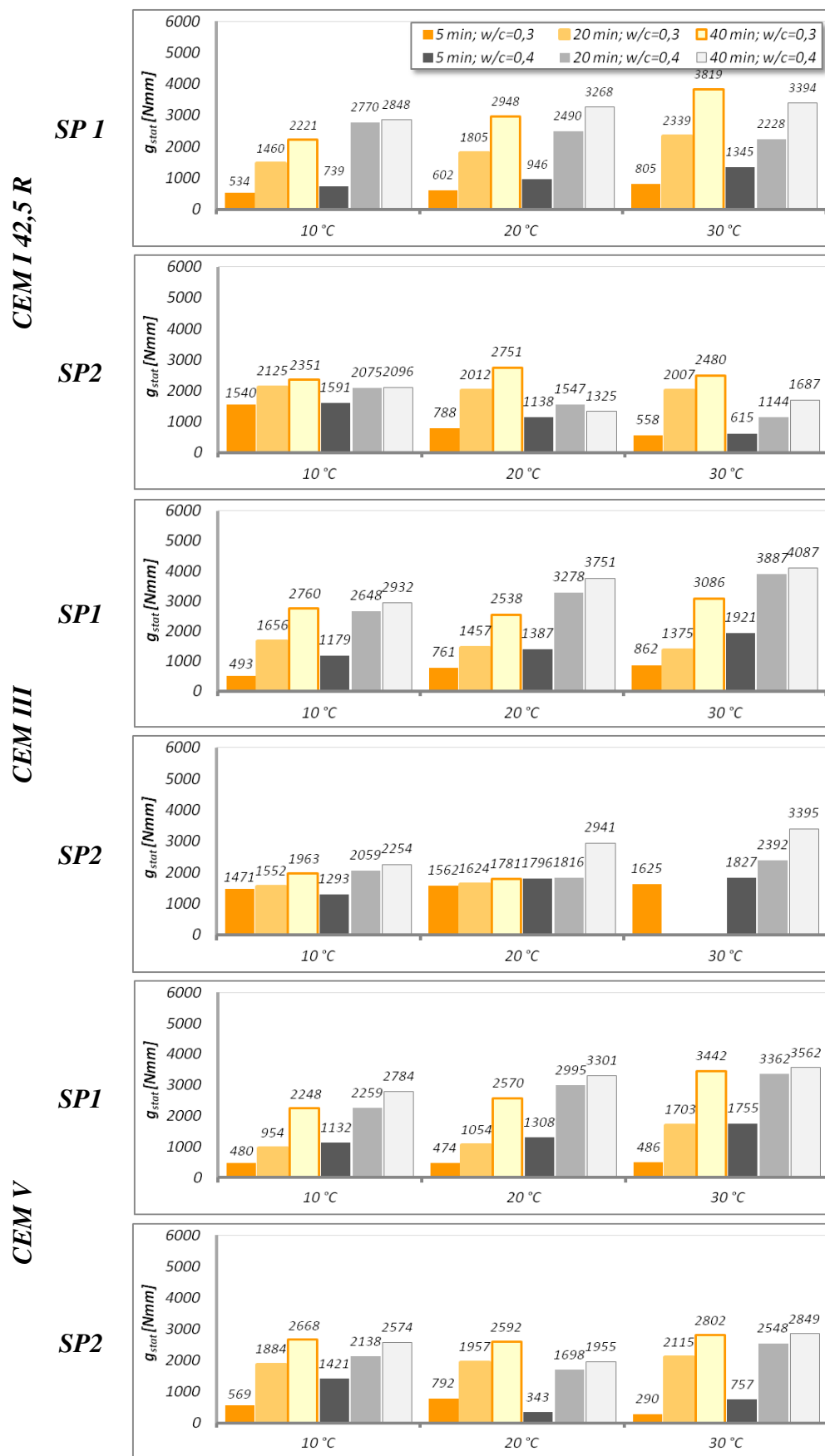
Cement		CEM V/A (S-V) 32,5 R							
w/c		0,4							
Superplastyfikator		SP1				SP2			
Czas [min]		5	20	40	80	5	20	40	80
g [Nmm]	10 °C	274	166	156	110	257	198	164	138
	20 °C	168	156	152	80	153	123	152	518
	30 °C	52	76	65	82	100	255	304	594
h [Nmms]	10 °C	1615	1204	1164	1619	1541	1210	965	1006
	20 °C	1164	1218	1165	1403	1476	1697	1854	1272
	30 °C	1032	1032	1098	842	877	702	703	953
g _s [Nmm]	10 °C	1132	2259	2784	494	1421	2138	2574	741
	20 °C	1308	2995	3301	827	343	1698	1955	1370
	30 °C	1755	3362	3562	155	757	2548	2849	1071
AT [Nmm/s]	10 °C	132	174	193	143	207	293	271	134
	20 °C	92	222	133	62	71	89	135	49
	30 °C	27	123	88	93	21	130	184	117



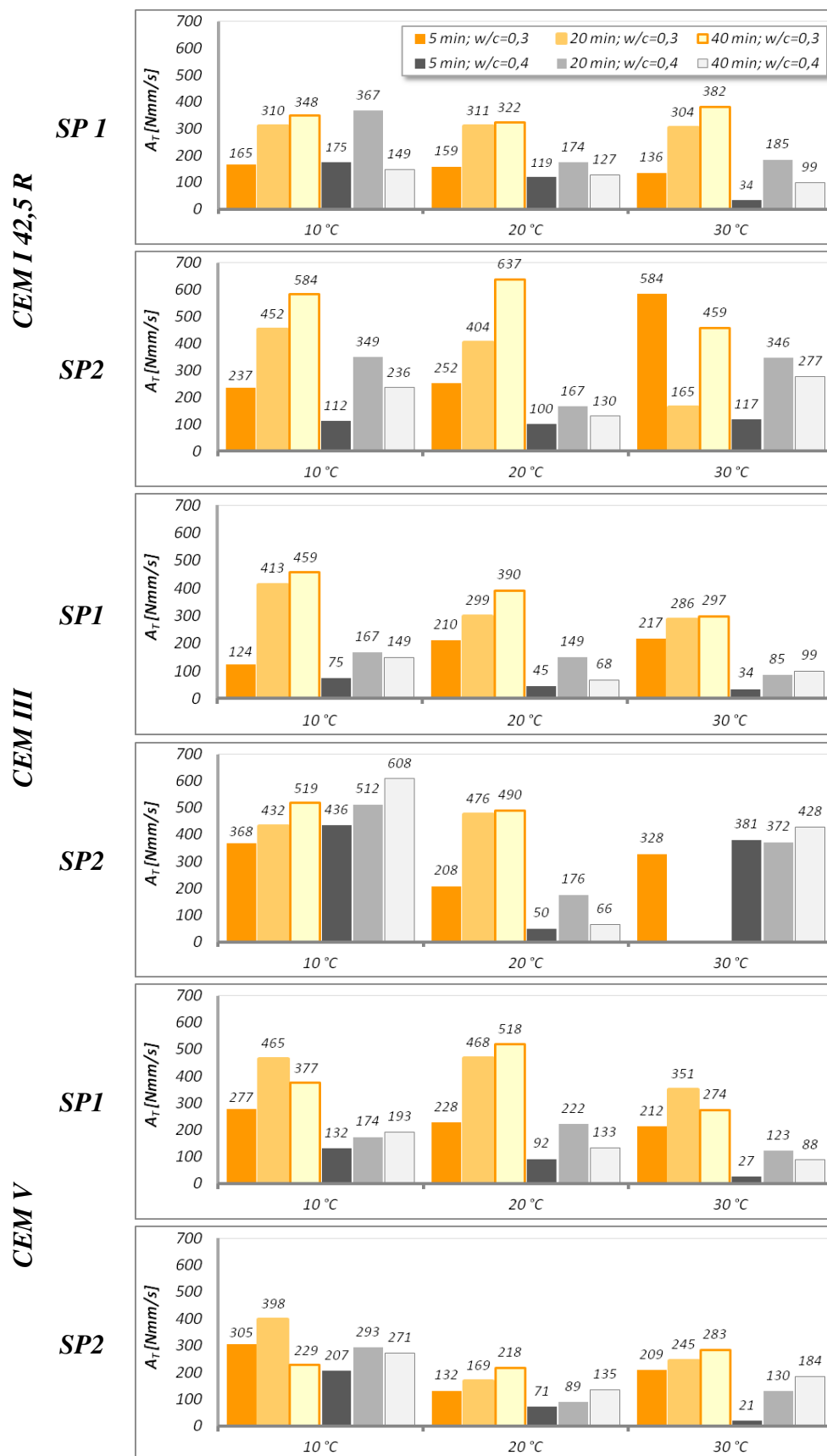
Rys. 110. Wpływ temperatury na granicę płynięcia mieszanek o $w/c = 0,3$ i $0,4$ w czasie 5, 20 i 40 minut



Rys. 111. Wpływ temperatury na lepkość plastyczną mieszanek o $w/c = 0,3$ i $0,4$ w czasie 5, 20 i 40 minut



Rys. 112. Wpływ temperatury na statyczną granicę płynięcia mieszanek o w/c = 0,3 i 0,4 w czasie 5, 20 i 40 minut.



Rys. 113. Wpływ temperatury na wskaźnik A_T mieszanek o w/c = 0,3 i 0,4 w czasie 5, 20 i 40 minut.

Parametry reologiczne określone dla mieszanek bezpośrednio po ich przygotowaniu, po 20 i 40 minutach spoczynku, dostarczają informacji o tendencji mieszanek do budowy struktury, której pojawienie się może powodować zmniejszenie parcia wywieranego na deskowanie.

Początkowa granica płynięcia mieszanek jest najwyższa w najniższej rozpatrywanej temperaturze i maleje wraz upływem czasu. Efekt ten jest niezależny od rodzaju cementu i superplastyfikatora. W wyrażnie mniejszym stopniu jest widoczny w przypadku mieszanek o wyższym w/c. W tych mieszanekach w kształtowaniu urabialności większą rolę odgrywa woda a nie domieszka upłynniająca, która by dobrze działać potrzebuje odpowiednich miejsc do adsorpcji. Te centra adsorpcji pojawiają się z upływem czasu. Czas ten jest tym dłuższy im niższa jest temperatura. Granica płynięcia mieszanek o temperaturze 20°C w ciągu 40 minut nie zmienia się znacząco, podczas gdy dla mieszanek o temperaturze 30°C wzrasta.

Lepkość plastyczna generalnie zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury mieszanek. Wpływ czasu bardzo trudno uogólnić, ale w pierwszych 40 minutach lepkość nie ulega znaczącym zmianom bądź nieznacznie wzrasta.

Granica statyczna mieszanek wzrasta wraz ze wzrostem temperatury, wpływ temperatury jest bardziej wyraźny w przypadku mieszanek o w/c=0,3. Dla wielkości statycznej granicy statycznej bardzo duże znaczenie ma czas, w którym mieszanka jest pozostawiona w spoczynku. Przy czym ma istotniejsze znaczenie w przypadku mieszanek o w/c=0,3, gdyż można zauważyć pewny proporcjonalny wzrost g_s wraz z upływem czasu. W przypadku mieszanek o w/c=0,4 największy wzrost statycznej granicy płynięcia następuje w pierwszych 20 minutach, podczas kolejnych 20 minut tendencja wzrostowa ulega zahamowaniu. Przyczyną tego jest mniejsza lepkość mieszanek o w/c=0,4. W ich przypadku za budowę struktury może odpowiadać efekt klinowania się ziaren kruszywa, które z uwagi na mniejszą lepkość mieszanek mogą się przemieszczać opierając się na sobie. W przypadku mieszanek o w/c=0,3, których lepkość jest na tyle duża by temu zapobiec, za budowę struktury mieszanki w spoczynku odpowiadają efekty występujące w zaczynie cementowym, związane z działaniem domieszki upłynniającej stąd też wyraźniejszy wpływ czasu. Statyczna granica płynięcia jest tym większa im wyższe w/c i im wyższa temperatura mieszanki.

Wskaźnik AT zależy głównie od wskaźnika w/c, jest wyraźnie niższy dla mieszanek o wyższym w/c. Wpływ temperatury nie jest jednoznaczny. Wskaźnik AT może wzrastać wraz ze wzrostem temperatury, możliwa jest sytuacja odwrotna, jak i taka, że temperatura nie wpływa znacząco. Upływ czasu generalnie powoduje zwiększenie wskaźnika AT jest to widoczne zwłaszcza w ciągu pierwszych 20 minut.

Statyczna granica płynięcia g_s i wskaźnik AT są zależne od rodzaju cementu i domieszki nie można na podstawie prezentowanych badań postawić ogólnych wniosków na temat ich wpływu. Zwłaszcza gdy pojawia się jako zmienna temperatura i czas.

4.4.5 WPLYW TEMPERATURY NA PARCIE MIESZANKI SAMOZAGĘSZCZALNEJ NA DESKOWANIE SŁUPA

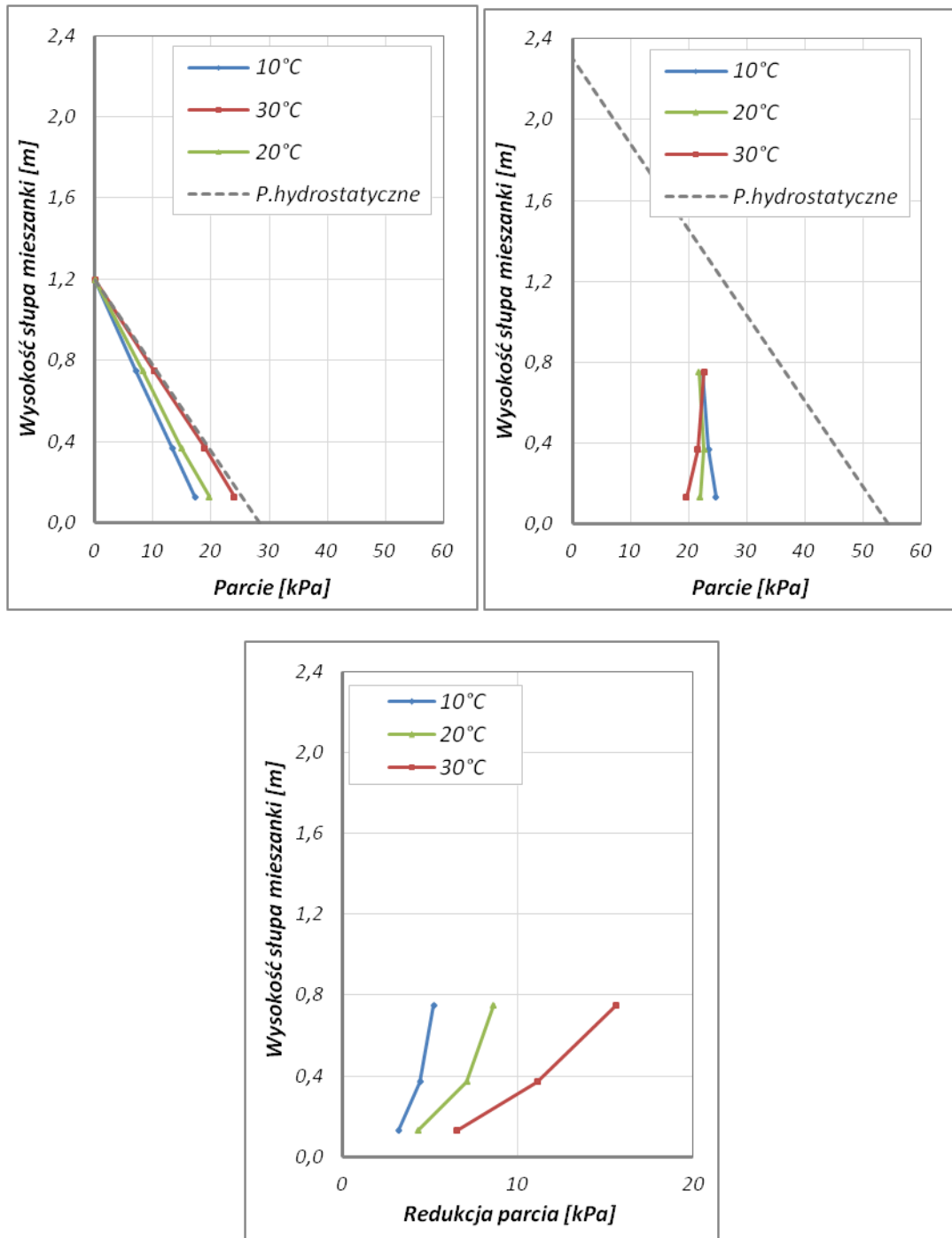
Wpływ temperatury na parcie samozagęszczalnych mieszanek betonowych określono dla mieszanek, w których wykorzystano superplastyfikator SP 1. Mieszanki te jak wykazały badania prezentowane w paragrafie 4.3.2.2 charakteryzowały się największym wzrostem statycznej granicy płynięcia g_s w czasie 40 minut od wymieszania.

Tablica 45. Wyniki badań parcia mieszanek betonowych o $w/c=0,3$ na deskowania słupa w różnych temperaturach

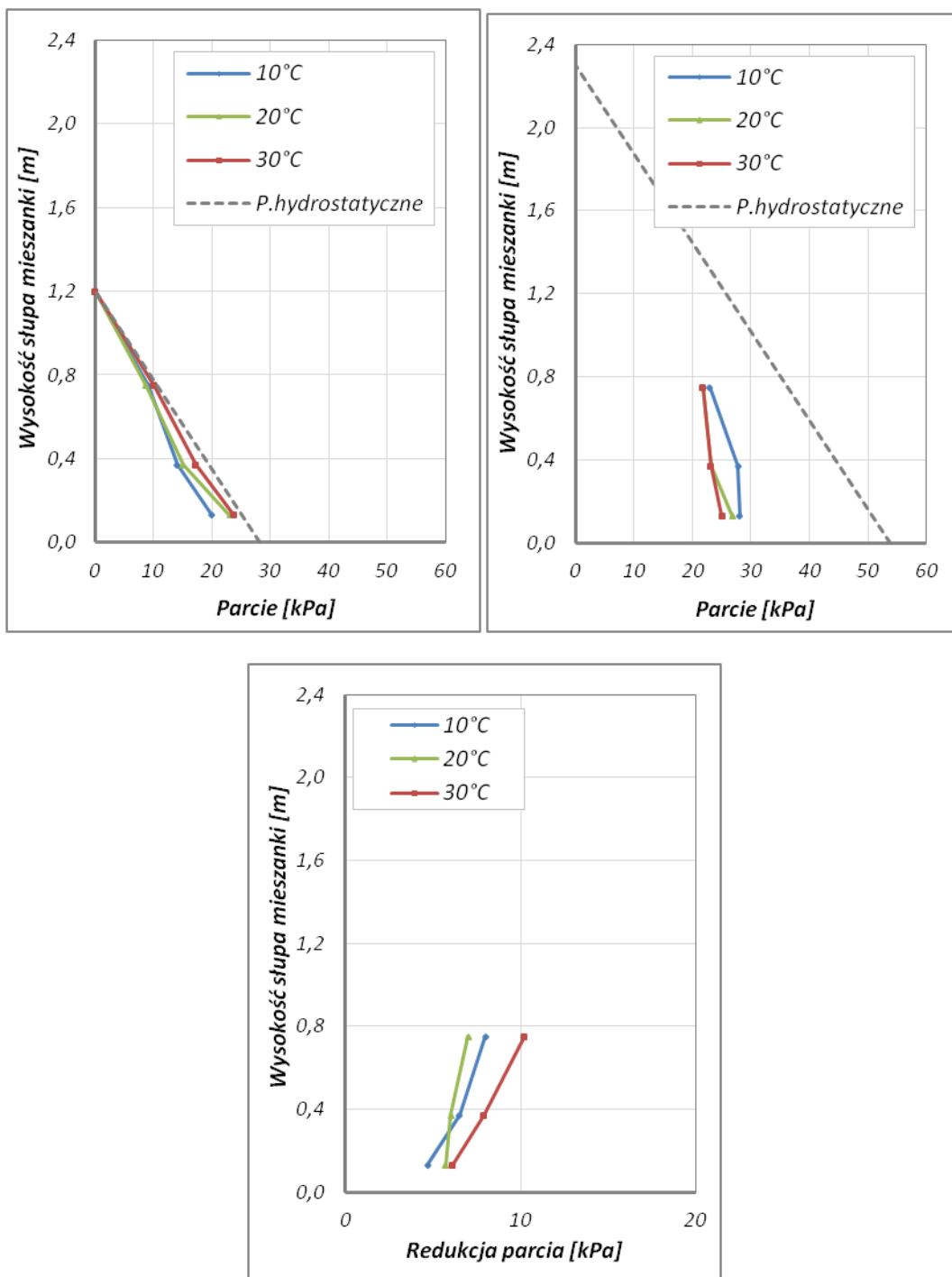
Mieszanka	Etap betonowania	Temperatura 10°C			Temperatura 20°C			Temperatura 30°C		
		Rzędne czujników - etap betonowania								
		-1,07	-0,83	-0,45	-1,07	-0,83	-0,45	-1,07	-0,83	-0,45
		Rzędne czujników - etap dociążania								
		-2,16	-1,92	-1,54	-2,16	-1,92	-1,54	-2,16	-1,92	-1,54
CEM I; SP1; $w/c=0,3$	KB	17,2	13,3	7,0	19,7	14,9	8,2	24,0	18,9	10,2
	KO	24,8	23,5	22,5	16,8	17,7	16,8	14,7	12,6	9,7
	KO+20'	19,6	19,1	18,3	14,7	15,6	13,2	13,2	10,5	7,1
CEM III; SP1; $w/c=0,3$	KB	20,0	14,1	9,1	23,1	15,1	8,8	23,8	17,3	10,1
	KO	30,1	27,8	23,0	23,8	23,2	21,8	25,0	21,1	15,8
	KO+20'	19,4	14,8	12,6	21,1	21,3	20,0	10,9	6,2	7,6
CEM V; SP1; $w/c=0,3$	KB	21,0	18,4	11,4	23,7	17,7	11,2	23,2	17,1	10,4
	KO	39,3	34,3	27,8	30,8	28,2	22,3	22,6	23,3	21,0
	KO+20'	30,9	25,7	20,9	23,0	22,1	18,4	21,3	17,4	14,7

Tablica 46. Wyniki badań parcia mieszanek betonowych o $w/c=0,4$ na deskowania słupa w różnych temperaturach

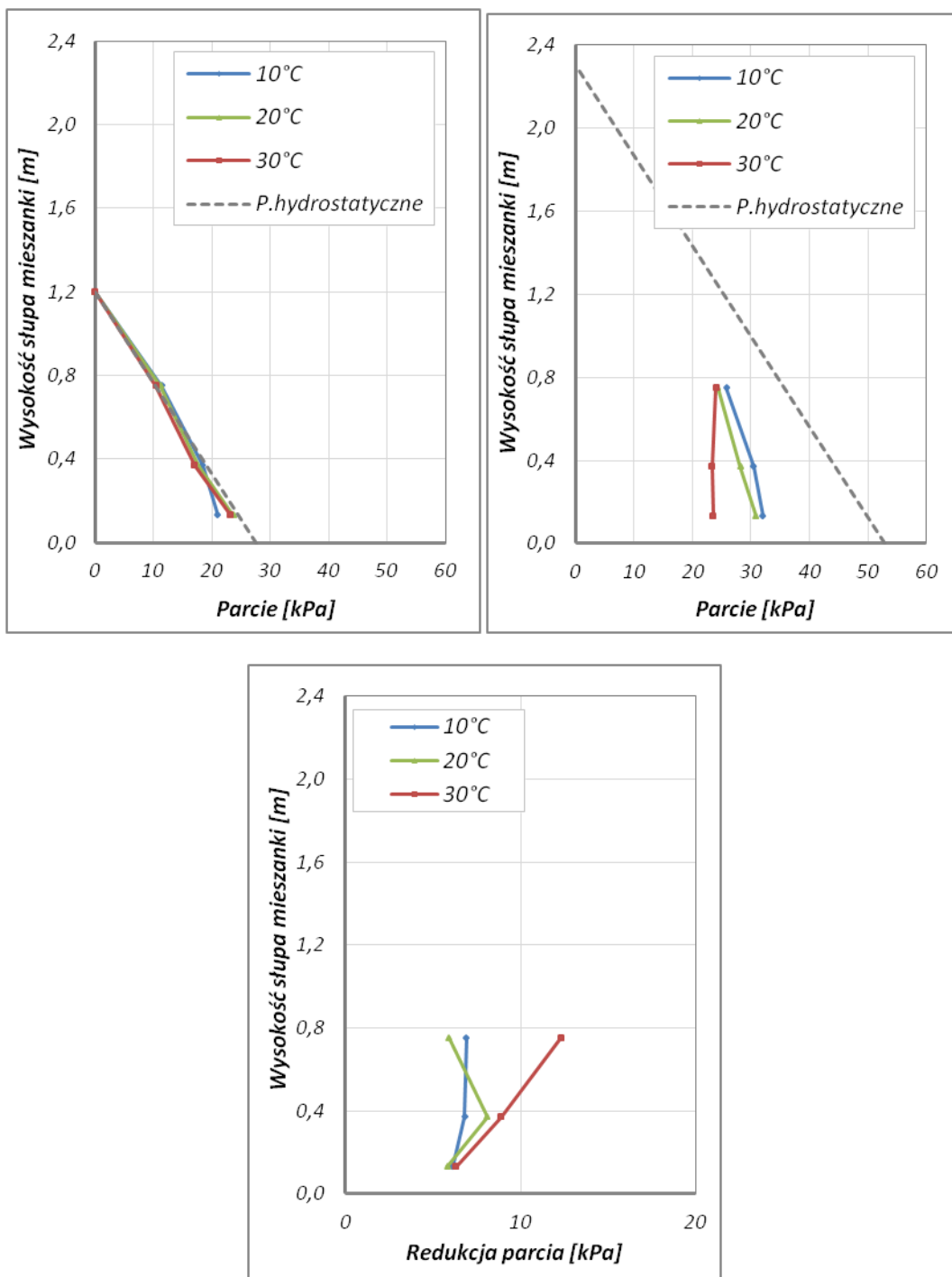
Mieszanka	Etap betonowania	Temperatura 10°C			Temperatura 20°C			Temperatura 30°C		
		Rzędne czujników - etap betonowania								
		-1,07	-0,83	-0,45	-1,07	-0,83	-0,45	-1,07	-0,83	-0,45
		Rzędne czujników - etap dociążania								
		-2,16	-1,92	-1,54	-2,16	-1,92	-1,54	-2,16	-1,92	-1,54
CEM I; SP1; $w/c=0,4$	KB	16,0	14,3	10,0	18,4	15,3	9,5	22,1	17,5	10,6
	KO	26,0	27,0	27,0	22,1	23,6	25,2	22,9	20,8	16,6
	KO+20'	20,8	22,6	22,8	15,0	17,8	19,4	21,4	18,7	14,0
CEM III; SP1; $w/c=0,4$	KB	17,7	15,4	8,4	22,3	16,4	9,4	23,6	17,9	8,8
	KO	23,1	27,3	29,4	18,2	20,4	22,2	22,1	18,7	15,9
	KO+20'	18,4	21,1	21,0	11,2	12,0	13,9	17,9	16,3	14,9
CEM V; SP1; $w/c=0,4$	KB	18,3	16,5	9,8	20,1	14,5	8,1	22,3	17,1	8,8
	KO	27,7	28,5	26,1	17,9	18,1	19,6	15,2	12,6	10,2
	KO+20'	19,7	17,3	17,8	13,5	14,4	16,9	13,9	6,7	3,9



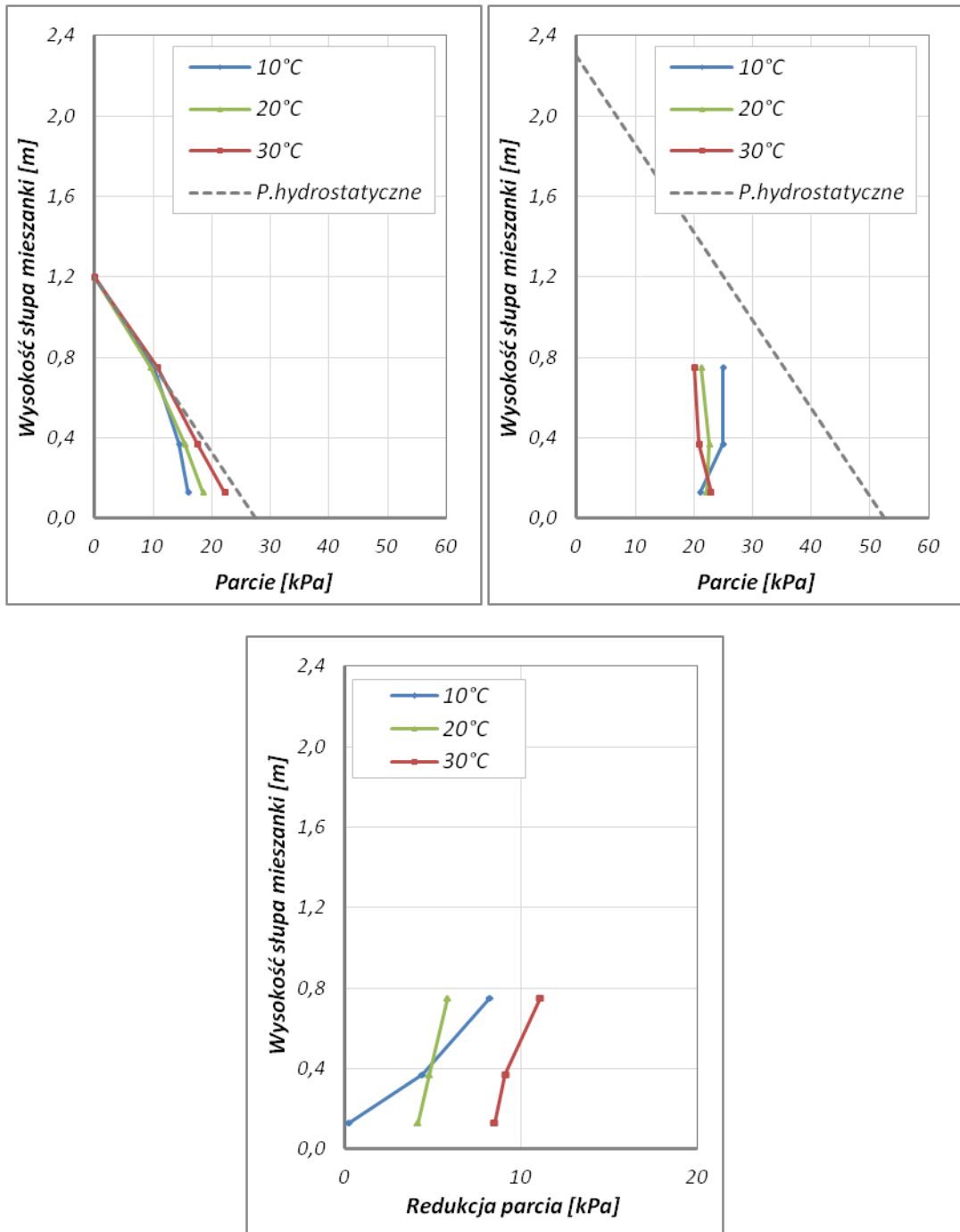
Rys. 114. Wpływ temperatury na parcie na ściany deskowania mieszanek z CEM I 42,5 R w/c=0,3 po zakończeniu betonowania na wysokość 1,2m, 2,3m (u góry). Redukcja parcia po 20 minutach od zakończenia betonowania na wysokość 2,3m (u dołu)



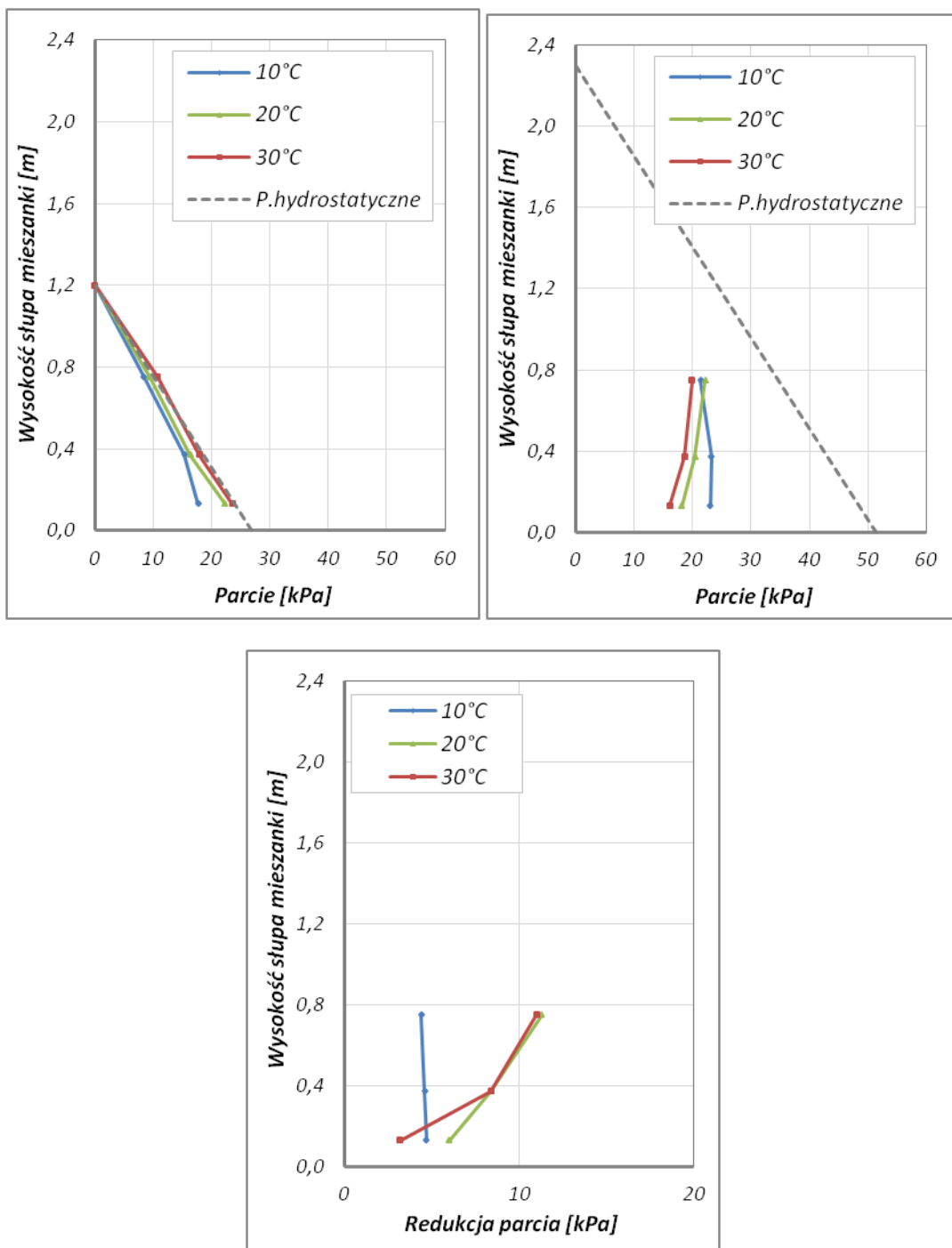
Rys. 115. Wpływ temperatury na parcie na ściany deskowania mieszanek z CEM III/A 42,5 N w/c=0,3 po zakończeniu betonowania na wysokość 1,2m, 2,3m (u góry). Redukcja parcia po 20 minutach od zakończenia betonowania na wysokość 2,3m (u dołu)



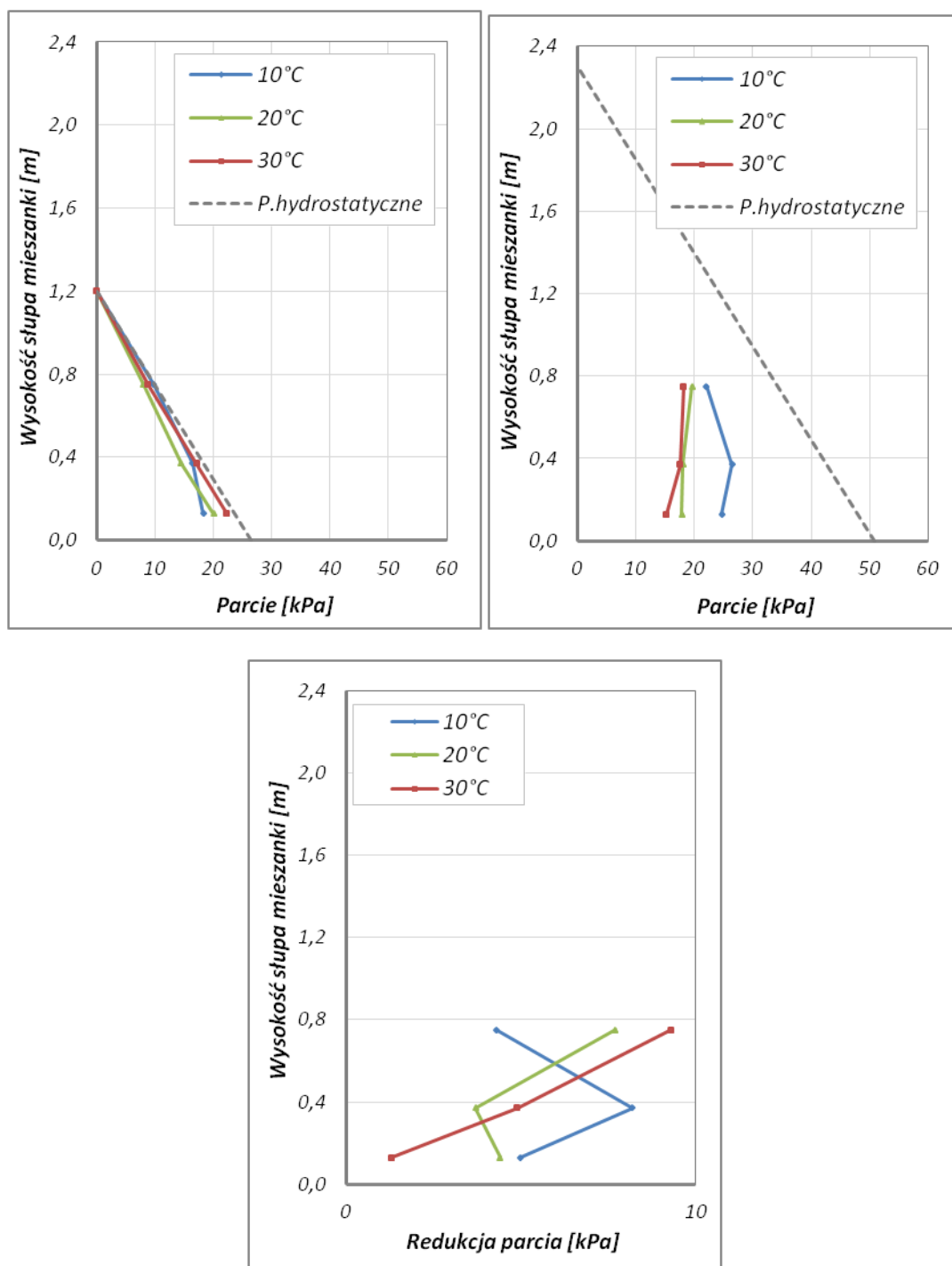
Rys. 116. Wpływ temperatury na parcie na ściany deskowania mieszanek z CEM V/A (S-V) 32,5 R w/c=0,3 po zakończeniu betonowania na wysokość 1,2m, 2,3m (u góry). Redukcja parcia po 20 minutach od zakończenia betonowania na wysokość 2,3m (u dołu)



Rys. 117. Wpływ temperatury na parcie na ściany deskowania mieszanek z CEM I 42,5 R w/c=0,4 po zakończeniu betonowania na wysokość 1,2m, 2,3m (u góry). Redukcja parcia po 20 minutach od zakończenia betonowania na wysokość 2,3m (u dołu)



Rys. 118. Wpływ temperatury na parcie na ściany deskowania mieszanek z CEM III/A 42,5 N w/c=0,4 po zakończeniu betonowania na wysokość 1,2m, 2,3m (u góry). Redukcja parcia po 20 minutach od zakończenia betonowania na wysokość 2,3m (u dołu)



Rys. 119. Wpływ temperatury na parcie na ściany deskowania mieszanek z CEM V/A (S-V) 32,5 R w/c=0,4 po zakończeniu betonowania na wysokość 1,2m, 2,3m (u góry). Redukcja parcia po 20 minutach od zakończenia betonowania na wysokość 2,3m (u dołu)

W początkowym etapie betonowania do osiągnięcia wysokości słupa 1,2 m obciążenie wzrasta proporcjonalnie do wysokości słupa mieszanki, jest największe w najniższej położonych przekrojach deskowania. Zmienia się od 17,0 do 23,8 kPa (od 69% do 94% parcia z warunku hydrostatycznego) zależąc od temperatury i stosunku w/c mieszanki. Po zakończeniu betonowania na wysokość 1,2 m parcie jest tym wyższe im wyższa jest temperatura i jest mniejsze dla mieszanek o wyższym w/c. Kontynuowanie betonowania

na wysokość 2.3 m powoduje zwykle wzrost parcia na deskowania, ale wzrost ten nie jest wprost proporcjonalny do wysokości betonowania. Parcie na deskowania mieszanki BSZ jest na tym etapie betonowania nadal tym mniejsze im większy stosunek w/c, przy czym wpływ stosunku w/c jest teraz znacznie silniejszy. Zmienia się natomiast charakter wpływu temperatury mieszanki na parcie na deskowania. Na poziomie wszystkich czujników, a więc w dolnej części elementu największe parcie na deskowania wywiera mieszanka o najniższej temperaturze, a parcie maleje wraz ze wzrostem temperatury. Jest więc teraz ono odwrotnie proporcjonalne do temperatury mieszanki. Ciśnienie na poziomie najniżej położonego czujnika w temperaturze 30°C jest mniejsze, w temperaturze 20 °C minimalnie wyższe a w 10°C wyraźnie większe niż było po zakończeniu betonowania na wysokość 1.2 m. Parcie na poziomie czujnika 2 i 3 zwiększa się podczas betonowania a po jego zakończeniu jest bliskie a czasem większe od parcia rejestrowanego na poziomie czujnika 1. Maksymalne obserwowane parcie na poziomie czujnika 1 ma wielkość 39,3kPa jest to 48 % parcia obliczonego z warunku hydrostatycznego. Na poziomie czujników 2 i 3 wielkości parcia również są mniejsze niż parcie określone z warunku hydrostatycznego. Zawiera się w granicach 69-71% parcia hydrostatycznego. Jest widoczne, że zakres zmian parcia na deskowania w zależności od temperatury mieszanki (i jej składu) jest duży, jednak odnotowane maksymalne parcie jest znacznie mniejsze od tego określonego z warunku hydrostatycznego.

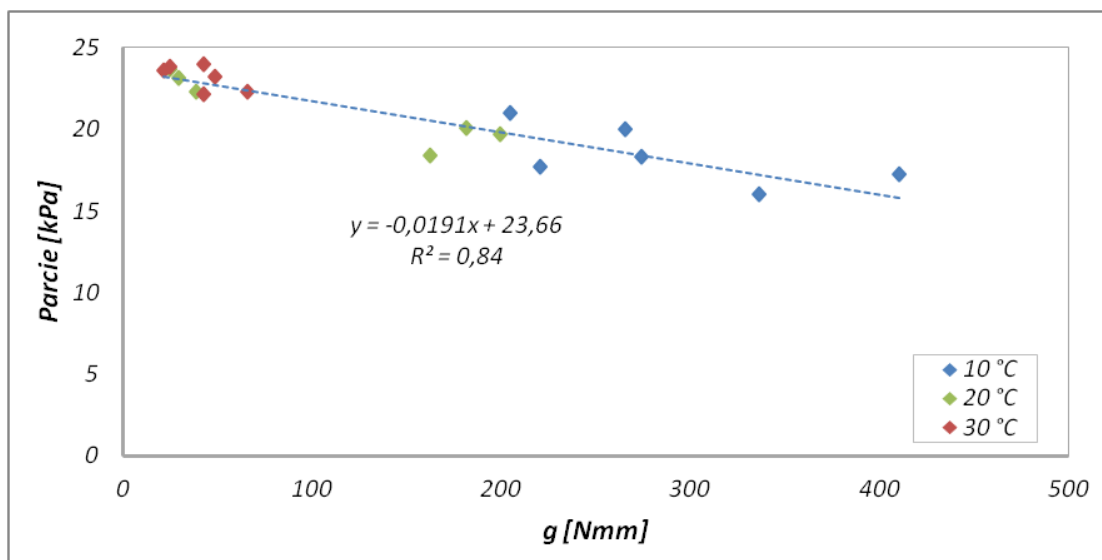
Parcie na deskowania w początkowym okresie wzrasta wraz ze wzrostem temperatury. Parcie mieszanek w temperaturze 30°C jest bliskie parciu hydrostatycznemu, parcie w temperaturze 10 °C jest o 15 – 20% mniejsze niż w temperaturze 20 °C. Z upływem czasu parcie mieszanki na deskowanie się zmniejsza. Redukcja ta jest zależna od temperatury co jest związane z wpływem temperatury na właściwości reologiczne mieszanek. Mieszanki w wyższych temperaturach ulegają przyspieszonemu sztywnieniu, co jest widoczne we wpływie temperatury na statyczną granicę płynięcia, która jest zawsze największa w temperaturze 30 °C. Redukcja obciążenia wywieranego przez mieszanki na deskowanie jest w tej temperaturze największa. Statyczna granica płynięcia mieszanek o temperaturze 10 °C jest zawsze najniższa, to powoduje, że redukcja parcia w tej temperaturze jest również najmniejsza.

Uzyskane wyniki badań wskazują na bardzo istotny wpływ temperatury na parcie mieszanki betonu samozagęszczalnego na deskowania. Zmiany temperatury mieszanki mogą prowadzić do znacznych zmian parcia, przy czym szczególne znaczenie ma obniżenie temperatury, gdyż wtedy tendencja do budowy stabilnej struktury jest najmniejsza. Możliwy jest wtedy znaczący wzrost parcia w najbardziej wyęzonych fragmentach deskowania spowodowany kolejnymi etapami betonowania.

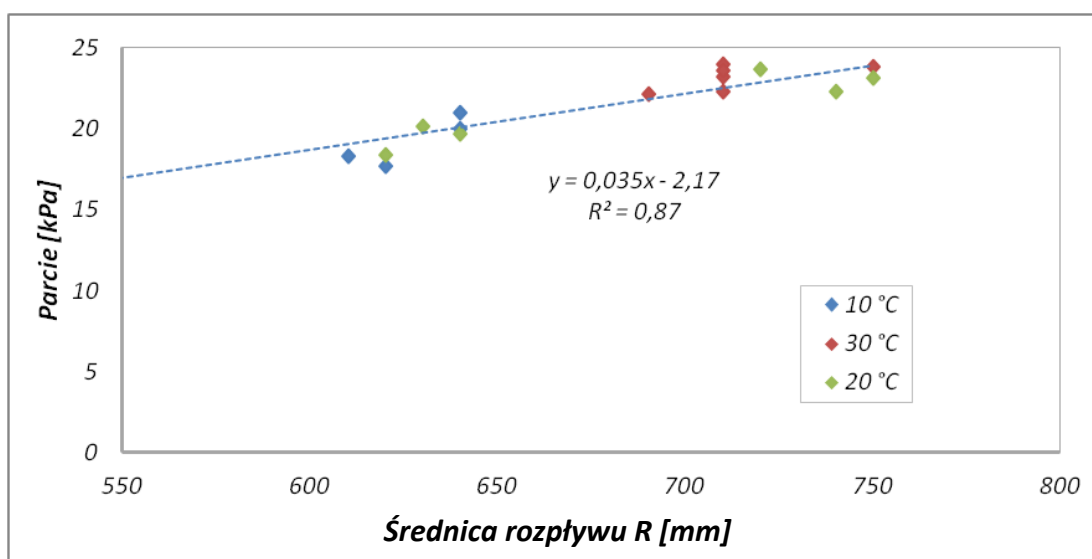
4.4.6 PARAMETRY REOLOGICZNE MIESZANKI A WYWIERANE PRZEZ NIĄ PARCIE NA DESKOWANIE PIONOWE

Wykresy na rys. 120 i 121 wskazują na silną zależność wywieranego parcia od granicy płynięcia, a w konsekwencji średnicy rozpląwu mieszanki. Relacje te są zgodne co do zasady z zależnościami uzyskanymi na większej populacji prób. Parcie maleje wraz z

wzrostem granicy płynięcia g , im większa średnica rozplywu mieszanki tym większe przez nią wywierane parcie na deskowanie.



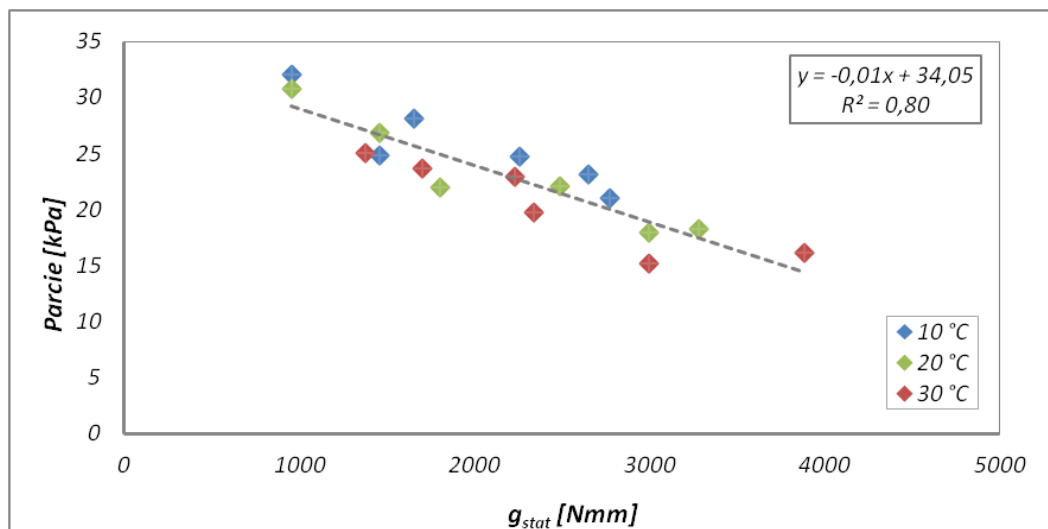
Rys. 120. Zależność parcia mieszanek BSZ na ściany deskowania od ich granicy płynięcia g



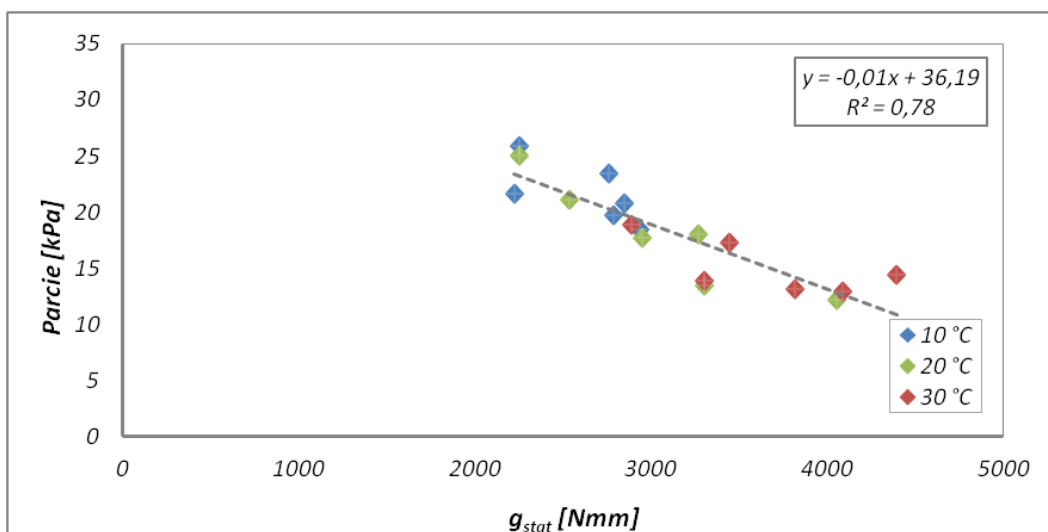
Rys. 121. Zależność parcia mieszanek BSZ na ściany deskowania od średnicy rozplywu R

Po zakończeniu betonowania, kiedy mieszanka nie jest poddawana żadnym prócz ciężaru własnego obciążeniom, rozpoczyna się proces jej sztywnienia, który skutkuje redukcją obciążenia deskowania. Ze względu na to, że mieszanka pozostaje w spoczynku to wielkością, która będzie określała parcie w tym momencie może być statyczna granica płynięcia g_s . Wyniki badań przedstawione na rys. 122 i 123 to potwierdzają. Statyczne granice płynięcia określone zostały po 20 i 40 minutach od rozpoczęcia mieszania. Próbkki do badań były pozostawione w spoczynku co ma symulować mieszankę znajdującą się w słupie. Próbkki badane po 20 minutach spoczynku charakteryzują mieszankę w słupie w chwili, gdy następował koniec symulowanego betonowania na wysokość 2,3 m.

Realizowano to za pomocą obciążania słupa mieszanki w deskowaniu ekwiwalentem masowym mieszanki betonowej. Obciążenie przykładano tak by zachować ustaloną prędkość betonowania 7 m/h. Nie znaleziono korelacji pomiędzy wynikami testów technicznych uzyskanych dla mieszanek pozostawionych w spoczynku w stożku rozplywu, a statyczną granicą płynięcia czy wskaźnikiem tiksotropii.

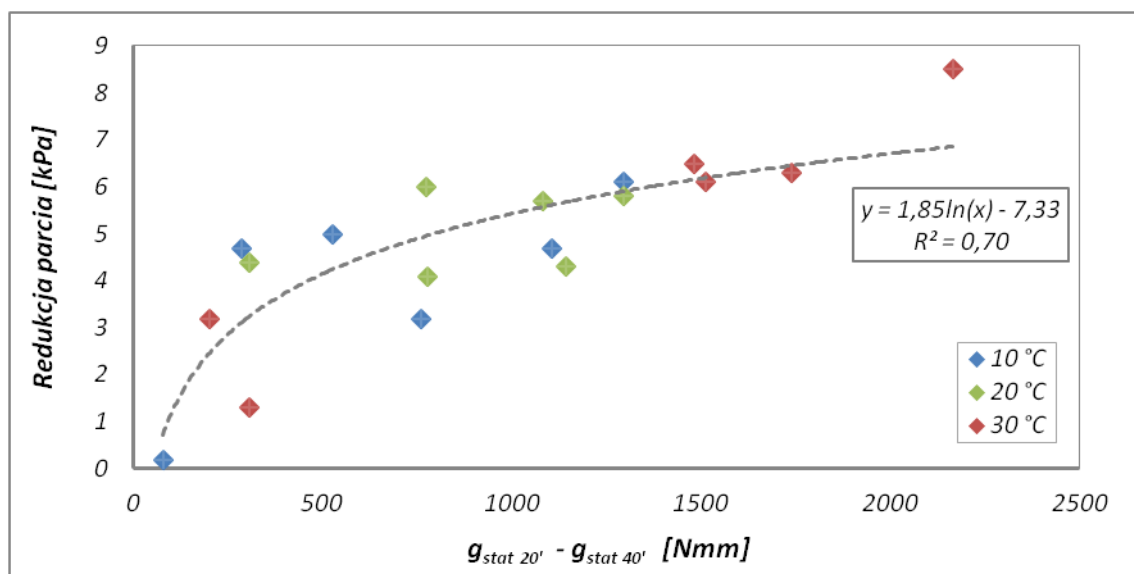


Rys. 122. Zależność parcia mieszanki BSZ na ściany deskowania od statycznej granicy płynięcia po zakończeniu betonowania na wysokość 2,3 m



Rys. 123. Zależność parcia mieszanki BSZ na ściany deskowania od statycznej granicy płynięcia po 20 minutach od zakończenia betonowania na wysokość 2,3 m.

Wraz ze wzrostem statycznej granicy płynięcia mieszanki maleje obciążenie jakie wywiera ona deskowanie. Z relacji pomiędzy statycznymi granicami płynięcia określonymi w 20 i 40 minucie, można wnioskować o tendencji do redukcji parcia (rys 124). Redukcja parcia wywieranego na deskowanie w jakimś określonym przedziale czasowym będzie tym większa im większy będzie wzrost statycznej granicy płynięcia obserwowany w tym czasie.



Rys. 124. Zależność redukcji parcia mieszanek BSZ na ściany deskowania od wzrostu ich statycznej granicy płynięcia g_s

Styczne i dynamiczne granice płynięcia są najmocniejszymi determinantami parcia mieszanek na deskowanie. Określenie statycznych i dynamicznych wymaga wyspecjalizowanych i kosztownych reometrów, dlatego niezwykle cenna jest zależność wiążąca parcie mieszanki z jej średnicą rozplywu.

Wskaźnik tiksotropii w prezentowanej populacji prób nie wykazał przydatności do prognozowania parcia i/lub jego redukcji. Wskaźnik A_T przyjęło się wiązać z efektem odwracalnego sztywnienia. Im będzie większy to mieszanka będzie miała zdolność do budowy sztywnej struktury, która będzie nietrwała. Wskaźnik będzie tym większy im większy będzie opór stawiany przez mieszankę podczas zwiększania jej obciążenia i im mniejszy będzie opór, gdy obciążenie mieszanki będzie zmniejszane. Mały opór podczas zmniejszania obciążenia mieszanki jest właściwy dla mieszanek o małej lepkości i granicy płynięcia. Duży opór podczas zwiększania obciążenia charakteryzuje mieszanki zdolne do wytworzenia sztywnej struktury. Za zdolność tę odpowiadać mogą następujące mechanizmy:

- Tiksotropowe sztywnienie ze swej natury odwracalne
- Wzrost spójności mieszanki spowodowany segregacją i wpływem wody na powierzchnię mieszanki.
- Utrata urabialności mieszanki

W przypadku dwóch pierwszych metodyka pomiaru przedstawiona w paragrafie 4.1.3 pozwala uzyskać wyniki mogące korelować z redukcją parcia, ale ta redukcja może być niestabilna z uwagi na odwracalność tiksotropowego sztywnienia. Za tiksotropowe sztywnienie zaczynów cementowych odpowiada budowa struktury przez ziarna i produkty hydratacji cementu i zaadsorbowanej domieszki. Łańcuchy boczne zaadsorbowanej domieszki mogą się łączyć z odpowiednimi pod względem potencjału powierzchniami lub mogą być mostkowane np. jonami wapnia. Tworzy się wtedy

struktura, której obecność jest możliwa do wychwycenia testem reologicznym. Podczas ponownego mieszania mieszanki przestrzenna sieć ulega zniszczeniu i mieszanka się upłynnia.

Sztywnienie wywołane wzrostem spójności również jest odwracalne podczas testu reometrycznego – woda, która wypływa na powierzchnię podczas spoczynku mieszanki podczas ponownego mieszania z powrotem upłynnia mieszankę. Mieszanki z nadmierną tendencją do bleedingu trzeba uznać za wadliwe, niemniej jednak mogą posiadać korzystną właściwość redukcji wywieranego parcia. W warunkach budowy redukcja parcia powinna mieć trwały charakter, ponieważ woda migrująca na powierzchnię, nie ma możliwości ponownego upłynnienia mieszanki. Efekty tiksotropowego sztywnienia i sztywnienia spowodowanego wzrostem spójności mogą występować jednocześnie.

Zmniejszenie parcia wywołane zmniejszeniem urabialności – wzrostem granicy płynięcia nie będzie możliwe do określenia poprzez wielkość wskaźnika A_T . W przypadku takich mieszanek krzywe płynięcia określone dla rosnących i malejących obciążeń mieszanki mogą się pokrywać lub przebiegać bardzo blisko siebie, a to sprawia że wskaźnik A_T jest relatywnie nie wielki.

Redukcja parcia może być skutkiem działania różnych efektów, a tylko na niektóre z nich jest czuły wskaźnik A_T . To może być powodem, dla którego nie znaleziono korelacji pomiędzy wskaźnikiem A_T a wielkością czy redukcją parcia mieszanki na ściany deskowania.

4.5 WŁAŚCIWOŚCI REOLOGICZNE ZAPRAW MODELOWYCH A WŁAŚCIWOŚCI MIESZANEK BETONOWYCH BLOK IV

Wspominaną wcześniej znaczną pracochłonność przy badaniu wpływu temperatury na właściwości reologiczne mieszanek betonowych można znacznie zmniejszyć określając wpływ temperatury na właściwości reologiczne zapraw. Dzięki czemu można zbadać więcej układów domieszka – spoiwo i wybrać ten, którego właściwości reologiczne są najbardziej stabilne w zmiennej temperaturze, sprawdzając dodatkowo czy uzyskany efekt powtórzy się na mieszance betonowej. Wyniki badań przedstawione i analizowane w tym rozdziale dotyczą zapraw, których skład jest wynikiem korekty składu zapraw wchodzących w skład mieszanek badanych w bloku III. Korekta została przeprowadzona według metodyki przedstawionej w podrozdziale 2.5. Czynniki zmienne – temperatura czas, w/c, rodzaj domieszki upłynniającej i rodzaj cementu w przypadku badań zapraw i mieszanek betonowych są takie same. Tablice 47 i 48 przedstawiają składy zapraw, Tablice 49-54 przedstawiają parametry reologiczne zapraw, badane według procedur przedstawionych w paragrafie 4.1.3. Mieszanki zapraw badane były bezpośrednio po wymieszaniu (5'), po 20 i 40 minutach spoczynku oraz po ponownym wymieszaniu w 80 minucie.

Tablica 47 Skład skorygowanych zapraw z samozagęszczalnych mieszanek betonowych o w/c =0,3

	CEM I 42,5 R		CEM III/A 42,5N- HSR/NA		CEM V/A(S-V) 32,5R-LH	
	SP 1	SP2	SP1	SP2	SP1	SP2
Superplastyfikator	SP 1	SP2	SP1	SP2	SP1	SP2
Superplastyfikator, % m.c	3,0	2,0	1,75	1,0	2,5	2,0
Superplastyfikator, kg	23,1	15,6	13,5	7,8	18,7	15,1
Cement, kg	770	779	771	779	748	753
Woda, kg	231	234	231	233	224	226
Piasek 0-2, kg	1320	1326	1323	1325	1326	1325
Objętość zaczynu cementowego, dm ³	501	500	501	501	501	501

Tablica 48. Skład skorygowanych zapraw z samozagęszczalnych mieszanek betonowych o w/c =0,4

	CEM I 42,5 R		CEM III/A 42,5N- HSR/NA		CEM V/A(S-V) 32,5R-LH	
	SP 1	SP2	SP1	SP2	SP1	SP2
Superplastyfikator	SP 1	SP2	SP1	SP2	SP1	SP2
Superplastyfikator, % m.c	1	0,75	0,75	0,5	1,5	0,75
Superplastyfikator, kg	6,8	5,1	5,1	3,4	9,9	5,0
Cement, kg	684	686	676	678	658	664
Woda, kg	274	275	270	271	263	265
Piasek 0-2, kg	1325	1324	1324	1323	1325	1325
Objętość zaczynu cementowego, dm ³	501	501	501	501	501	500

Tablica 49. Wyniki badań dynamicznych i statycznych właściwości reologicznych zapraw z cementem portlandzkim CEM I 42,5 R o w/c=0,3

Cement		CEM I 42,5 R							
w/c		0,3							
Superplastyfikator		SP1				SP2			
Czas [min]		5	20	40	80	5	20	40	80
g [Nmm]	10 °C	36,8	20,1	17,0	14,0	16,0	3,0	4,0	6,9
	20 °C	10,9	11,3	11,6	12,6	3,9	5,2	6,1	9,7
	30 °C	6,9	8,0	10,4	17,2	2,9	6,1	7,4	28,9
h [Nmms]	10 °C	53,4	57,7	62,7	56,4	64,5	64,7	68,7	67,4
	20 °C	52,4	54,2	57,9	58,3	54,6	60,2	64,5	62,4
	30 °C	52,1	57,6	60,5	58,1	58,7	61,2	60,3	62,0
gs [Nmm]	10 °C	45,0	95,8	144,0	24,8	99,9	127,8	147,1	9,9
	20 °C	35,3	140,0	191,2	15,0	58,0	181,0	216,8	39,7
	30 °C	59,2	172,2	280,9	45,9	44,0	133,0	196,0	16,2
AT [Nmm/s]	10 °C	52,3	121,6	134,6	33,7	75,6	136,0	138,7	56,2
	20 °C	60,9	81,1	88,0	67,0	86,0	157,3	309,7	95,1
	30 °C	44,7	116,3	123,8	41,0	171,0	127,3	138,8	102,1

Tablica 50. Wyniki badań dynamicznych i statycznych właściwości reologicznych zapraw z cementem portlandzkim CEM I 42,5 R, o w/c=0,4

Cement		CEM I 42,5 R							
w/c		0,4							
Superplastyfikator		SP1				SP2			
Czas [min]		5	20	40	80	5	20	40	80
g [Nmm]	10 °C	15,9	7,9	9,1	9,2	18,9	15,0	17,5	9,9
	20 °C	12,0	14,4	14,3	11,8	8,0	7,9	8,3	10,4
	30 °C	3,9	5,3	7,4	10,9	7,3	8,9	17,2	28,7
h [Nmms]	10 °C	23,0	20,6	20,1	21,7	17,9	28,1	29,8	22,3
	20 °C	20,0	19,9	21,3	16,9	15,9	17,1	19,9	18,4
	30 °C	18,7	19,1	22,3	16,4	19,8	23,3	29,9	26,1
gs [Nmm]	10 °C	51,0	179,6	184,7	12,7	131,0	163,0	171,0	12,0
	20 °C	67,4	161,5	211,9	24,4	54,0	75,8	99,3	45,1
	30 °C	91,9	153,8	229,5	44,9	26,9	26,3	68,5	24,7
AT [Nmm/s]	10 °C	70,3	132,1	24,3	16,8	72,9	117,8	74,0	7,1
	20 °C	26,4	90,4	34,1	13,0	44,5	98,8	52,8	6,3
	30 °C	23,5	90,5	41,1	19,4	24,7	88,1	55,7	33,9

Tablica 51. Wyniki badań dynamicznych i statycznych właściwości reologicznych zapraw z cementem hutniczym CEM III/A 42,5 N o w/c=0,3

Cement		CEM III/A 42,5 N							
w/c		0,3							
Superplastyfikator		SP1				SP2			
Czas [min]		5	20	40	80	5	20	40	80
g [Nmm]	10 °C	14,2	7,9	9,0	8,0	10,9	4,2	7,9	10,4
	20 °C	2,3	4,2	6,0	2,5	1,0	3,0	3,5	1,4
	30 °C	2,0	2,9	3,2	5,9	1,0	1,8	1,9	15,0
h [Nmms]	10 °C	101,0	97,0	99,6	81,9	96,1	105,9	102,5	106,4
	20 °C	87,0	85,7	93,2	84,2	88,8	92,9	94,0	89,3
	30 °C	69,1	71,1	62,5	85,4	71,4	80,0	81,1	91,3
g _s [Nmm]	10 °C	42,8	81,2	243,7	14,3	87,3	92,6	98,4	15,1
	20 °C	67,9	80,9	141,0	14,0	97,3	126,0	139,0	11,0
	30 °C	77,9	76,4	176,3	4,2	109,8	101,2	188,0	14,0
AT [Nmm/s]	10 °C	39,7	149,0	126,2	63,5	135,5	186,1	156,4	81,9
	20 °C	95,0	123,0	139,6	39,6	102,7	196,0	205,8	66,0
	30 °C	62,0	82,0	85,0	104,4	78,7	195,8	202,9	129,0

Tablica 52. Wyniki badań dynamicznych i statycznych właściwości reologicznych zapraw z cementem hutniczym CEM III/A 42,5 N o w/c=0,4

Cement		CEM III/A 42,5 N							
w/c		0,4							
Superplastyfikator		SP1				SP2			
Czas [min]		5	20	40	80	5	20	40	80
g [Nmm]	10 °C	13,8	8,4	6,8	6,1	14,0	8,0	5,8	13,8
	20 °C	3,4	7,8	11,5	15,2	9,0	9,0	14,0	3,4
	30 °C	2,8	6,2	7,1	22,8	1,0	1,0	5,0	2,8
h [Nmms]	10 °C	36,8	31,9	33,2	29,7	40,0	38,4	40,4	36,8
	20 °C	21,4	22,4	22,3	16,3	23,8	24,7	28,9	21,4
	30 °C	16,4	17,0	17,8	20,7	22,4	23,2	26,2	16,4
g _s [Nmm]	10 °C	104,1	208,5	215,8	12,4	85,5	136,2	149,0	104,1
	20 °C	77,1	182,1	208,4	62,6	118,8	114,4	174,5	77,1
	30 °C	106,7	215,9	227,1	11,1	132,7	179,2	204,5	106,7
AT [Nmm/s]	10 °C	53,4	63,9	65,2	24,1	103,9	166,3	147,5	53,4
	20 °C	11,3	80,3	24,7	3,4	20,5	89,8	32,2	11,3
	30 °C	12,1	60,1	20,4	10,8	63,1	78,1	131,8	12,1

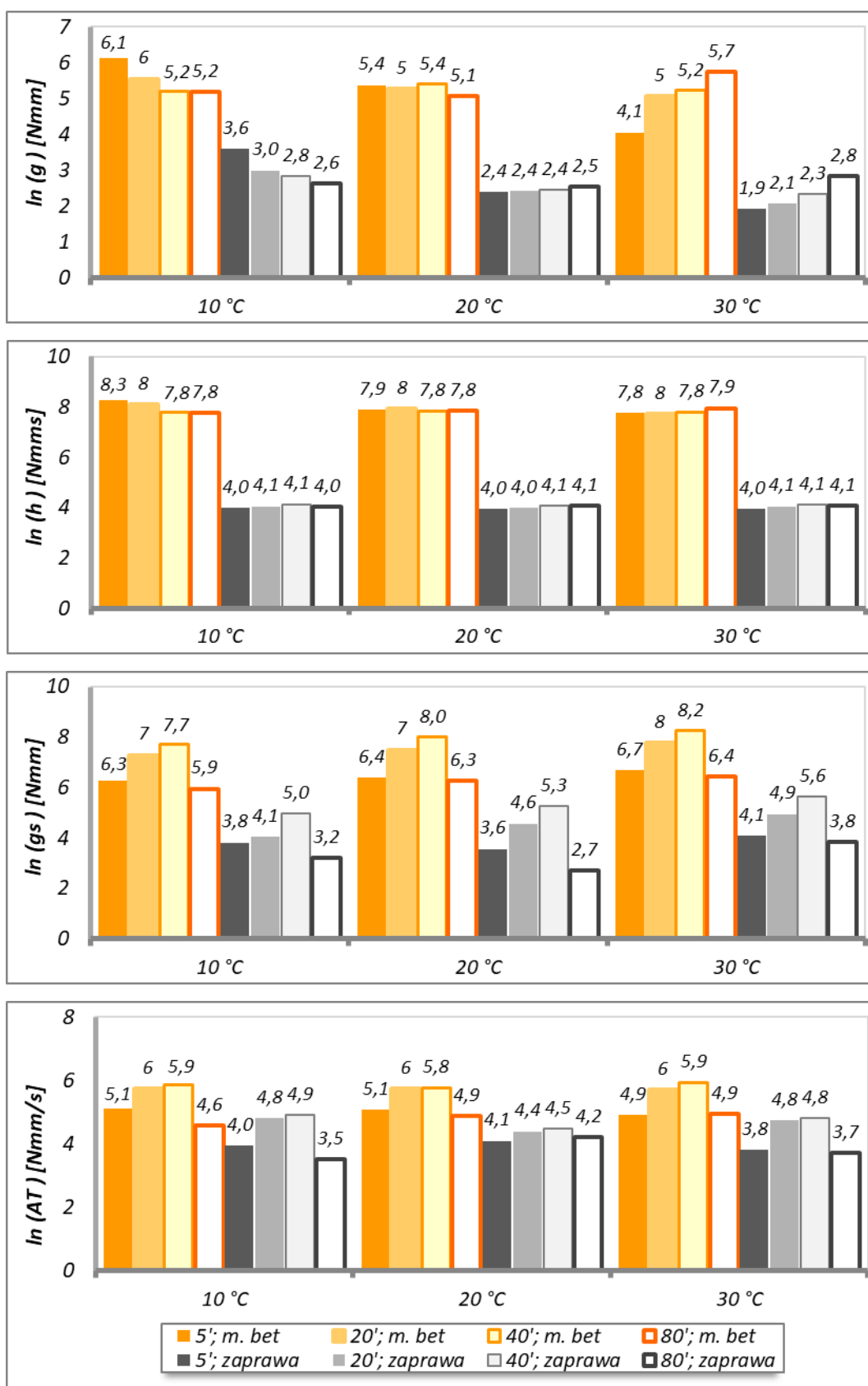
Tablica 53. Wyniki badań dynamicznych i statycznych właściwości reologicznych zapraw z cementem wieloskładnikowym CEM V/A (S-V) 32,5 R, o w/c=0,3

Cement		CEM V/A (S-V) 32,5 R							
w/c		0,3							
Superplastyfikator		SP1				SP2			
Czas [min]		5	20	40	80	5	20	40	80
g [Nmm]	10 °C	12,5	11,3	7,8	9,7	22,9	15,0	18,1	12,3
	20 °C	1,5	4,2	7,5	6,9	4,6	5,1	6,0	6,0
	30 °C	1,8	2,8	4,8	5,6	3,8	3,4	3,3	4,4
h [Nmms]	10 °C	85,7	68,0	64,8	69,1	82,8	70,9	69,7	81,6
	20 °C	68,3	61,6	65,0	49,4	63,9	67,6	68,3	70,1
	30 °C	55,4	53,1	56,7	48,2	59,7	51,8	51,3	58,7
g _s [Nmm]	10 °C	37,8	75,2	177,2	14,5	65,1	131,9	154,0	4,5
	20 °C	29,6	83,0	150,0	26,1	54,3	151,1	188,9	26,8
	30 °C	37,3	152,4	285,3	15,3	22,3	172,4	214,6	2,8
AT [Nmm/s]	10 °C	125,7	211,5	171,3	112,9	136,7	204,2	152,0	99,3
	20 °C	151,3	195,3	267,0	144,4	115,3	182,7	203,2	48,4
	30 °C	96,5	159,4	124,7	70,4	115,6	151,4	137,8	71,6

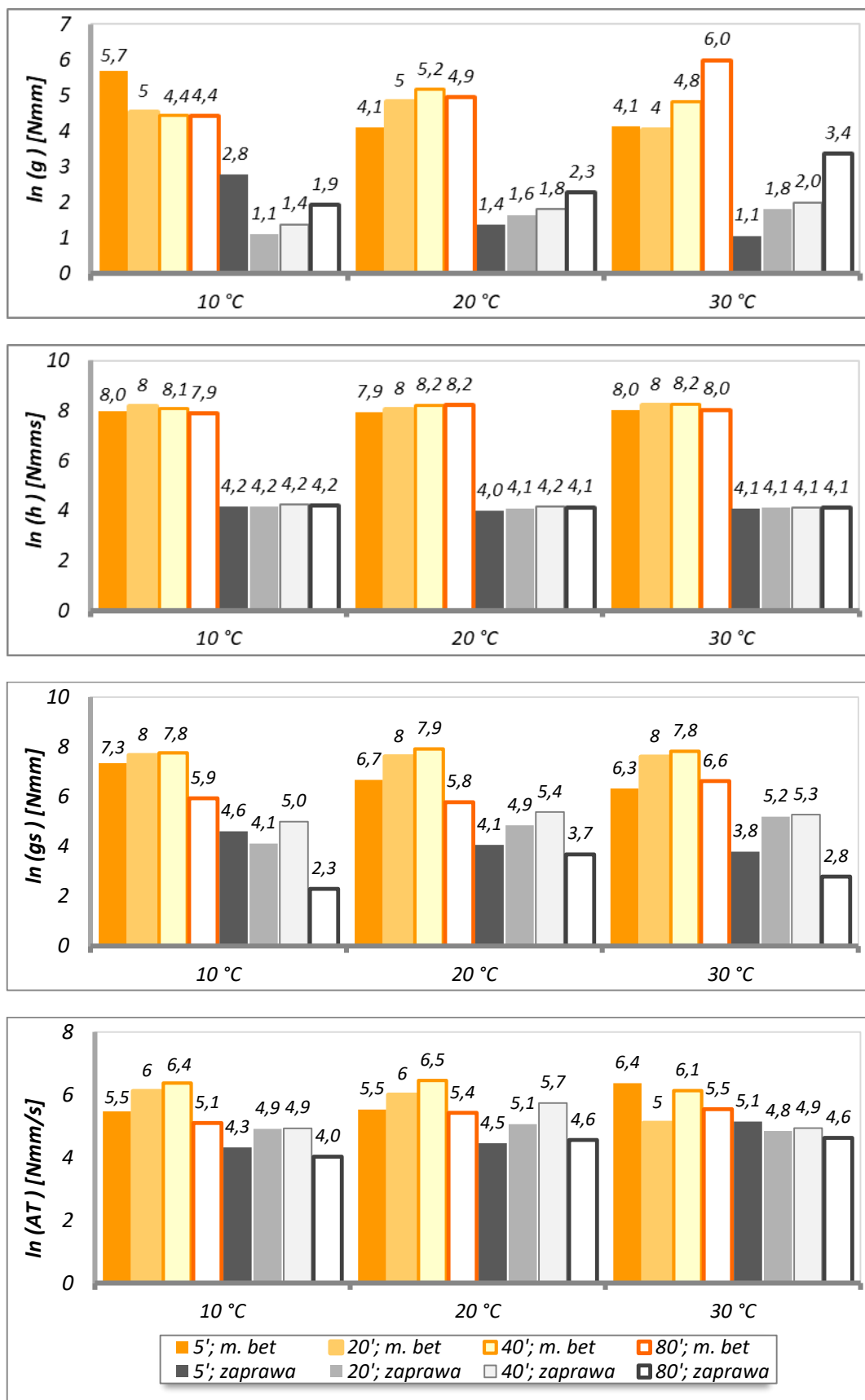
Tablica 54. Wyniki badań dynamicznych i statycznych właściwości reologicznych mieszanek betonowych z cementem wieloskładnikowym CEM V/A (S-V) 32,5 R, o w/c=0,4

Cement		CEM V/A (S-V) 32,5 R							
w/c		0,4							
Superplastyfikator		SP1				SP2			
Czas [min]		5	20	40	80	5	20	40	80
g [Nmm]	10 °C	15,7	9,8	9,2	6,5	18,6	9,8	7,1	10,9
	20 °C	12,5	12,6	12,7	7,0	10,3	12,0	13,4	29,5
	30 °C	3,1	4,5	3,8	4,8	7,4	14,9	18,2	34,8
h [Nmms]	10 °C	27,0	28,7	29,9	30,1	41,7	40,3	39,1	34,8
	20 °C	21,0	22,5	24,2	19,0	27,0	28,6	30,2	24,3
	30 °C	19,9	17,7	20,6	15,7	24,9	25,5	31,3	33,1
g _s [Nmm]	10 °C	89,2	178,5	192,0	24,5	82,4	164,0	198,0	72,5
	20 °C	81,8	189,6	226,3	55,7	24,1	113,2	145,6	91,3
	30 °C	114,1	234,6	280,7	21,9	58,2	112,2	95,3	57,4
AT [Nmm/s]	10 °C	59,9	127,0	134,4	64,9	107,1	176,4	146,5	50,2
	20 °C	40,1	124,2	99,9	32,7	54,2	118,6	71,0	23,9
	30 °C	59,5	101,2	90,2	42,2	53,2	107,6	86,7	44,6

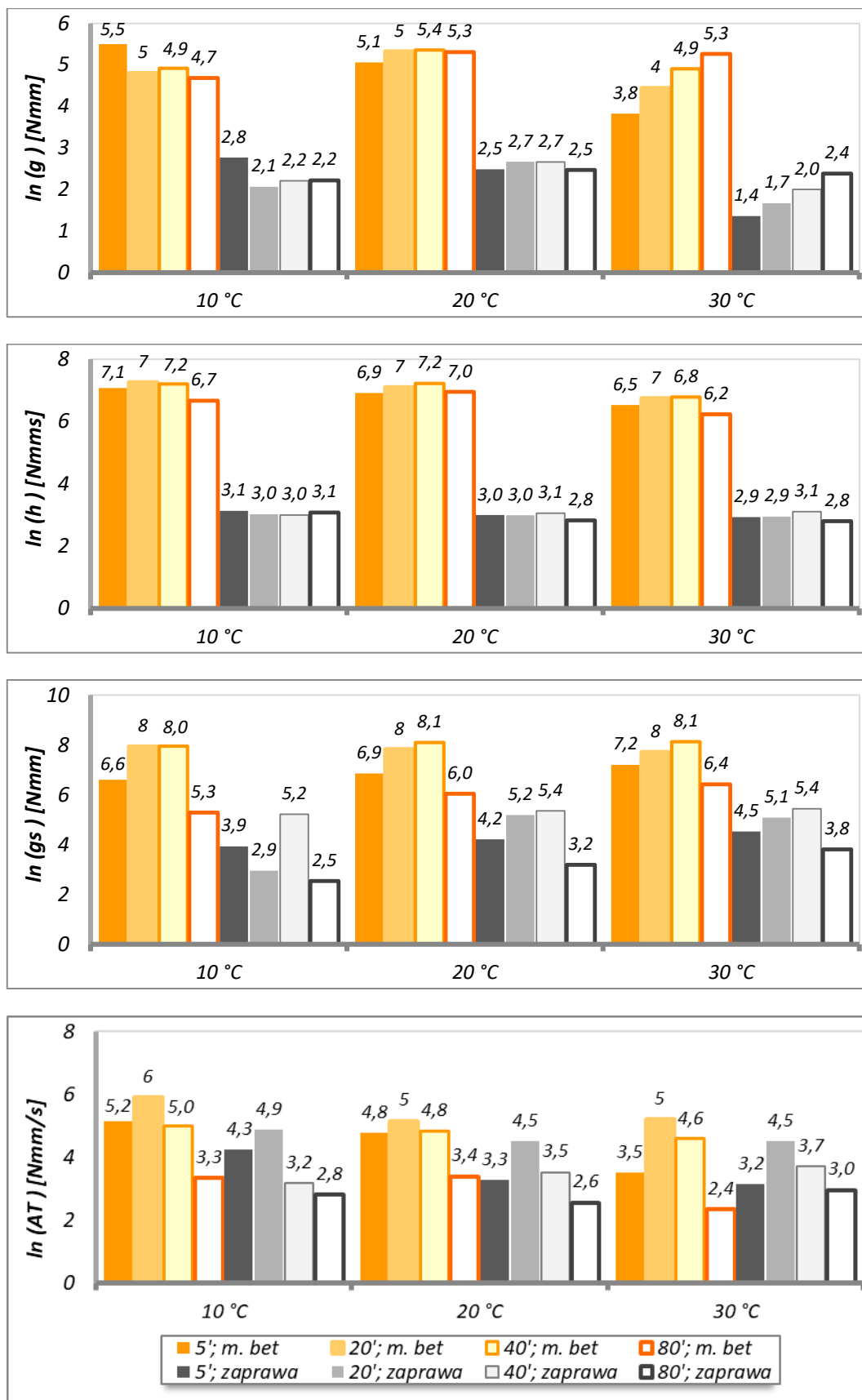
Wykresy przedstawiają zestawienie wielkości parametrów reologicznych zapraw i mieszanek betonowych badanych w temperaturach 10, 20 i 30 °C. Wielkości te zostały zlogarytmowane aby możliwe było pokazanie na jednym wykresie zmian właściwości reologicznych mieszanek i zapraw. Widoczne jest, że wpływ temperatury na właściwości reologiczne zapraw jest bardzo podobny co do charakteru do wpływu temperatury na właściwości reologiczne mieszanek betonowych.



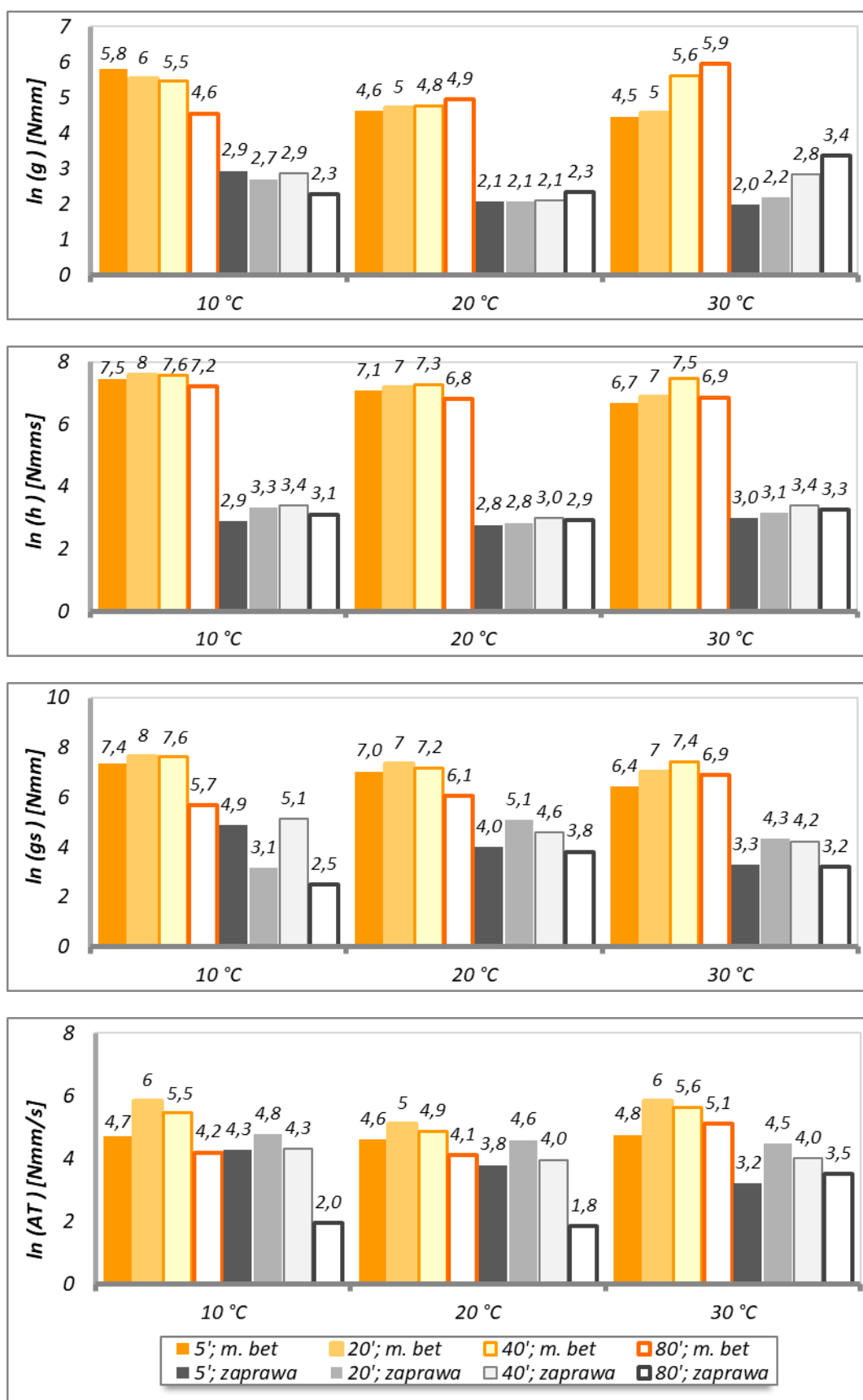
Rys. 125. Porównanie właściwości reologicznych zapraw i odpowiadających im mieszanek betonowych (CEM I, SP 1, w/c=0,3)



Rys. 126. Porównanie właściwości reologicznych zapraw i odpowiadających im mieszanek betonowych (CEM I, SP 2, w/c=0,3)



Rys. 127. Porównanie właściwości reologicznych zapraw i odpowiadających im mieszanek betonowych (CEM I, SP 1, w/c=0,4)



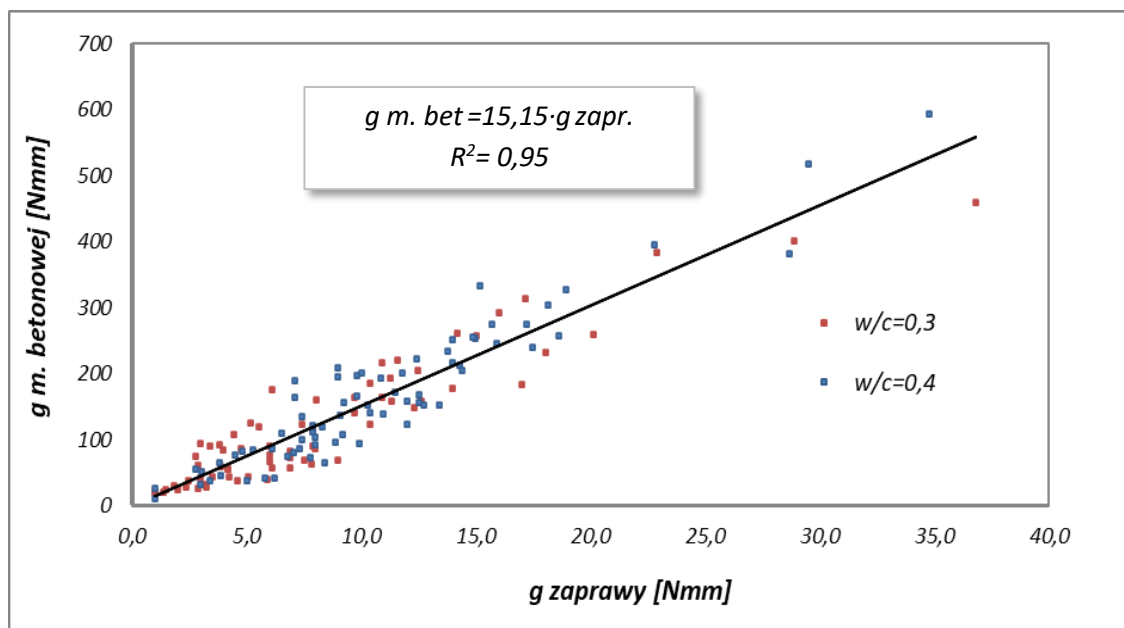
Rys. 128. Porównanie właściwości reologicznych zapraw i odpowiadających im mieszanek betonowych (CEM I, SP 2, w/c=0,4)

Dla mieszanek, w których były stosowane cementy hutnicze i wieloskładnikowe uzyskano podobne zależności i z tego względu zrezygnowano z graficznego przedstawienia zależności wynikających z wyników zebranych w tablicach 51-54.

Dynamiczna granica płynięcia g zapraw początkowo jest największa w temperaturze 10°C , a najmniejsza w temperaturze 30°C , niezależnie od stosunku w/c . Lepkość plastyczna h również maleje ze wzrostem temperatury, efekt jest bardziej wyraźny w przypadku mieszanek o $w/c = 0,3$. Wraz ze wzrostem temperatury płynność zapraw się zwiększa. Z upływem czasu granica płynięcia g i lepkość plastyczna h się zmienia a charakter tych zmian zależy od temperatury. W temperaturze 10°C dynamiczna granica płynięcia g i lepkość plastyczna h maleją, a płynność zapraw znacząco się zwiększa. W temperaturze 20 i 30°C dynamiczna granica płynięcia g wzrasta, tym szybciej im wyższa jest temperatura, a lepkość plastyczna h nie zmienia się istotnie. Po 80 minutach dynamiczna granica płynięcia g jest największa w 30°C a najmniejsza w 10°C . Charakter wpływu temperatury na właściwości reologiczne zapraw w stanie płynięcia nie zależy od w/c , jednak bardziej wrażliwe na wpływ temperatury wydają się mieszanki o niższym w/c . Statyczna granica płynięcia g_s zapraw pozostawionych w spoczynku wzrasta w czasie. Statyczna granica plastyczności g_s zwykle nie wzrasta liniowo, a jej wzrost jest szybszy w ciągu pierwszych 20 minut spoczynku. Zaprawy o $w/c = 0,4$ charakteryzują się początkowo wyraźnie szybszym wzrostem g_s w czasie. Po 40 min statyczna granica płynięcia g_s zapraw o $w/c = 0,4$ jest większa od zapraw o $w/c = 0,3$, jednak z upływem czasu ten wpływ zanika. Wraz ze wzrostem temperatury wzrasta statyczna granica płynięcia zapraw z upływem czasu wpływ temperatury również zanika.

Wskaźnik tiksotropii AT zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury, ale zmiany te nie są duże. Początkowo współczynnik tiksotropii AT zapraw w spoczynku wzrasta z czasem (pierwsze spoczynku 20') wzrost jest szybszy dla zapraw o $w/c = 0,3$. W dłuższym czasie (40 min) tempo wzrostu współczynnika tiksotropii AT się zmniejsza, a w przypadku zapraw o $w/c = 0,4$ może się nawet zmniejszyć.

Biorąc pod uwagę, że wpływ temperatury na właściwości reologiczne zapraw jest podobny do wpływu temperatury na właściwości mieszanek betonowych. Pojawia się pytanie czy właściwości zaprawy mogą być predyktorem właściwości mieszanek betonowych. Na rysunkach 129-132 przedstawiono liniowe zależności wiążące właściwości reologiczne zapraw i odpowiadającym im mieszanek. Punkty na tych wykresach są wynikami badań wszystkich mieszanek betonów i zapraw badanych w bloku III i IV.



Rys. 129. Zależność granicy płynięcia g mieszanek BSZ od granicy płynięcia g odpowiadającym im zapraw

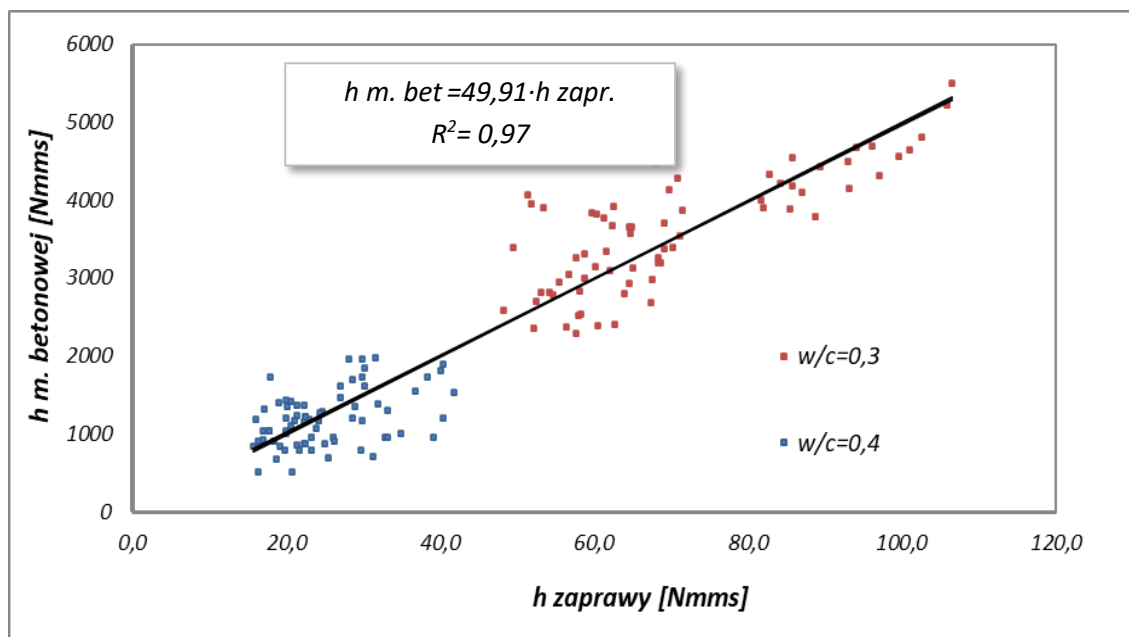
Analiza statystyczna regresji liniowej

Statystyki regresji	
Wielokrotność R	0,98
R^2	0,96
Dopasowany R^2	0,95
Błąd standardowy	35,62
Obserwacje	144

ANALIZA WARIANCJI

	df	SS	MS	F	Istotność F
Regresja	1	4348515	4348514,9	3428,1	0,00
Reszkowy	143	181393	1268,5		
Razem	144	4529908			

	Współczynniki	Błąd standardowy	t Stat	Wartość-p	Dolne 95%	Górne 95%
g zaprawy	15,15	0,26	58,55	0,00	14,64	15,67



Rys. 130. Zależność lepkości plastycznej h mieszanek BSZ od lepkości plastycznej h odpowiadającym im zapraw

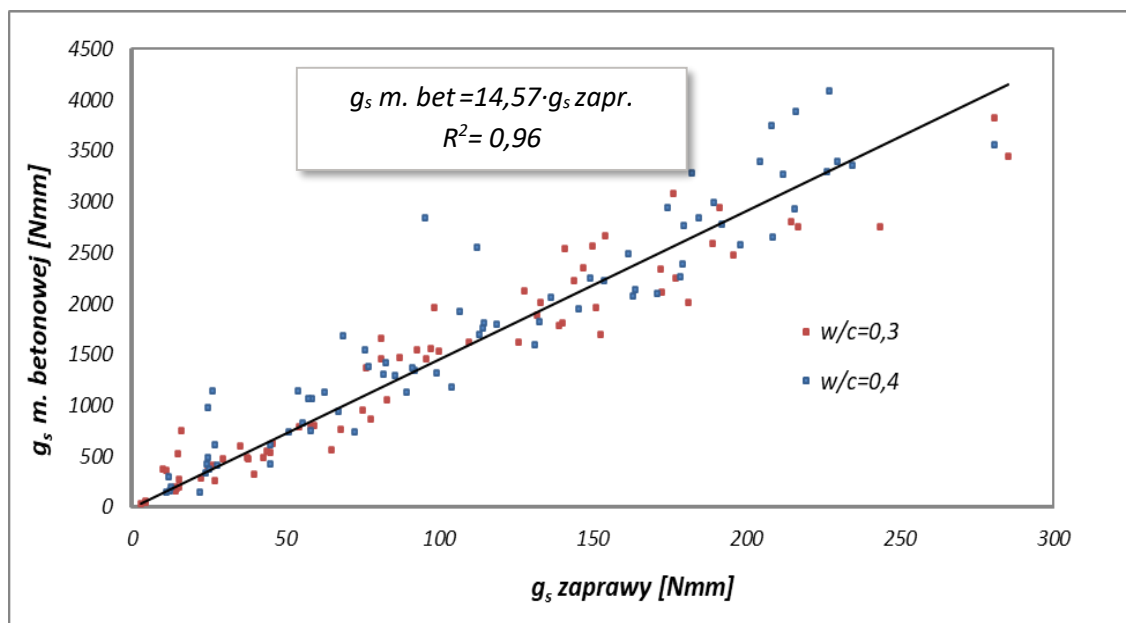
Analiza statystyczna regresji liniowej

Statystyki regresji	
Wielokrotność R	0,99
R^2	0,97
Dopasowany R^2	0,97
Błąd standardowy	436,57
Obserwacje	144

ANALIZA WARIANCJI

	df	SS	MS	F	Istotność F
Regresja	1	1,06E+09	1,06E+09	5564	0,00
Resztkowy	143	27255213	190595,9		
Razem	144	1,09E+09			

	Współczynniki	Błąd standardowy	t Stat	Wartość-p	Dolne 95%	Górne 95%
g zaprawy	49,91	0,67	74,60	0,000	48,59	51,23



Rys. 131. Zależność statycznej granicy płynięcia g_s mieszanek BSZ od statycznej granicy płynięcia g_s odpowiadającym im zapraw

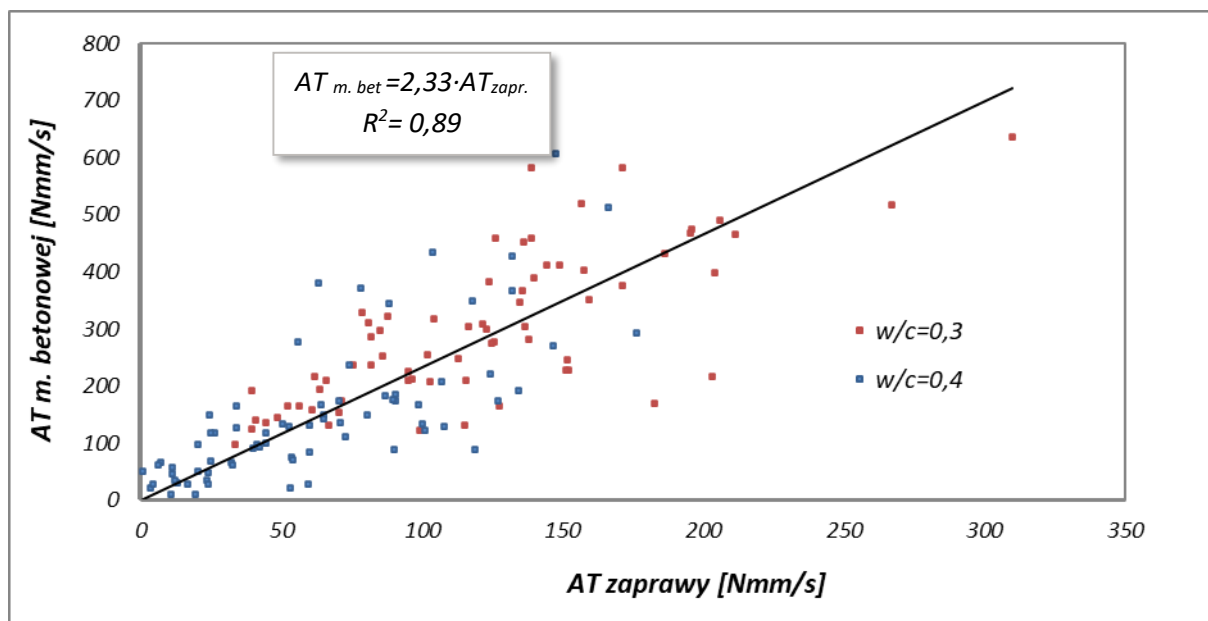
Analiza statystyczna regresji liniowej

Statystyki regresji	
Wielokrotność R	0,99
R^2	0,97
Dopasowany R^2	0,96
Błąd standardowy	322,5
Obserwacje	144

ANALIZA WARIANCJI

	df	SS	MS	F	Istotność F
Regresja	1	4,94E+08	4,94E+08	4751	0,000
Resztkowy	143	14874899	104020,3		
Razem	144	5,09E+08			

	Współczynniki	Błąd standardowy	t Stat	Wartość-p	Dolne 95%	Górne 95%
g zaprawy	14,57	0,21	68,93	0,000	14,15	14,99



Rys. 132. Zależność wskaźnika tiksotropowego sztywnienia AT mieszanek BSZ od wskaźnika tiksotropowego sztywnienia AT odpowiadającym im zapraw

Analiza statystyczna regresji liniowej

Statystyki regresji	
Wielokrotność R	0,95
R^2	0,90
Dopasowany R^2	0,89
Błąd standardowy	87,68
Obserwacje	144,00

ANALIZA WARIANCJI

	df	SS	MS	F	Istotność F
Regresja	1	9412030	9412030	1224	0,000
Resztkowy	143	1099258	7687		
Razem	144	10511288			

	Współczynniki	Błąd standardowy	t Stat	Wartość-p	Dolne 95%	Górne 95%
g zaprawy	2,33	0,07	34,99	0,000	2,20	2,46

Współczynniki korelacji R^2 regresji liniowych wiążących parametry reologiczne zapraw z parametrami reologicznymi mieszanek betonowych są na wysokim poziomie. Dla granicy płynięcia g lepkości plastycznej h i statycznej granicy płynięcia g_s R^2 rzędu 0,95-0,97 oznacza bardzo dobre dopasowanie, w przypadku wskaźnika AT jest to dopasowanie dobre $R^2=0,89$. Otrzymane równania regresji liniowych są istotne statystyczne o czym świadczą wielkości p mniejsze niż 5 %.

Potwierdzono, że pomiary właściwości reologicznych zapraw modelowych mogą być wykorzystane do przewidywania właściwości reologicznych BSZ zarówno w stanie płynięcia, jak i spoczynku. Zależność pomiędzy parametrami reologicznymi zapraw modelowych i mieszanek BSZ można opisać funkcjami liniowymi przedstawionymi na rys. 98-100. Należy zaznaczyć, że prezentowane zależności są słuszne dla zapraw i mieszanek, których skład jest ze sobą związany poprzez założenie równego współczynnika dyspersji kruszywa.

5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

5.1 Wpływ temperatury na urabialność mieszanek betonów samozagęszczalnych

Charakter wpływ temperatury na mieszanki betonów zagęszczanych wibracyjnie (BZW) i mieszanki samozagęszczalne (BSZ) jest odmienny. Wzrost temperatury powoduje wzrost granicy płynięcia i lepkości BZW i przyspiesza utratę urabialności. W przypadku BSZ zwykle wzrost temperatury początkowo powoduje zmniejszenie g i h , co wiąże się przede wszystkim ze stosowaniem dużego dodatku superplastyfikatora (SP) i jego silniejszym działaniem w wyższych temperaturach. Wzrost temperatury przyspiesza wzrost g i h w czasie. W przypadku BSZ w niskich temperaturach z upływem czasu granica płynięcia i lepkość plastyczna może się zmniejszać. BZW i BSZ różnią się przede wszystkim w/c i ilością SP. Charakter wpływu zmian temperatury na właściwości reologiczne BZW wynika z wpływu temperatury na hydratację cementu, w przypadku BSZ nakładające się wpływu temperatury na efektywność SP i hydratację cementu.

Charakter i zakres wpływu temperatury na właściwości reologiczne BSZ zależy od stosunku w/c oraz rodzaju i ilości nieklinkierowych składników cementu. Każdy z wymienionych wyżej czynników poprzez swój wpływ na reakcję hydratacji cementu jest w stanie zmieniać wpływ temperatury na właściwości mieszanek. Zakres zmian właściwości reologicznych BSZ wywołany zmianą temperatury jest większy dla mieszanek o niższym w/c a więc o większej ilości dodanego SP oraz dla mieszanek z cementów z dodatkami. W mieszankach BSZ o niższym w/c o charakterze i naturze wpływu temperatury w znacznym stopniu decyduje wpływ temperatury na efektywność działania SP. W mieszankach o wyższym w/c rośnie znaczenie wpływu temperatury na przebieg procesu hydratacji cementu. Poprzez stosowanie cementów z dodatkami można kontrolować i minimalizować wpływ temperatury na właściwości reologiczne BSZ.

Popiół lotny wapienny stosowany jako składnik cementu w ilości do 30 % klinkieru portlandzkiego nie zmienia charakteru wpływu temperatury na właściwości reologiczne mieszanek BSZ. Początkowo granica płynięcia zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury, z upływem czasu ta zależność ulega odwróceniu. Jeżeli popiołu lotnego wapiennego będzie w cemencie więcej niż 30 %, to wpływ temperatury ulega wyraźnemu wzmocnieniu i granica płynięcia g wzrasta wraz ze wzrostem temperatury. Upływ czasu tego nie zmienia.

Zastąpienie części popiołu lotnego wapiennego, będącego zamiennikiem klinkieru portlandzkiego, mączką wapienną, żużlem wielkopiecowym lub popiołem lotnym krzemionkowym w stosunku masowym 1:1 zmniejsza wpływ temperatury na właściwości reologiczne BSZ. W przypadku mieszanek samozagęszczalnych szczególnie korzystna jest mieszanka dodatków składająca się z mączki wapiennej i popiołu lotnego wapiennego (15 % MW, 15 % PLW co daje 30 zastąpienie klinkieru portlandzkiego). Taka kombinacja dodatków sprawia, że wzrost temperatury zmniejsza granicę płynięcia

i lepkość plastyczną mieszanek. Co szczególnie interesujące wpływ czasu nie zmienia tego trendu.

Mikrokrzemionka w składzie mieszanek BSZ wysokowartościowych zmienia jakościowo wpływ temperatury na właściwości reologiczne BSZ. Odmienne niż w przypadku BSZ zwykłych, granica płynięcia i lepkość plastyczna mieszanek BSZ z mikrokrzemionką w ilości do 10% cementu są tym większe im większa jest temperatura. Obecność mikrokrzemionki powoduje, że granica płynięcia BSZ wzrasta silniej w czasie, szczególnie w temperaturze 30°C. Ten niekorzystny efekt może być częściowo zmniejszony przez stosowanie cementu z popiołem lotnym wapiennym lub popiołem wapiennym i krzemionkowym w ilości do 15%.

Analiza wyników badań pozwala na sformułowanie zaleceń dotyczących doboru składników, które mogą zmniejszyć wpływ zmian temperatury na właściwości reologiczne i ich zmiany w czasie. Przedstawiają się następująco:

- stosowanie popiołu lotnego wapiennego w cemencie do 30 %, nie powoduje istotnego wzrostu zakresu wpływu temperatury na właściwości reologiczne BSZ. Zastąpienie części popiołu lotnego wapiennego innym dodatkiem mineralnym - popiołem lotnym krzemionkowym, granulowanym żużlem wielkopieczowym, mączką wapienną – może zmniejszyć zakres wpływ zmian temperatury na urabialność.
- Dodatek mączki wapiennej i popiołu lotnego wapiennego w sumarycznej ilości 30 % zapewnia szczególnie dobrą stabilność właściwości reologicznych w aspekcie zmiennej temperatury. Mieszanki utrzymują praktycznie niezmienną urabialność w czasie 60 minut w zakresie temperatur 10-30°C. Dotyczy to zarówno mieszanek samozagęszczalnych i mieszanek betonów zagęszczanych wibracyjnie.
- Obecność mikrokrzemionki korzystnie wpływa na efektywność działania superplastyfikatorów w obniżonych temperaturach. Jest to pożądane np. w zakładach prefabrykacji, gdzie wymaga się maksymalnego upłynnienia po możliwie krótkim czasie mieszania, bez konieczności długiego zachowania urabialności.
- Wpływ temperatury na urabialność jest mniej wyraźny przy wyższym wskaźniku w/c (w/s).
- Poprzez odpowiedni wybór rodzaju superplastyfikatora możliwe jest uzyskanie mieszanki BSZ o właściwościach reologicznych mało wrażliwych na zmiany temperatury. Uzyskane wyniki nie dają podstaw do stawiania arbitralnych sądów w tej kwestii. Wskazane jest każdorazowe badanie efektów działania danego superplastyfikatora w zmiennych temperaturach.

5.2 Wpływ temperatury na parcie na deskowania samozagęszczalnych mieszanek betonowych

Parcie na deskowania zależy przede wszystkim od prędkości betonowania i właściwości reologicznych mieszanki. Każdy czynnik wpływający na właściwości reologiczne

wpływa tym samym na parcie. Ponieważ temperatura wpływa na właściwości reologiczne mieszanek BSZ, wpływa również na parcie na deskowania.

Dynamiczna granica płynięcia g i lepkość plastyczna h BSZ są początkowo odwrotnie proporcjonalne do temperatury. W miarę upływu czasu obserwowano zmniejszenie dynamicznej granicy płynięcia g i lepkości plastycznej h w temperaturze 10°C , podczas gdy w temperaturach 20 i 30°C dynamiczna granica płynięcia g wzrastała przy niewielkich i niejednoznacznych zmianach lepkości plastycznej h . Efekty te były wyraźniejsze w przypadku mieszanek o niższym stosunku w/c. Uzyskane zależności wpływu temperatury i stosunku w/c na parametry reologiczne SCC są zgodne z wcześniejszymi badaniami.

Zarówno temperatura, jak i stosunek w/c wpływają na statyczną granicę płynięcia g_s mieszanek BSZ, przy czym ważniejszym czynnikiem jest stosunek w/c. Statyczna granica płynięcia g_s BSZ jest tym wyższa, im wyższy jest współczynnik w/c i im wyższa jest temperatura. Statyczna granica płynięcia g_s wzrasta w czasie, ale wzrost ten nie jest liniowy - początkowo jest szybszy i zwalnia wraz z upływem czasu.

Współczynnik tiksotropii AT zależy głównie od współczynnika w/c - im wyższy współczynnik w/c, tym niższy współczynnik AT . Współczynnik tiksotropii AT zmniejsza się wraz ze wzrostem temperatury, ale efekt nie jest duży. Współczynnik tiksotropii AT wzrasta w czasie, przy czym wzrost następuje głównie w początkowym okresie spoczynku mieszanki. W dłuższych okresach czasu AT może się zmniejszać. Temperatura nie wpływa na zmiany AT w czasie.

Parcie mieszanek betonów samozagęszczalnych na ściany deskowania jest określane w początkowej fazie betonowania przez dynamiczną granicę płynięcia g a następnie przez statyczną granicę płynięcia g_s , która określa zdolność mieszanki do przenoszenia obciążeń od własnego ciężaru. Im wyższe są dynamiczne i statyczne granice płynięcia, tym niższe jest naprężenie wywierane na deskowanie. Wpływ pozostałych badanych parametrów reologicznych jest mniejszy i niejednoznaczny. Wyższa lepkość plastyczna h i współczynnik tiksotropii AT sprzyjają obniżeniu obciążeń ścian deskowań, redukcji parcia obserwowanego z upływem czasu, ale jednocześnie opóźniają pojawienie się struktury odpowiedzialnej za nieodwracalną redukcję parcia.

Temperatura wpływa na parcie mieszanek BSZ na deskowanie. Początkowo parcie jest wprost proporcjonalne do temperatury, ponieważ dynamiczna granica płynięcia g maleje wraz ze wzrostem temperatury. Parcie zawierało się w przedziale $17\div 24$ kPa co stanowiło $69\div 94\%$ parcia określonego z warunku hydrostatycznego. W wyższych temperaturach w mieszance BSZ szybciej budowana jest struktura zdolna do przenoszenia obciążeń, mieszanka uzyskuje tym samym wyższą statyczną granicę płynięcia g_s . Zatem parcie wywierane przez mieszankę BSZ na deskowanie po 20 minutach jest odwrotnie proporcjonalne do temperatury. Obciążenie deskowania po zakończeniu układania mieszanki BSZ zmniejsza się szybciej w wyższych temperaturach, w wyniku szybszej utraty płynności i sztywnienia. Parcie dla mieszanek w temperaturze 10°C zawierało się w przedziale $40\div 73$ % parcia z w. hydrostatycznego,

w 20°C 34÷57 % z w hydrostatycznego a w 30°C w przedziale 17÷43 % parcia z warunku hydrostatycznego. Z dalszym upływem czasu statyczna granica płynięcia wzrasta w malejącym tempie, co również skutkuje dalszą redukcją parcia, które stanowi 16÷57% parcia z warunku hydrostatycznego. Redukcja parcia staje się mniej zależna od temperatury. Potwierdzono, że parcie mieszanek BSZ na pionowe ściany deskowania jest niższe dla mieszanek BSZ o wyższym w/c. Mieszanki takie szybciej budują strukturę i uzyskują wyższą statyczną granicę płynięcia g_s .

5.3. Właściwości mieszanek betonowych a właściwości zapraw modelowych

Zaprawy modelowe mogą być wykorzystywane w procesie projektowania mieszanek BSZ do optymalnego doboru materiałów i projektowania mieszanek oraz do kontroli wpływu zmiennych czynników technologicznych na właściwości reologiczne. Skład zapraw modelowych opiera się na założeniu równego stosunku dyspersji mieszanki betonowej i zaprawy, która w składzie tej mieszanki betonowej się zawiera. Na podstawie badań można stwierdzić:

- Charakter wpływu czynników technologicznych i materiałowych na właściwości reologiczne zapraw i mieszanek betonowych tak w stanie płynięcia, jak w stanie spoczynku jest analogiczny.
- Zaprawy modelowe mogą być stosowane do przewidywania właściwości reologicznych SCC zarówno w stanie płynięcia (dynamiczna granica plastyczności g i lepkość plastyczna h) jak i w stanie (statyczna granica plastyczności g_s i współczynnik tiksotropii AT). Mogą służyć również do przewidywania zmian tych parametrów w czasie oraz pod wpływem temperatury.
- Określono zależności liniowe, pozwalające na przeliczenie wartości parametrów reologicznych uzyskanych w pomiarach zaprawy modelowej na parametry reologiczne mieszanek BSZ
- Wymagane są jednak dalsze testy, obejmujące mieszanki BSZ różnej objętości zaprawy, jak również kruszywa o różnym typie i uziarnieniu.

5.4. Wpływ temperatury mieszanki samozagęszczalnej na wytrzymałość na ściskanie betonu

Początkowa temperatura mieszanki betonowej równa 10,20 lub 30 °C mieszanki betonowej była utrzymywana przez względnie krótki czas, związany z przygotowaniem próbek do badań wytrzymałościowych, później próbki były umieszczane w warunkach normowych (temperatura $18\pm 2^\circ\text{C}$, wilgotność względna powietrza 60%). Pomimo krótkiego czasu oddziaływania zmniejszonej bądź podwyższonej temperatury, zaobserwowano różnice w wytrzymałości na ściskanie próbek wykonanych z BSZ zwykłych i wysokowartościowych. Są one głównie konsekwencją odmiennych właściwości reologicznych, czyli odmiennym stopniem samozagęszczenia. Temperatura początkowa wpływa również na proces hydratacji spoiwa i jakość struktury o czym świadczy to, wytrzymałość na ściskanie początkowo jest najwyższa dla betonów z mieszanek o temperaturze 30°C, ale po 180 dniu dojrzewania wytrzymałość na ściskanie betonów z mieszanek o temperaturze 10°C jest wyższa niż betonów z mieszanek o

temperaturze 20 czy 30°C. Różnice wytrzymałości nie są na tyle duże, aby istniała konieczność odmiennej klasyfikacji betonu pod względem jego klasy.

LITERATURA

- [1] Z. Orłowski, *Podstawy technologii betonowego budownictwa monolitycznego*. Warszawa: PWN, 2010.
- [2] E. Koźniewski i M. Orłowski, „Obszary efektywnego zasięgu betonowni”, *Civ. Environmental Eng.*, t. 2, s. 531–540, 2011.
- [3] L. E. Copeland, D. L. Kantro, i G. Verbeck, „Chemistry of Hydration of Portland Cement”, s. 44.
- [4] L. Czarnecki, T. Broniewski, i O. Henning, *Chemia w budownictwie*, I. Warszawa: Arkady, 2000.
- [5] J. J. Thomas, D. Rothstein, H. M. Jennings, i B. J. Christensen, „Effect of hydration temperature on the solubility behavior of Ca-, S-, Al-, and Si-bearing solid phases in Portland cement pastes”, *Cem. Concr. Res.*, t. 33, nr 12, s. 2037–2047, grudz. 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(03)00224-2.
- [6] „ScienceDirect Full Text PDF”. Dostęp: 20 lipiec 2018. [Online]. Dostępne na: https://ac.els-cdn.com/S0008884606003103/1-s2.0-S0008884606003103-main.pdf?_tid=b700cf6f-91e4-4774-9e5c-f3599e464d96&acdnat=1532117393_ee2bcd01a6d8da8c8cc44a3210b1666
- [7] „Early strength development and hydration of cement pastes at different temperatures or with superplasticiser characterised by electrical resistivity”, *Case Stud. Constr. Mater.*, t. 16, s. e00911, cze. 2022, doi: 10.1016/j.cscm.2022.e00911.
- [8] H. Huang, T. Huang, Q. Yuan, D. Zhou, D. Deng, i L. Zhang, „Temperature dependence of structural build-up and its relation with hydration kinetics of cement paste”, *Constr. Build. Mater.*, t. 201, s. 553–562, mar. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.226.
- [9] L. Liu, P. Yang, C. Qi, B. Zhang, L. Guo, i K.-I. Song, „An experimental study on the early-age hydration kinetics of cemented paste backfill”, *Constr. Build. Mater.*, t. 212, s. 283–294, lip. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.322.
- [10] J. W. Bullard *i in.*, „Mechanisms of cement hydration”, *Cem. Concr. Res.*, t. 41, nr 12, s. 1208–1223, grudz. 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.09.011.
- [11] D. Damidot i A. Nonat, „C₃S hydration in diluted and stirred suspensions: (I) study of the two kinetic steps”, *Adv. Cem. Res.*, t. 6, nr 21, s. 27–35, sty. 1994, doi: 10.1680/adcr.1994.6.21.27.
- [12] P. Barret, D. Ménétrier, i D. Bertrandie, „Mechanism of C3S dissolution and problem of the congruency in the very initial period and later on”, *Cem. Concr. Res.*, t. 13, nr 5, s. 728–738, wrz. 1983, doi: 10.1016/0008-8846(83)90064-9.
- [13] J. B. Ings, P. W. Brown, i G. Frohnsdorff, „Early hydration of large single crystals of tricalcium silicate”, *Cem. Concr. Res.*, t. 13, nr 6, s. 843–848, lis. 1983, doi: 10.1016/0008-8846(83)90085-6.
- [14] W. Kurdowski, *Cement and Concrete Chemistry*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014. doi: 10.1007/978-94-007-7945-7.
- [15] J. Pommersheim i J. Chang, „Kinetics of hydration of tricalcium aluminate in the presence of gypsum”, *Cem. Concr. Res.*, t. 18, nr 6, s. 911–922, lis. 1988, doi: 10.1016/0008-8846(88)90027-0.
- [16] H. Minard, S. Garrault, L. Regnaud, i A. Nonat, „Mechanisms and parameters controlling the tricalcium aluminate reactivity in the presence of gypsum”, *Cem. Concr. Res.*, t. 37, nr 10, s. 1418–1426, paź. 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.06.001.
- [17] „Tricalcium aluminate hydration in the presence of lime, gypsum or sodium sulfate”, *Cem. Concr. Res.*, t. 8, nr 5, s. 571–580, wrz. 1978, doi: 10.1016/0008-8846(78)90040-6.
- [18] „Controlling ettringite precipitation and rheological behavior in ordinary Portland cement paste by hydration control agent, temperature and mixing”, *Cem. Concr. Res.*, t. 166, s. 107095, kwi. 2023, doi: 10.1016/j.cemconres.2023.107095.
- [19] R. A. Livingston, J. S. Schweitzer, C. Rolfs, H.-W. Becker, i S. Kubsy, „Characterization of the induction period in tricalcium silicate hydration by nuclear resonance reaction analysis”, *Journal of Materials Research*, marzec 2001. /core/journals/journal-of-materials-research/article/characterization-of-the-induction-period-in-tricalcium-silicate-hydration-by-nuclear-resonance-reaction-analysis/0C1776D452BEC5207CFFDE1672543966 (dostęp 25 czerwiec 2019).
- [20] P. Barret, D. Ménétrier, i D. Bertrandie, „Mechanism of C3S dissolution and problem of the congruency in the very initial period and later on”, *Cem. Concr. Res.*, t. 13, nr 5, s. 728–738, wrz. 1983, doi: 10.1016/0008-8846(83)90064-9.
- [21] S. Garrault-Gauffinet i A. Nonat, „Experimental investigation of calcium silicate hydrate (C-S-H) nucleation”, *J. Cryst. Growth*, t. 200, nr 3, s. 565–574, kwi. 1999, doi: 10.1016/S0022-0248(99)00051-2.
- [22] A. Zingg, F. Winnefeld, L. Holzer, J. Pakusch, S. Becker, i L. Gauckler, „Adsorption of polyelectrolytes and its influence on the rheology, zeta potential, and microstructure of various cement

- and hydrate phases”, *J. Colloid Interface Sci.*, t. 323, nr 2, s. 301–312, lip. 2008, doi: 10.1016/j.jcis.2008.04.052.
- [23] K. Yoshioka, E. Tazawa, K. Kawai, i T. Enohata, „Adsorption characteristics of superplasticizers on cement component minerals”, *Cem. Concr. Res.*, t. 32, nr 10, s. 1507–1513, paź. 2002, doi: 10.1016/S0008-8846(02)00782-2.
- [24] H. Bouhamed, S. Boufi, i A. Magnin, „Dispersion of alumina suspension using comb-like and diblock copolymers produced by RAFT polymerization of AMPS and MPEG”, *J. Colloid Interface Sci.*, t. 312, nr 2, s. 279–291, sie. 2007, doi: 10.1016/j.jcis.2007.03.060.
- [25] J. Plank, B. Sachsenhauser, i J. de Reese, „Experimental determination of the thermodynamic parameters affecting the adsorption behaviour and dispersion effectiveness of PCE superplasticizers”, *Cem. Concr. Res.*, t. 40, nr 5, s. 699–709, maj 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.12.002.
- [26] J. Stecher i J. Plank, „Novel concrete superplasticizers based on phosphate esters”, *Cem. Concr. Res.*, t. 119, s. 36–43, maj 2019, doi: 10.1016/j.cemconres.2019.01.006.
- [27] H. Arslan, U. S. Aytaç, T. Bilir, i Ş. Şen, „The synthesis of a new chitosan based superplasticizer and investigation of its effects on concrete properties”, *Constr. Build. Mater.*, t. 204, s. 541–549, kwi. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.209.
- [28] Z. Yang, M. Yu, Y. Liu, X. Chen, i Y. Zhao, „Synthesis and performance of an environmentally friendly polycarboxylate superplasticizer based on modified poly(aspartic acid)”, *Constr. Build. Mater.*, t. 202, s. 154–161, mar. 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.148.
- [29] S. Li i in., „Synthesis and performance of a novel amphoteric polycarboxylate superplasticizer with hydrolysable ester group”, *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, t. 564, s. 78–88, mar. 2019, doi: 10.1016/j.colsurfa.2018.11.043.
- [30] M. Gretz i J. Plank, „Hybrid additives for construction applications, fabricated through layer-by-layer adsorption of polycondensate type superplasticizers on latex templates”, *Colloids Surf. Physicochem. Eng. Asp.*, t. 366, nr 1–3, s. 38–44, sie. 2010, doi: 10.1016/j.colsurfa.2010.05.014.
- [31] B. Buszewski i P. Pomastowski, „Wpływ heterogeniczności powierzchni biokoloidów na ich rozdzielanie elektroforetyczne”, *Wiad. Chem.*, t. [Z] 69, 9-10, 2015, Dostęp: 18 czerwiec 2023. [Online]. Dostępne na: <http://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-af822b1b-0e34-4858-8e65-2d61f20aeab4>
- [32] K. Suzuki, T. Nichikawa, K. Kato, H. Hayashi, i S. Ito, „Approach by zeta-potential measurement on the surface change of hydrating C3S”, *Cem. Concr. Res.*, t. 11, nr 5, s. 759–764, wrz. 1981, doi: 10.1016/0008-8846(81)90034-X.
- [33] S.-S. Chen i P. K. Mehta, „Zeta potential and surface area measurements on ettringite”, *Cem. Concr. Res.*, t. 12, nr 2, s. 257–259, mar. 1982, doi: 10.1016/0008-8846(82)90012-6.
- [34] L. Nachbaur, P.-C. Nkinamubanzi, A. Nonat, i J.-C. Mutin, „Electrokinetic Properties which Control the Coagulation of Silicate Cement Suspensions during Early Age Hydration”, *J. Colloid Interface Sci.*, t. 202, nr 2, s. 261–268, cze. 1998, doi: 10.1006/jcis.1998.5445.
- [35] „Measurement and modeling of the surface potential evolution of hydrated cement pastes as a function of degradation”, *J. Colloid Interface Sci.*, t. 300, nr 1, s. 33–44, sie. 2006, doi: 10.1016/j.jcis.2006.03.018.
- [36] „Approach by zeta-potential measurement on the surface change of hydrating C3S”, *Cem. Concr. Res.*, t. 11, nr 5–6, s. 759–764, wrz. 1981, doi: 10.1016/0008-8846(81)90034-X.
- [37] H. Viallis-Terrisse, A. Nonat, i J.-C. Petit, „Zeta-Potential Study of Calcium Silicate Hydrates Interacting with Alkaline Cations”, *J. Colloid Interface Sci.*, t. 244, nr 1, s. 58–65, grudz. 2001, doi: 10.1006/jcis.2001.7897.
- [38] „Adsorption characteristics of water-reducing agents on gypsum surface and its effect on the rheology of gypsum plaster”, *Cem. Concr. Res.*, t. 35, nr 3, s. 527–531, mar. 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.04.016.
- [39] I. Pointeau, P. Reiller, N. Macé, C. Landesman, i N. Coreau, „Measurement and modeling of the surface potential evolution of hydrated cement pastes as a function of degradation”, *J. Colloid Interface Sci.*, t. 300, nr 1, s. 33–44, sie. 2006, doi: 10.1016/j.jcis.2006.03.018.
- [40] C. Hirsch, „Untersuchungen zur Wechselwirkung zwischen polymeren Fließmitteln und Zementen bzw. Mineralphasen der frühen Zementhydratation”, PhD Thesis, Technische Universität München, 2005.
- [41] „Adsorption and desorption of polycarboxylate ether superplasticizer in fresh cementitious materials blended with mineral admixtures”, *J. Mater. Res. Technol.*, t. 17, s. 1740–1751, mar. 2022, doi: 10.1016/j.jmrt.2022.01.145.
- [42] „The zeta potential of cement and additions in cementitious suspensions with high solid fraction”, *Cem. Concr. Res.*, t. 95, s. 195–204, maj 2017, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.02.016.

- [43] S. Pourchet, I. Pochard, F. Brunel, i D. Perrey, „Chemistry of the calcite/water interface: Influence of sulfate ions and consequences in terms of cohesion forces”, *Cem. Concr. Res.*, t. 52, s. 22–30, paź. 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.04.002.
- [44] M. Medala, C. Labbez, I. Pochard, i A. Nonat, „Ettringite surface chemistry: Interplay of electrostatic and ion specificity”, *J. Colloid Interface Sci.*, t. 354, nr 2, s. 765–770, luty 2011, doi: 10.1016/j.jcis.2010.11.031.
- [45] J. Plank i C. Hirsch, „Impact of zeta potential of early cement hydration phases on superplasticizer adsorption”, *Cem. Concr. Res.*, t. 37, nr 4, s. 537–542, kwi. 2007, doi: 10.1016/j.cemconres.2007.01.007.
- [46] L. Xu, P. Wang, i G. Zhang, „Formation of ettringite in Portland cement/calcium aluminate cement/calcium sulfate ternary system hydrates at lower temperatures”, *Constr. Build. Mater.*, t. 31, s. 347–352, cze. 2012, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2011.12.078.
- [47] Y. Zhang i X. Kong, „Correlations of the dispersing capability of NSF and PCE types of superplasticizer and their impacts on cement hydration with the adsorption in fresh cement pastes”, *Cem. Concr. Res.*, t. 69, s. 1–9, mar. 2015, doi: 10.1016/j.cemconres.2014.11.009.
- [48] M. Lesti, S. Ng, i J. Plank, „Ca²⁺-mediated interaction between microsilica and polycarboxylate comb polymers in a model cement pore solution”, *J. Am. Ceram. Soc.*, t. 93, nr 10, s. 3493–3498, 2010, doi: 10.1111/j.1551-2916.2010.03901.x.
- [49] J. Plank, C. Schroeﬂ, M. Gruber, M. Lesti, i R. Sieber, „Effectiveness of Polycarboxylate Superplasticizers in Ultra-High Strength Concrete: The Importance of PCE Compatibility with Silica Fume”, *J. Adv. Concr. Technol.*, t. 7, nr 1, s. 5–12, luty 2009, doi: 10.3151/jact.7.5.
- [50] D.-Y. Lei, L.-P. Guo, W. Sun, J. Liu, X. Shu, i X.-L. Guo, „A new dispersing method on silica fume and its influence on the performance of cement-based materials”, *Constr. Build. Mater.*, t. 115, s. 716–726, lip. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.04.023.
- [51] B. Wu, B.-W. Chun, L. Gu, i T. L. Kuhl, „Effect of Ca²⁺ ion concentration on adsorption of poly(carboxylate ether)-based (PCE) superplasticizer on mica”, *J. Colloid Interface Sci.*, t. 527, s. 195–201, paź. 2018, doi: 10.1016/j.jcis.2018.05.016.
- [52] „Effects of aqueous-phase speciation on Portland cement and supplementary cementitious materials as reflected using zeta potential of powder suspensions”, *Constr. Build. Mater.*, t. 345, s. 128258, sie. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.128258.
- [53] B. Wu, B.-W. Chun, L. Gu, i T. L. Kuhl, „Effect of Ca²⁺ ion concentration on adsorption of poly(carboxylate ether)-based (PCE) superplasticizer on mica”, *J. Colloid Interface Sci.*, t. 527, s. 195–201, paź. 2018, doi: 10.1016/j.jcis.2018.05.016.
- [54] K. Yamada, S. Ogawa, i S. Hanehara, „Controlling of the adsorption and dispersing force of polycarboxylate-type superplasticizer by sulfate ion concentration in aqueous phase”, *Cem. Concr. Res.*, t. 31, nr 3, s. 375–383, mar. 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(00)00503-2.
- [55] A. Habbaba, Z. Dai, i J. Plank, „Formation of organo-mineral phases at early addition of superplasticizers: The role of alkali sulfates and C3A content”, *Cem. Concr. Res.*, t. 59, s. 112–117, maj 2014, doi: 10.1016/j.cemconres.2014.02.007.
- [56] J. Plank, D. Zhimin, H. Keller, F. v. Hössle, i W. Seidl, „Fundamental mechanisms for polycarboxylate intercalation into C3A hydrate phases and the role of sulfate present in cement”, *Cem. Concr. Res.*, t. 40, nr 1, s. 45–57, sty. 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.08.013.
- [57] W. Prince, M. Espagne, i P.-C. Aïtcin, „Ettringite formation: A crucial step in cement superplasticizer compatibility”, *Cem. Concr. Res.*, t. 33, nr 5, s. 635–641, maj 2003, doi: 10.1016/S0008-8846(02)01042-6.
- [58] O. Akhlaghi *i in.*, „Modified poly(carboxylate ether)-based superplasticizer for enhanced flowability of calcined clay-limestone-gypsum blended Portland cement”, *Cem. Concr. Res.*, t. 101, s. 114–122, lis. 2017, doi: 10.1016/j.cemconres.2017.08.028.
- [59] H. Feng, L. Pan, Q. Zheng, J. Li, N. Xu, i S. Pang, „Effects of molecular structure of polycarboxylate superplasticizers on their dispersion and adsorption behavior in cement paste with two kinds of stone powder”, *Constr. Build. Mater.*, t. 170, s. 182–192, maj 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.195.
- [60] J. Plank, H. Keller, P. R. Andres, i Z. Dai, „Novel organo-mineral phases obtained by intercalation of maleic anhydride-allyl ether copolymers into layered calcium aluminum hydrates”, *Inorganica Chim. Acta*, t. 359, nr 15, s. 4901–4908, grudz. 2006, doi: 10.1016/j.ica.2006.08.038.
- [61] „Effect of temperature and surfactants on evaporation and contact line dynamics of sessile drops”, *Heliyon*, t. 8, nr 11, s. e11716, lis. 2022, doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e11716.
- [62] J. Ortiz, A. Aguado, L. Agulló, T. García, i M. Zermeño, „Influence of environmental temperature and moisture content of aggregates on the workability of cement mortar”, *Compat. Plasters Renders Salt Loaded Substrates*, t. 23, nr 5, s. 1808–1814, maj 2009, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2008.09.016.

- [63] „Influence of environmental temperatures on the concrete compressive strength: Simulation of hot and cold weather conditions”, *Cem. Concr. Res.*, t. 35, nr 10, s. 1970–1979, paź. 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.01.004.
- [64] J. Szwabowski, *Urabialność mieszanki betonowej w ujęciu reologicznym*, t. 65. w Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, vol. 65. Gliwice: Politechnika Śląska, 1987.
- [65] J. Gołaszewski, A. Kostrzanowska, i G. Cygan, „Właściwości reologiczne mieszanki betonowej a zaprawy o różnych składach w układzie zmiennych temperatur.”, w *Dni betonu. Tradycja i nowoczesność.*, Stowarzyszenie Producentów Cementu, 2012, s. 759–168.
- [66] „An investigation into the influence of inter-aggregate spacing and the extent of the ITZ on properties of Portland cement concretes”, *Cem. Concr. Res.*, t. 40, nr 11, s. 1601–1608, lis. 2010, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.07.002.
- [67] J. Śliwiński, *Beton zwykły – projektowanie i podstawowe właściwości*. Kraków: Polski Cement, 1999.
- [68] J. Gołaszewski, A. Kostrzanowska-Siedlarz, G. Cygan, i M. Drewniak, „Mortar as a model to predict self-compacting concrete rheological properties as a function of time and temperature”, *Constr. Build. Mater.*, t. 124, s. 1100–1108, paź. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.08.136.
- [69] „Usability of mortar for predicting shear strength development at rest of fresh self compacting concrete”, *Constr. Build. Mater.*, t. 295, s. 123617, sie. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.123617.
- [70] M. Velay-Lizancos, I. Martinez-Lage, M. Azenha, i P. Vázquez-Burgo, „Influence of temperature in the evolution of compressive strength and in its correlations with UPV in eco-concretes with recycled materials”, *Constr. Build. Mater.*, t. 124, s. 276–286, paź. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2016.07.104.
- [71] M. Husem i S. Gozutok, „The effects of low temperature curing on the compressive strength of ordinary and high performance concrete”, *Constr. Build. Mater.*, t. 19, nr 1, s. 49–53, luty 2005, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2004.04.033.
- [72] „The influence of high temperature curing on the compressive, tensile and flexural strength of pulverized fuel ash concrete”, *Build. Environ.*, t. 35, nr 5, s. 415–423, lip. 2000, doi: 10.1016/S0360-1323(99)00031-1.
- [73] E. Gallucci, X. Zhang, i K. L. Scrivener, „Effect of temperature on the microstructure of calcium silicate hydrate (C-S-H)”, *Cem. Concr. Res.*, t. 53, s. 185–195, lis. 2013, doi: 10.1016/j.cemconres.2013.06.008.
- [74] K. O. Kjellsen i R. J. Detwiler, „Reaction kinetics of portland cement mortars hydrated at different temperatures”, *Cem. Concr. Res.*, t. 22, nr 1, s. 112–120, sty. 1992, doi: 10.1016/0008-8846(92)90141-H.
- [75] „The influence of normal curing temperature on the compressive strength development and flexural tensile behaviour of UHPFRC with vipulanandan model quantification”, *Structures*, t. 30, s. 949–959, kwi. 2021, doi: 10.1016/j.istruc.2021.01.063.
- [76] J. I. Escalante, L. Y. Gómez, K. K. Johal, G. Mendoza, H. Mancha, i J. Méndez, „Reactivity of blast-furnace slag in Portland cement blends hydrated under different conditions”, *Cem. Concr. Res.*, t. 31, nr 10, s. 1403–1409, paź. 2001, doi: 10.1016/S0008-8846(01)00587-7.
- [77] M. Soutsos, F. Kanavaris, i M. Elsageer, „Accuracy of maturity functions’ strength estimates for fly ash concretes cured at elevated temperatures”, *Constr. Build. Mater.*, t. 266, s. 121043, sty. 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121043.
- [78] J. S. Carmel Jolicoeur Nathalie Otis, Andree Lebel, Marc-Andre Simard and Monique Page, „The Influence of Temperature on the Rheological Properties of Superplasticized Cement Pastes”, *Spec. Publ.*, t. 173, sty. 1997, doi: 10.14359/6194.
- [79] M. Heikal, M. S. Morsy, i I. Aiad, „Effect of treatment temperature on the early hydration characteristics of superplasticized silica fume blended cement pastes”, *Cem. Concr. Res.*, t. 35, nr 4, s. 680–687, kwi. 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.06.012.
- [80] H. I. T. Nawa and M. Kinoshita, „Influence of Temperature on Fluidity of Cement Paste Containing Superplasticizer with Polyethylene Oxide Graft Chains”, *Spec. Publ.*, t. 195, sty. 2000, doi: 10.14359/9912.
- [81] S. Grzeszczyk i M. Sudol, „Wpływ temperatury na skuteczność działania superplastyfikatorów nowej generacji”, *Cem. Wapno Beton*, t. 8, nr 70, nr 6, s. 325–331, 2003.
- [82] M. Nehdi i S. Al Martini, „Estimating time and temperature dependent yield stress of cement paste using oscillatory rheology and genetic algorithms”, *Cem. Concr. Res.*, t. 39, nr 11, s. 1007–1016, lis. 2009, doi: 10.1016/j.cemconres.2009.07.011.
- [83] V. Fernández-Altale i I. Casanova, „Influence of mixing sequence and superplasticiser dosage on the rheological response of cement pastes at different temperatures”, *Cem. Concr. Res.*, t. 36, nr 7, s. 1222–1230, lip. 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2006.02.016.

- [84] N. Roussel, „Steady and transient flow behaviour of fresh cement pastes”, *Cem. Concr. Res.*, t. 35, nr 9, s. 1656–1664, wrz. 2005, doi: 10.1016/j.cemconres.2004.08.001.
- [85] W. Brameshuber i S. Uebachs, „The influence of the temperature on the rheological properties of self-compacting concrete”, w *Proc. Third Int. RILEM Symposium (Ed. Wallevik, O. and Nielsson, I.)*, 2003, s. 174–183.
- [86] J. Gołaszewski, *Kształtowanie urabialności mieszanki betonowej superplastyfikatorami*. w Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, no. PL ISSN 0434-0779. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2003.
- [87] J. Gołaszewski, *Wpływ superplastyfikatorów na właściwości reologiczne mieszanek na spoiwach cementowych w układzie zmiennych czynników technologicznych*. w Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, no. PL ISSN 0434-0779. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2006.
- [88] J.-Y. Petit, K. H. Khayat, i E. Wirquin, „Coupled effect of time and temperature on variations of yield value of highly flowable mortar”, *Cem. Concr. Res.*, t. 36, nr 5, s. 832–841, maj 2006, doi: 10.1016/j.cemconres.2005.11.001.
- [89] J.-Y. Petit, E. Wirquin, i K. H. Khayat, „Effect of temperature on the rheology of flowable mortars”, *Cem. Concr. Compos.*, t. 32, nr 1, s. 43–53, sty. 2010, doi: 10.1016/j.cemconcomp.2009.10.003.
- [90] W. Schmidt i H.-C. Kühne, „Influence of the processing temperature on the properties of SCC in the presence of superplasticizer and other admixtures”, *Betonw. Fert.-Tech. Plant Precast Technol.*, t. 73, nr 12, s. 40–49, 2007.
- [91] L. Lohaus i H. Hoeveling, „Robustimprovement für Selbstverrichtenden Beton (SVB)”, zaprezentowano na 15 th International Conferenz on Building Materials - ibausil, Weimar, Germany, 2003, s. 177–187.
- [92] J. Gołaszewski i G. Cygan, „wpływ temperatury na działanie domieszek zwiększających lepkość”, w *Reologia w technologii betonu*, Gliwice.
- [93] W. Schmidt i H.-C. Kühne, „Wechselwirkungen zwischen Zusatzmitteln und mineralischen Komponenten in selbstverrichtendem Beton beim Betonieren in unterschiedlichen Temperaturen”, s. 32–38, 2009.
- [94] N. Ghafoori i H. Diawara, „Influence of temperature on fresh performance of self-consolidating concrete”, *Constr. Build. Mater.*, t. 24, nr 6, s. 946–955, cze. 2010, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2009.11.023.
- [95] H.-C. Kühne i W. Schmidt, „THE INFLUENCE OF TEMPERATURE ON SELF-COMPACTING CONCRETE IN PRESENCE OF SUPERPLASTICIZER AND ADDITIONAL ADMIXTURES”.
- [96] O. Wallevik, S. Oesterheld, i F. V. Mueller, „The Influence of Workability Loss and Thixotrophy on Formwork Pressure in SCC Containing Stabilizers”, w *The Third North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, Chicago, 2008.
- [97] P. Billberg, „Form pressure generated by self-compacting concrete”, w *Proceedings of the 3rd international RILEM symposium on self-compacting concrete, RILEM PRO33 Reykjavik, Iceland*, 2003, s. 271–280.
- [98] S. H. Kwon i S. P. Shah, „Prediction Model For SCC Formwork Pressure”, w *The Third North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, Chicago, 2008, s. 315–323.
- [99] M. Beitzel, H. Beitzel, i H. S. Muller, „Fresh concrete pressure of SCC on a vertical formwork”, w *The Third North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete*, Chicago, 2008, s. 324–329.
- [100] J. Gołaszewski i M. Drewniak, „Dobór deskowań systemowych do wykonywania konstrukcji z betonu samozagęszczonego”, *Inż. Bud.*, nr R. 66, nr 1, s. 23–26, 2010.
- [101] P. Billberg, „Form pressure generated by self-compacting concrete : influence of thixotropy and structural behaviour at rest”, 2006, Dostęp: 25 maj 2023. [Online]. Dostępne na: <https://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:kth:diva-4144>
- [102] J. Assaad i K. H. Khayat, *Effect of casting rate and concrete temperature on formwork pressure of self-consolidating concrete*, t. 39. w *Materials and Structures*, vol. 39. 2006.
- [103] A. F. Omran, Y. M. Elaguab, i K. H. Khayat, „Effect of placement characteristics on SCC lateral pressure variations”, *Constr. Build. Mater.*, t. 66, s. 507–514, wrz. 2014, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2014.05.042.
- [104] „Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies”, *Clean. Mater.*, t. 6, s. 100143, grudz. 2022, doi: 10.1016/j.clema.2022.100143.
- [105] N. Dave, A. K. Misra, A. Srivastava, i S. K. Kaushik, „Experimental analysis of strength and durability properties of quaternary cement binder and mortar”, *Constr. Build. Mater.*, t. 107, s. 117–124, mar. 2016, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2015.12.195.
- [106] „Effect of fly ash fineness on microstructure of blended cement paste”, *Constr. Build. Mater.*, t. 21, nr 7, s. 1534–1541, lip. 2007, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2005.12.024.

- [107] „Impact of fly ash production and sourcing changes on chemical and physical aspects of concrete durability”, *Constr. Build. Mater.*, t. 342, s. 127313, sie. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127313.
- [108] J. Gołaszewski, *Domieszki do betonu efekty działania ocena i badania efektywności stosowanie*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2016.
- [109] M. Urban, „Reologiczne podstawy uzyskiwania betonów samozagęszczalnych o wysokiej wytrzymałości”, *Cem. Wapno Beton*, t. 13, nr 75, nr 5, s. 241–253, 2008.
- [110] „Synergistic effect of polycarboxylate superplasticizer and silica fume on early properties of early high strength grouting material for semi-flexible pavement”, *Constr. Build. Mater.*, t. 319, s. 126065, luty 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126065.
- [111] K. Wandoch, „Kształtowanie składu współczesnego betonu dla potrzeb budownictwa z uwzględnieniem wymagań ekologicznych (rozprawa doktorska)”. Politechnika Śląska, 2022. [Online]. Dostępne na: https://bip.polsl.pl/nadania_dr/ksztaltowanie-skladu-wspolczesnego-betonu-dla-potrzeb-budownictwa-z-uwzględnieniem-wymagan-ekologicznych/
- [112] M. Tałaj, „OCENA TRWAŁOŚCI BETONÓW NISKOEMISYJNYCH (Rozprawa doktorska)”. Politechnika Śląska, 2022.
- [113] „Potential of finely ground limestone powder to benefit ultra-high performance concrete mixtures”, *Constr. Build. Mater.*, t. 141, s. 335–342, cze. 2017, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.02.073.
- [114] K. L. Scrivener i A. Nonat, „Hydration of cementitious materials, present and future”, *Cem. Concr. Res.*, t. 41, nr 7, s. 651–665, lip. 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2011.03.026.
- [115] B. Lothenbach, K. Scrivener, i R. D. Hooton, „Supplementary cementitious materials”, *Cem. Concr. Res.*, t. 41, nr 12, s. 1244–1256, grudz. 2011, doi: 10.1016/j.cemconres.2010.12.001.
- [116] „PN-EN 206–1. Beton Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”.
- [117] K. Trukcje i E. Enty, „A R T Y K U Ł Y P R O B L E M O W E”.
- [118] J. Babińska i in., Red., *Wykonywanie robót budowlanych w okresie obniżonej temperatury: wytyczne = Construction works in periods of low temperature: guidelines*. w Instrukcje, Wytyczne, Poradniki / Instytut Techniki Budowlanej. Warszawa: Instytut Techniki Budowlanej, 2020.
- [119] G. De Schutter, Red., *Self-compacting concrete*. Dunbeath: Whittles Publ. [u.a.], 2008.
- [120] J. Daczko, *Self-consolidating concrete: applying what we know*. CRC press, 2012.
- [121] Ch. Schröfl, M. Gruber, i J. Plank, „Preferential adsorption of polycarboxylate superplasticizers on cement and silica fume in ultra-high performance concrete (UHPC)”, *Cem. Concr. Res.*, t. 42, nr 11, s. 1401–1408, lis. 2012, doi: 10.1016/j.cemconres.2012.08.013.