

Politechnika Warszawska
Wydział Inżynierii Środowiska
Instytut Zaopatrzenia w Wodę i Budownictwa Wodnego

Rozprawa doktorska

mgr inż. Agnieszki Machowskiej

*Wpływ aktywacji spoiwa żużlowego fluidalnym
popiołem lotnym z węgla brunatnego na właściwości
zawiesin twardniejących*

Promotor:

prof. nzw. dr hab. inż. Zbigniew Kledyński

Warszawa, 2007

Dedykuje Moim Rodzicom

SPIS TREŚCI

1. Wprowadzenie	5
1.1. Wstęp	5
1.2. Zawiesina twardniejąca – określenie materiału i zakresu zastosowań	7
1.3. Rodzaje zawiesin twardniejących i charakterystyka składników	8
1.3.1. Bentonit	17
1.3.2. Granulowany mielony żużel wielkopiecowy	19
1.3.3. Popiół fluidalny z węgla brunatnego	26
1.3.4. Produkty hydratacji wykorzystanych spoiw	31
2. Przedmiot, teza, cel i zakres pracy	34
3. Dziedzina, plan i program eksperymentu	36
4. Badania zawiesiny płynnej	40
4.1. Gęstość objętościowa	40
4.2. Odstój dobowy wody	41
4.3. Przesącz filtracyjny	41
4.4. Lepkość umowna	44
4.5. Wytrzymałość strukturalna	45
4.6. Krzywe płynięcia	46
5. Badania zawiesiny stwardniałej	56
5.1. Właściwości mechaniczne i filtracyjne	56
5.1.1. Wytrzymałość na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu	56
5.1.2. Przepuszczalność hydrauliczna	59
5.1.3. Odkształcalność	67
5.2. Skład fazowy i mikrostruktura	73

5.2.1. Analiza termiczna	76
5.2.2. Rentgenowska analiza dyfrakcyjna	77
5.2.3. Skaningowa mikroskopia elektronowa	78
6. Omówienie wyników badań	79
6.1. Omówienie wyników badań zawiesiny płynnej	80
6.2. Omówienie wyników badań zawiesiny stwardniałej	86
7. Wnioski	114
8. Bibliografia	116
Załącznik 1. Wyniki badań zawiesiny płynnej	125
Załącznik 2. Wyniki badań zawiesiny stwardniałej	152
Załącznik 3. Wyniki badań składu fazowego i mikrostruktury zawiesiny stwardniałej	218
Załącznik 4. Wyniki eksperymentu: funkcje regresji i plany warstwiczne	236

1. Wprowadzenie

1.1. Wstęp

W Polsce najpowszechniejszą metodą pozyskiwania energii elektrycznej i ciepłej jest spalanie węgla kamiennego i brunatnego w elektrowniach i elektrociepłowniach. Podczas tego procesu powstają uboczne produkty spalania w postaci popiołu lotnego, żużla i produktów odsiarczania spalin. Na jakość i ilość ubocznych produktów spalania istotny wpływ ma m.in. sposób spalania – w kotłach konwencjonalnych lub fluidalnych, a także rodzaj paliwa stałego. Ogromne znaczenie dla ochrony środowiska naturalnego ma odzysk ubocznych produktów spalania. Popiół lotny powstały w wyniku konwencjonalnego spalania węgla ma szerokie zastosowanie w przemyśle cementowym i produkcji betonu jako dodatek zastępujący częściowo cement w betonie. Ze względu na konieczność ograniczenia emisji gazów spalinowych do atmosfery przemysł energetyczny od kilku lat stosuje nową technikę spalania węgla w kotłach zaopatrzonych w cyrkulacyjną warstwę fluidalną, która zatrzymuje tlenki siarki i azotu emitowane podczas spalania konwencjonalnego. Popioły pochodzące z fluidalnego spalania węgla są przedmiotem badań prowadzonych w licznych ośrodkach naukowych w kraju i za granicą.

Granulowany mielony żużel wielkopiecowy jest od prawie stu pięćdziesięciu lat wykorzystywany ze względu na swoje hydrauliczne właściwości wiążące. Rozpoczęty w połowie XX wieku i od tamtej pory udoskonalany proces granulacji żużla pochodzącego z wytopu surówki żelaza umożliwia otrzymywanie materiału o wysokiej zawartości fazy szklistej, która jest jednym z głównych czynników determinujących jego właściwości wiążące. Obecnie żużel wielkopiecowy uważany jest za surowiec do produkcji pełnowartościowych produktów, a jego właściwości chemiczne i fizyczne są ściśle określone w obowiązujących normach. Szacuje się, że rocznie w przemyśle hutniczym na świecie produkuje się około 40 milionów ton żużla, a w Polsce produkcja ta wynosi 1,5 mln ton. Ponad 85% tej produkcji jest wykorzystywane jako materiał konstrukcyjny na drogi, dodatek do cementu, nawóz sztuczny, do stabilizacji gruntów lub jako materiał wykorzystywany w garncarstwie. Żużel wielkopiecowy jako dodatek do betonu zwiększa jego odporność na agresywne działanie środowiska w stosunku do betonu wykonanego z cementu portlandzkiego. Z tego powodu jest on stosowany do wykonywania budowli pracujących w wodzie, np. budowle morskie, oczyszczalnie ścieków, stacje uzdatniania wody.

Niniejsza rozprawa doktorska zawiera badania wysokowodnych zawiesin twardniejących skomponowanych z oryginalnego materiału w postaci spoiwa żużlowego aktywowanego fluidalnym popiołem lotnym z węgla brunatnego. Celem pracy było sprawdzenie możliwości wykorzystania surowca wtórnego przemysłu hutniczego i ubocznego produktu spalania do wykonania zawiesin twardniejących z przeznaczeniem na przesłony przeciwfiltracyjne. Pionowe przesłony w podłożu wykonuje się różnymi metodami, w zależności m.in. od warunków gruntowowodnych na terenie wbudowania i dostępnego sprzętu (Kledyński, Machowska, 2005)¹.

* * *

Składam serdeczne podziękowania Promotorowi, Panu Profesorowi Zbigniewowi Kledyńskiemu, za poświęcony czas, pomoc i cenne uwagi, Pani Docent Róży Krzymobłockiej-Laurow za cenne uwagi merytoryczne, oraz wszystkim, których życzliwa pomoc przyczyniła się do powstania tej pracy. Dziękuję także firmie Górażdże Cement S.A. za udostępnienie materiałów do badań laboratoryjnych.

¹ Dane bibliograficzne przywoływanej literatury zestawiono w rozdziale 8 lub w przypisach, jeśli pozycja literatury była dostępna tylko pośrednio, tj. przez cytowanie w innej pozycji

1.2. Zawiesina twardniejąca – określenie materiału i zakresu zastosowań

Zawiesina twardniejąca jest wysokowodną mieszaniną zawierającą składnik nadający jej właściwości tiksotropowe, np. bentonit, oraz spoiwo, którego dodatek decyduje o jej właściwościach konstrukcyjnych po stwardnieniu. Zawiesina twardniejąca pełni różne funkcje w zależności od stanu fizycznego w jakim się znajduje. Do momentu rozpoczęcia procesu wiązania spoiwa zawiesina pełni rolę płuczki wiertniczej – utrzymuje w stateczności otwór lub wykop wąskoprzestrzenny głębinowy w gruncie. Właściwości tiksotropowe płynnej zawiesiny twardniejącej mają drugorzędne znaczenie jedynie wtedy, gdy jest ona stosowana do wypełniania wcześniej przygotowanych wykopów lub otworów wierconych pod osłoną rur. Płynną zawiesinę powinny charakteryzować również określone właściwości technologiczne, np. lepkość, które są ważne z punktu widzenia sposobu wykonania konstrukcji. Po związaniu spoiwa zawiesina nabiera właściwości charakterystycznych dla materiału konstrukcyjnego, tzn. w czasie twardnienia osiąga pewną wytrzymałość mechaniczną oraz właściwości przeciwfiltracyjne (Kledyński, 2000; Rafalski, 1995).

Zawiesina twardniejąca ma swoje zastosowanie w wąskim zakresie robót budowlanych związanych z posadowieniem i zespoleniem z gruntem stalowych lub betonowych elementów prefabrykowanych (ścianki lub pale) oraz do wykonania samodzielnych elementów konstrukcyjnych jakimi są pionowe lub poziome bariery przeciwfiltracyjne.

W przeważającej liczbie przypadków konkretny skład zawiesiny twardniejącej określa się doświadczalnie w zależności od właściwości, jakimi ma się ona charakteryzować. W literaturze można znaleźć wskazówki dotyczące projektowania, a nawet szczegółowe składy zawiesin oraz charakterystykę wpływu poszczególnych składników na ich właściwości, np. (Kledyński, 2000; Rafalski, 1995). Jefferis (Jefferis, 1981) proponuje trójkąt woda–bentonit–cement do zobrazowania składu zawiesin, w którym pojawiają się wydzielone obszary charakteryzujące zawiesiny nie wiążące, zawiesiny przeznaczone do ekranów przeciwfiltracyjnych, zawiesiny półpłynne, zawiesiny niestabilne (ze względu na zbyt duży odstój wody) oraz pasty lub pyły.

Obszar wyznaczony jako „zawiesiny do ekranów przeciwfiltracyjnych” umożliwia zaprojektowanie składu zawiesin twardniejących cementowo-bentonitowo-wodnych o odpowiednich właściwościach. Jednakże sposób ten nie uwzględnia wpływu środków modyfikujących (dodatki i domieszki) oraz nie pozwala projektować zawiesin zawierających bentonity o mniejszej aktywności, np. sodowo-wapniowe, wapniowe lub zawierających małą ilość frakcji ilowej, a w tym montmorillonitu (Rafalski, 1995).

1.3. Rodzaje zawiesin twardniejących i charakterystyka składników

Zawiesiny dotychczas stosowane lub badane w Polsce można usystematyzować w następujący sposób:

- cementowo-bentonitowo-wodne,
- cementowo-bentonitowo-wodne z domieszkami chemicznymi,
- cementowo-bentonitowo-wodne z dodatkami, takimi jak:
 - piasek,
 - popiół z węgla kamiennego,
 - popiół fluidalny z węgla kamiennego lub brunatnego,
 - żużel wielkopiecowy,
- bentonitowo-wodne z dodatkami, takimi jak:
 - popiół z węgla brunatnego,
 - popiół z węgla kamiennego,
 - wapno,
- cementowo-bentonitowo-wodne z dodatkami (np. popiół lotny) , tzw. mieszanki firmowe.

Informacje szczegółowe na temat składów i właściwości wyżej wymienionych zawiesin można znaleźć w literaturze przedmiotu, np. (Kledyński, 1997; Kledyński, 2000). Ze względów praktycznych i formalnych oraz w związku z polityką jednostek aprobacyjnych w zakresie udzielania aprobat na materiały do produkcji zawiesin twardniejących największe znaczenie mają mieszanki gotowe, dopuszczone do użycia stosowną aprobatą techniczną.

W tabeli 1 zestawiono podstawowe informacje o takich materiałach stosowanych w Polsce.

Tabela 1. Mieszanki firmowe dostępne na polskim rynku

Nazwa handlowa	Informacje o składzie	Właściwości:										Nr aprobaty
		zawiesiny płynnej						zawiesiny stwardniałej		materiału w przegrodzie przeciwi-filtracyjnej		
		ρ , g/cm ³	L , s	η_L , Pa	O_{db} , %	t_{pw} , doby	t_{kw} , doby	f_c^{28} , MPa	k^{28} , m/s	f_c^{28} , MPa	k^{28} , m/s	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Flucent	aktywowany lotny popiół fluidalny, cement portlandzki.	1,25–1,50	35–70	4,5–8,5	≤7	1–4	2–6	≥0,5	≤10 ⁻⁸	≥0,3	≤10 ⁻⁷	AT/18-2004-0021-00-IMUZ
Clayfill 1	wodna zawiesina gliny (ok. 45%), cement portlandzki (min. 5%), popiół lotny (ok. 50%).	≥1,6	¹⁾	>62	²⁾ 0	3–4	>4	≥0,5	≤10 ⁻⁸	≥0,3	≤10 ⁻⁷	AT/18-2004-0019-00-IMUZ
Geostat	bentonit sodowy: (ok. 20%), mielone spoiwo żuźlowe (pow. 75%), cement hutniczy (do 5%).	1,14–1,20	≤55	≥2	³⁾ ≤3,5	≥5	≤10	≥0,5	≤10 ⁻⁸	≥0,35	≤10 ⁻⁷	AT/18-2004-0018-00-IMUZ
Bentocem K	cement hutniczy (29-37%), bentonit sodowy (6-8%).	1,30–1,40	40–45	≥30	⁴⁾ 1–4	≥1	≤4	≥1,0	<10 ⁻⁸	≥0,5	<10 ⁻⁷	AT/18-2004-0017-00-IMUZ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Bentocem 100	cement hutniczy (7-10%), bentonit sodowy (2-5%), maączka wapienna (29-41%).	1,35–1,50	35–45	≥20	⁵⁾ 2–5	≥5	≤20	≥0,5	<10 ⁻⁸	≥0,3	≤10 ⁻⁷	AT/18-2004- 0017-00-IMUZ
Bentocem 200	cement hutniczy (7-10%), bentonit sodowy (3-5%), maączka wapienna (15-20%), popioły normowe (15-20%).	1,35–1,45	35–50	≥20	⁶⁾ 2–6	≥5	≤20	≥0,5	<10 ⁻⁸	≥0,3	≤10 ⁻⁷	AT/18-2004- 0017-00-IMUZ
Mixbent 1	cement: (11-19%), suchy popiół lotny (28-35%).	1,33–1,45	37–38	≤5	≤39	≥1	≤5	≥0,5	<10 ⁻⁸	≥0,3	<10 ⁻⁷	AT/18-2005- 0022-00-IMUZ
Mixbent 2	cement (1,7-8%), bentonit sodowy (0-5%), suchy popiół lotny (0-26%), mielony żużel wielkopiecowy (14-49%).	1,40–1,55	34–37	≤10	≤33	≥1	≤5	≥0,5	<10 ⁻⁸	≥0,3	<10 ⁻⁷	AT/18-2005- 0022-00-IMUZ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Mixbent 3	Cement: (1,7-3,6%), bentonit sodowy (0,7-1,2%), suchy popiół lotny (0-29%), mielony żużel wielkopiecowy (21-45%).	1,40–1,55	40–49	≥10	≤12	≥1	≤5	≥0,5	<10 ⁻⁸	≥0,3	<10 ⁻⁷	AT/18-2005- 0022-00-IMUZ
Roztwór hydroizo- lacyjny na bazie glin polimine- ralnych	głina o wymaganym składzie granulometrycznym (19-43%), cement portlandzki, hutniczy, specjalny (w zależności od chemizmu wód podziemnych; 6-15%), szkło wodne sodowe (0,5-1%), woda technologiczna (jako uzupełnienie do 100%)	1,20–1,35	⁷⁾	0	-	-	-	-	-	-	-	AT/18-2002- 0011-00-IMUZ

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Solidur 274C	Aprobata podaje skład mineralogiczny: substancje wiążące: SiO_2 (ok.40%), Al_2O_3 (ok.9%), Fe_2O_3 (ok.2%), CaO (ok.38%), MgO (ok.7%), Na_2O+K_2O (ok.1,5%), SO_3^{2-} (ok.1%), Cl (<0,1%), bentonit (30±50 kg/m ³ zawiesiny), mączka wapienna.	1,35–1,50±0,05	38–60	≥20	⁸⁾ ≤4	≥2	≤7	≥0,5	<10 ⁻⁸	≥0,3	<10 ⁻⁷	AT/18-2006-0026-00-IMUZ (zastępuje i rozszerza AT/15-2000-0003-00-IMUZ)
Solidur 273	Aprobata podaje, że Solidur 273 to mieszanina Solidur 274C i mączki wapiennej	1,35–1,50 ±0,05	38–60	≥20	⁹⁾ ≤4	≥2	≤7	≥0,5	<10 ⁻⁸	≥0,3	<10 ⁻⁷	AT/18-2006-0026-00-IMUZ (zastępuje i rozszerza AT/18-2002-0003-01-IMUZ)
Solidur 274RV	Aprobata podaje, że jest to mieszanina cementu, bentonitu i/lub granulowanego żużla wielkopieczowego, i/lub mączki wapiennej	≥1,15±0,05	≥35	≥14,5	¹⁰⁾ ≤4	≥2	≤7	≥0,5	<10 ⁻⁸	≥0,3	<10 ⁻⁷	AT/18-2006-0026-00-IMUZ (zastępuje i rozszerza AT/18-2002-0003-01-IMUZ)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Solidur MIP 05	Aprobata podaje skład mineralogiczny: substancje wiążące: SiO_2 (ok.24%), Al_2O_3 (ok.11%), CO_2 (ok.12,5%), C_2O (ok.39%), Fe_2O_3 (ok.4%), MgO (ok.2%), SO_3 (ok.4%), K_2O (ok.1,5%), pozostałe (ok.2%), Cl (<0,1%), wypełniacze zawierające il.	1,45	35–40	-	¹¹⁾ -	-	-	$\geq 0,5$ ¹²⁾	$\leq 10^{-9}$	-	-	AT/18-2003-0016-00-IMUZ
Solidur MIP 75	Aprobata podaje skład mineralogiczny: substancje wiążące: SiO_2 (ok.27%), Al_2O_3 (ok.7%), CO_2 (ok.10%), CaO (ok.45%), Fe_2O_3 (ok.2%), MgO (ok.4%), SO_3 (ok.3%), K_2O (ok.1%), pozostałe (ok.1%), Cl (<0,1%), wypełniacze zawierające il.	1,60	40–50	-	¹³⁾ -	-	-	$\geq 7,5$ ¹⁴⁾	$\leq 5 \cdot 10^{-9}$	-	-	AT/18-2003-0016-00-IMUZ
VECTIS	Aprobata podaje, że jest to mieszanina popiołu krzemionkowego, cementu, bentonitu i modyfikatorów.	1,40±0,15	≥ 38	-	¹⁵⁾ $\leq 0,5$	¹⁶⁾ -	¹⁷⁾ -	$\geq 1,0$	$\leq 2 \cdot 10^{-8}$	-	-	AT-15-6555/2004-ITB

Objaśnienia do tabeli 1:

ρ – gęstość objętościowa,

L – lepkość umowna,

τ_L – granica płynności,

O_d – dobowy odstój wody,

t_{pw} – czas początku wiązania,

t_{kw} – czas końca wiązania,

R_c^{28} – wytrzymałość na ściskanie jednoosiowe po 28 dniach,

k^{28} – współczynnik filtracji po 28 dniach,

¹⁾ lepkość dynamiczna $> 0,7 \text{ Pa}\cdot\text{s}$,

²⁾ odstój wody po 2h: 0%,

³⁾ odstój wody po 2h: $\leq 0,5\%$,

⁴⁾ odstój wody po 2h: 1–2%,

⁵⁾ odstój wody po 2h: 1–2,5%,

⁶⁾ odstój wody po 2h: 1,5–2%,

⁷⁾ -lepkość dynamiczna: 0,02–0,07 Pa·s,

-rozlewność określana aparatem stożkowym 8–20 cm,

-statyczne naprężenia ścinające 20–160 Pa,

-dynamiczne naprężenia ścinające 20–120 Pa,

-wytrzymałość plastyczna po 1 dobie 10–150 kPa,

⁸⁾ odstój wody po 2h: $\leq 2,0\%$,

⁹⁾ odstój wody po 2h: $\leq 2,0\%$,

¹⁰⁾ odstój wody po 2h: $\leq 2,0\%$,

¹¹⁾ odstój wody po 2h: $\leq 5,0\%$,

¹²⁾ moduł odkształcenia 30 MPa,

¹³⁾ odstój wody po 2h: $\leq 6,0\%$,

¹⁴⁾ moduł odkształcenia 40 MPa,

¹⁵⁾ odstój wody po 2h: $\leq 1,2\%$,

¹⁶⁾ czas początku wiązania: $\geq 36\text{h}$,

¹⁷⁾ czas końca wiązania: 60–84h.

W tabeli 2 przedstawiono charakterystyki współczesnych rozwiązań materiałowych stosowanych w realizacji przesłon przeciwfiltracyjnych w USA (Andromalos, Fisher, 2007). Znaczący udział mają tam realizacje wykorzystujące grunty miejscowe. Przy tego typu rozwiązaniach wymagany jest jednak grunt o odpowiednich właściwościach, który nie zawsze jest dostępny na miejscu, oraz stosunkowo duża powierzchnia placu budowy. W Polsce przykładem zastosowania gruntu na przesłonę przeciwfiltracyjną były realizacje uszczelnień podłoża zapory w Głębinowie na Nysie Kłodzkiej i Siemianówka na rzece Narew (Kledyński, 2000). Technologia ta nie upowszechniła się jednak w naszych warunkach.

Tabela 2. Typowe parametry mieszanek na przesłony przeciwfiltracyjne wykorzystywane w USA (Andromalos, Fisher, 2007)

Material wypełniający	Przepuszczalność hydrauliczna, m/s	Wytrzymałość na ściskanie, kPa	Gęstość, g/cm ³	Uwagi
1	2	3	4	6
Grunt-bentonit	1·10 ⁻⁹	0	1,60–2,08	min. 15% cząstek drobnych
Grunt-atapulgit	1·10 ⁻⁹	0	1,60–2,08	w środowisku wód zasolonych
Grunt-cement-bentonit	5·10 ⁻⁹	350	1,52–1,92	zwykle mieszanka jest przygotowywana poza miejscem realizacji przesłony
Cement-bentonit	1·10 ⁻⁸	170	1,12–1,20	zawiesiny twardniejące
Cement hutniczy-bentonit	5·10 ⁻⁹	690	1,11–1,15	zawiesiny twardniejące
Impermix TM - cement hutniczy-atapulgit	1·10 ⁻¹¹	690	1,11–1,15	zawiesina twardniejąca – mieszanka firmowa

Tabela 3. Typowe składy zawiesin twardniejących, % wag. – (Andromalos, Fisher, 2007)

Material wypełniający	Bentonit	Atapulgit	Cement portlandzki	Cement hutniczy	Woda
1	2	3	4	5	6
Cement-bentonit	4–6	–	12–20	–	75–84
Cement hutniczy-bentonit	2–4	–	0–5	9–15	80–85
Impermix TM - cement hutniczy-atapulgit	–	4–7	–	7–16	80–85

Tabela 4. Typowe składy mieszanek wypełniających na bazie gruntu, % s.m. gruntu – (Andromalos, Fisher, 2007)

Material wypełniający	Bentonit	Atapulgit	Cement portlandzki
1	2	3	4
Grunt-bentonit	1–5	–	–
Grunt-atapulgit	–	1–5	–
Grunt-cement-bentonit	2–3	–	4–10

Ze względów ekonomicznych, a coraz częściej z powodu zaostrzających się przepisów ochrony środowiska, dąży się do możliwie znacznego wykorzystania w produkcji zawieszin twardniejących odpadów mineralnych, np. żużła wielkopieczowego lub popiołów lotnych.

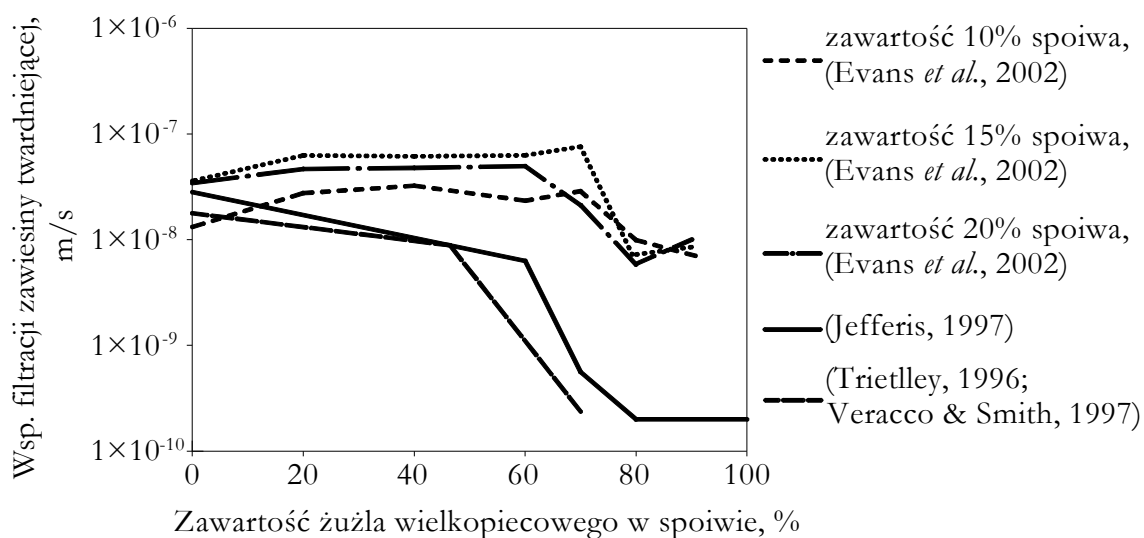
W Wielkiej Brytanii w wykonawstwie przesłon przeciwfiltracyjnych dominują zawiesziny cementowo-bentonitowo-wodne z dodatkiem granulowanego mielonego żużła wielkopieczowego (Evans, 2002), na co znaczący wpływ ma podaż tego dodatku ze strony przemysłu hutniczego. Wykorzystanie tego materiału spełnia nie tylko wymogi ochrony środowiska, ale także pozwala na zmniejszenie kosztów inwestycji.

Wykorzystuje się recepty zawierające od 75 do 80% zawiesziny bentonitowo-wodnej i od 20 do 25% spoiwa mineralnego, a w składzie spoiwa jest od 20 do 25% cementu portlandzkiego i od 75 do 80% żużła wielkopieczowego. Cement, poprzez alkalizację środowiska, stanowi aktywator dla spoiwa żużlowego.

Przykładowa receptura zawiesziny (na 1m^3 zawiesziny) (Opdyke, Evans, 2005):

- 35 kg bentonitu,
- 120 kg żużła wielkopieczowego,
- 30 kg cementu portlandzkiego,
- 934 kg wody.

Badania współczynnika filtracji przesłon przeciwfiltracyjnych po 90 dniach twardnienia, w których zastosowano jako materiał wiążący żużel wielkopieczowy wykazały, że ulega on znacznemu obniżeniu, przy zawartości żużła powyżej 70–80% w stosunku do zawartości cementu (rys. 1).



Rys. 1. Wpływ zawartości żużła wielkopieczowego w spoiwie na wodoprzepuszczalność zawiesziny twardniejącej, według różnych badaczy (Evans *et al.*, 2002; Jefferys, 1997; Trietley, 1996; Veracco, Smith, 1997)

1.3.1. Bentonit

Bentonit jest ilastą, silnie pęczniejącą skałą osadową, której głównym składnikiem jest minerał montmorillonit powstający w wyniku wietrzenia tufów wulkanicznych (głównie kredowych i trzeciorzędowych) w środowisku zasadowym ($\text{pH} \sim 8$) i silnie zasolonym. Nazwa „bentonit” pochodzi od miejsca, gdzie po raz pierwszy eksploatowano złoża tej skały – Fort Benton w stanie Wyoming w USA (Kaczyńska, 2001).

Zgodnie z normami światowymi, bentonitem przyjęto nazywać skałę ilastą, która zawiera nie mniej niż 75% montmorillonitu, natomiast kopaliny o zawartości 50–75% montmorillonitu klasyfikuje się jako ily bentonitowe.

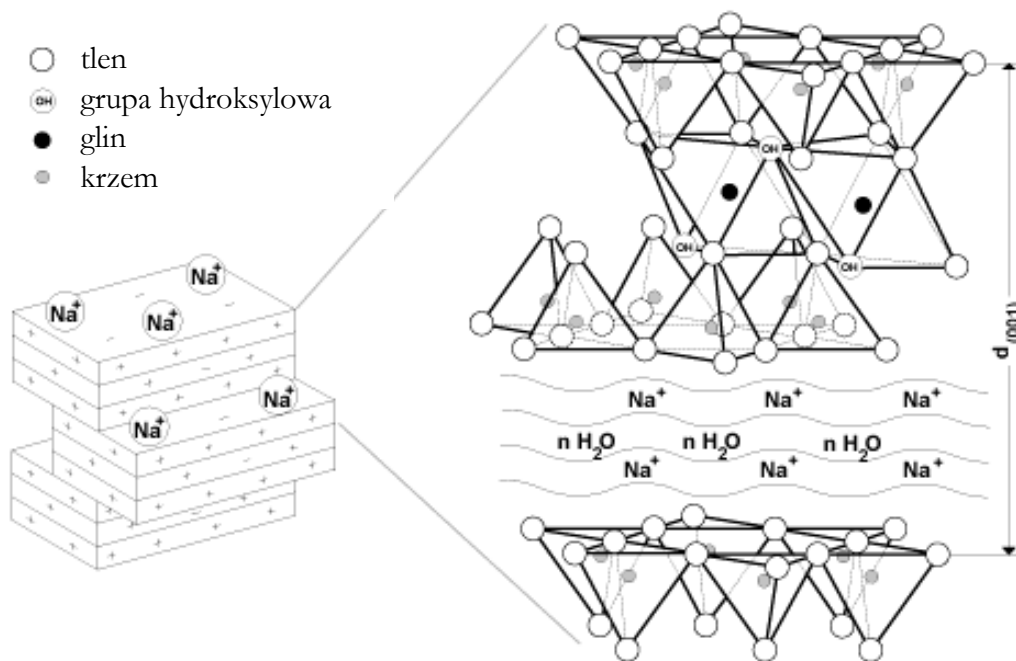
Montmorillonit, główny składnik bentonitu, jest minerałem z grupy smektytów. Jest to krzemian o trójwarstwowej strukturze pakietu sieciowego – oktaedryczna warstwa metalotlenowa (glinowo-tlenowa lub magnezowo-tlenowa) znajduje się pomiędzy dwiema tetraedrycznymi warstwami krzemowo-tlenowymi. Każdy jon glinu z warstwy ośmiościanowej jest otoczony czterema jonami tlenu i dwoma jonami wodorotlenowymi $\text{AlO}_4(\text{OH})_2$. Skład chemiczny montmorillonitów różni się zawsze od składu teoretycznego, gdyż krzem może być częściowo (tylko do 15%) zastępowany przez glin, a glin z luk oktaedrycznych jest zastępowany przez kationy o niższej wartościowości (magnez, żelazo, cynk itd.) (Skalmowski, 1971). Na skutek tych podstawień powstaje nadmiar ładunku ujemnego, który lokalizuje się na powierzchniach pakietów. Ładunek ten równoważony jest przez kationy adsorbowane w przestrzeni międzypakietowej, a ponieważ pole elektrostatyczne pakietu jest słabe, kationy te są łatwo wymienne. Pojedyncza cząstka montmorillonitu ma postać płytki o grubości 1 nm (10^{-9} m) i pozostałych wymiarach (szerokość i długość) rzędu 0,2–2 μm (10^{-6} m) (Grim, 1968).

Charakterystyczną i ważną cechą surowców montmorillonitowych (posiadających międzypakietowe warstwy wodne) jest, poza adsorpcją zewnętrzną, zdolność silnego pęcznienia pod wpływem wody – cząsteczki wody wchodzi między pakiety powodując znaczną zmianę odstępów sieciowych w kierunku prostopadłym do powierzchni ograniczającej pakiet. Poszczególne pakiety elementarne stykają się ze sobą jednakowymi warstwami atomów tlenu, przez co siły wzajemnego oddziaływania między pakietami są szczególnie słabe i dzięki temu zarówno kationy wymienne jak i woda mają łatwy dostęp do cząstek minerału. W przestrzeń międzypakietową może wchodzić różna ilość wody w zależności od wilgotności otaczającego środowiska i od rodzaju kationów znajdujących się między

pakietami. Cząsteczki wody tworzą warstwy o uporządkowanej strukturze. Każdy jon w warstwie wodnej jest otoczony tetraedrycznie przez cztery jony wodoru. Cząsteczki wody łączą się ze sobą wiązaniem protonowym tworząc sieć wodną o symetrii heksagonalnej.

Istotna jest też łatwość oddawania przez montmorillonit zaadsorbowanej wody w podwyższonej temperaturze. Zjawisko pochłaniania i oddawania wody jest odwracalne w temp. 550°C.

Zdolność pęcznienia montmorillonitu zależy od właściwości kationu wymiennego. W zależności od jego rodzaju rozróżniamy bentonity sodowe, wapniowe, potasowe lub organobentonity zwane również bentonami. Gdy przeważają jony sodu, w strefę międzypakietową może być absorbowana znaczna ilość wody, co powoduje zwiększenie odstępów między pakietami i znaczne pęcznienie.



Rys. 2. Budowa pakietowa montmorillonitu sodowego (Trauger, 1992)

Gdy przeważają jony wapnia lub magnezu, zjawisko to zachodzi w mniejszym stopniu (bentonity wapniowe wykazują słabe właściwości pęcznienia). W środowisku o odpowiednim (alkalicznym) pH oraz w obecności jonów sodu może nastąpić nawet odłączenie się poszczególnych pakietów i silny wzrost stopnia dyspersji danego bentonitu. Zjawisko to wykorzystywane jest w procesie przemysłowej aktywacji bentonitów, polegającej na wzbogaceniu w kationy Na^+ . Przeróbka przemysłowa polega na przemiale podsuszonego surowca i mieszaniu go

z substancjami aktywnymi (głównie z Na_2CO_3) w obecności odpowiedniej ilości wody

i w podwyższonej temperaturze. Otrzymany produkt jest suszony, mielony i dokładnie mieszany, tak aby wyrób handlowy (proszek o bardzo drobnym uziarnieniu) wykazywał stałe właściwości (Kaczyńska, 2001).

Szczególną cechą bentonitu jest tiksotropia, czyli zdolność przechodzenia koloidalnych żeli tego minerału w zol w wyniku działania czynników mechanicznych, np. mieszania. Zol pozostawiony w spokoju przechodzi z powrotem w żel. Tiksotropia występuje często w tych przypadkach, gdy drobne cząstki substancji tworzącej żel są nieizometryczne, zwłaszcza gdy mają postać tabliczkową lub pałeczkową. Cząstki ciała stałego tworzą w żelu tiksotropowym szkieletowe rusztowanie. W dużych lukach tego rusztowania tkwią cząsteczki wody, przez co żele tiksotropowe mają wyjątkowo dużą zawartość wody w porównaniu z masą substancji tworzącej osad. Przy wstrząsaniu lub mieszaniu szkielet taki rozpada się tworząc odrębne cząstki – żel się upłynnia przechodząc w zol (Skalmowski, 1971).

1.3.2. Granulowany mielony żużel wielkopiecowy

Granulowany żużel wielkopiecowy, wysuszony i zmielony do odpowiedniej powierzchni właściwej jest stosowany jako dodatek mineralny do produkcji cementu i betonu. Zastosowanie cementu hutniczego (CEM III/A, B) w produkcji betonu pozwala na obniżenie ciepła hydratacji z jednoczesnym zachowaniem projektowanej klasy wytrzymałościowej. Istotną zaletą jest również duży przyrost wytrzymałości w długich okresach twardnienia, zmniejszenie ilości porów kapilarnych, zwiększenie szczelności struktury betonu, a co za tym idzie ograniczenie przepuszczalności betonu, ograniczenie penetracji chlorków i czynników agresywnych.

Zainteresowanie granulowanym żużlem wielkopiecowym jako dodatkiem do cementu wynika również z faktu, że produkcja klinkieru jest wysoce energochłonna i w czasie procesu następuje wydzielanie do atmosfery dwutlenku węgla powstałego w wyniku spalania paliwa i rozkładu węglanu wapnia (Małolepszy, 2003). Emisja dwutlenku węgla w Polsce przekracza 360 mln ton rocznie, z czego neutralizowane przez obszary zielone jest zaledwie ok. 42 mln ton. Stanowi to około 5,5% globalnej emisji i lokuje nasz kraj w czołówce państw europejskich (Żurawski, 2007). Obwieszczenie Ministra Środowiska (*Obwieszczenie...*, 2007) ustanawia, że w Polsce opłata za emisję CO_2 do atmosfery w 2007 r. wynosi 0,23 zł za tonę, co wymusza wzrost kosztów produkcji klinkieru portlandzkiego. Ponadto składowanie

odpadu przemysłu hutniczego jakim jest żużel wielkopiecowy oraz ubocznego produktu spalania w postaci popiołu lotnego jest również objęte opłatami (15,71 zł/tonę) za tzw. korzystanie ze środowiska (*Obwieszczenie...*, 2007), co zwiększa zainteresowanie przemysłu cementowego tymi surowcami wtórnymi.

Żużel wielkopiecowy jest produktem ubocznym otrzymywanym w procesie wytopienia surówki żelaza w wielkim piecu hutniczym z surowców wsadowych wprowadzanych do pieca w postaci rudy żelaza, koksu i topników, którymi najczęściej są boksyty i wapień. Piec jest ogrzewany poprzez spalanie koksu w gorącym powietrzu. Proces wytopu surówki żelaza jest prowadzony w temp. +1400–1600°C. W wyniku wytopu mieszaniny wsadu uzyskuje się na powierzchni surówki stopiony żużel wielkopiecowy. Po oddzieleniu od surówki następuje jego schłodzenie i granulowanie. Do tego procesu, zależnie od przyjętej technologii, stosuje się wodę lub powietrze. Gwałtowne schłodzenie wodą pod ciśnieniem do temperatury poniżej +800°C umożliwia osiągnięcie powyżej 90% zawartości fazy szklistej w składzie fazowym żużla, co ma istotne znaczenie przy jego zastosowaniu jako dodatku mineralnego do cementu. Wynika to z faktu, że szkło żużlowe reaguje z wodą znacznie intensywniej niż związki krystaliczne. Stąd wysoka zawartość fazy szklistej zapewnia wysoką aktywność hydrauliczną żużla i wpływa korzystnie na rozwój trwałej struktury i wytrzymałości zapraw i betonów z jego dodatkiem (*Cement, kruszywa...*, 2005; Taylor, 1997). Ważny wpływ na właściwości hydrauliczne żużla ma również temperatura stopu poddawanego granulacji, szybkość chłodzenia i dostępność tlenu podczas tego procesu. Szybkość chłodzenia wpływa na temperaturę przemiany – im jest większa tym wyższa temperatura transformacji i bardziej otwarta budowa szkła (Zarzycki, 1982).

Ziarna żużla powstałego w wyniku chłodzenia wodą pod ciśnieniem osiągają wymiary 0–4 mm i charakteryzują się niską porowatością (*Cement, kruszywa...*, 2005). Na fot. 1 przedstawiono ziarna granulowanego żużla wielkopiecowego (powiększenie 200 razy).



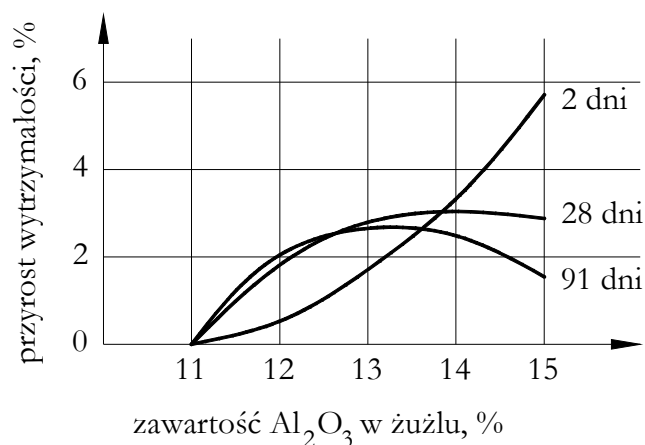
Fot. 1. Granulowany żużel wielkopiecowy (Locher, 2006)

Alternatywną metodą produkcji granulowanego żużla wielkopiecowego jest tzw. ziarnowanie, polegające na częściowym schłodzeniu żużla przy pomocy wody, a następnie wyrzuceniu go w powietrze za pomocą obracającego się bębna. Otrzymany tą metodą żużel wielkopiecowy charakteryzują frakcje od kilku do około 15 mm i niska zawartość fazy szklistej (około 50%), która zmniejsza się wraz ze wzrostem rozmiarów ziaren żużla. Zaletami tej metody produkcji żużla jest obniżenie kosztów, zmniejszenie emisji związków siarki oraz otrzymanie produktu, który może być wykorzystany jako kruszywo lekkie (Taylor, 1997).

Żużel wielkopiecowy pod względem chemicznym w 90–95% masy składa się głównie z CaO , MgO , Al_2O_3 , i SiO_2 . Mały udział mają tlenki Fe_2O_3 , TiO_2 , MnO , Cr_2O_3 (Giergiczny *et al.*, 2002).

Aktywność hydrauliczna żużla wielkopiecowego zależy od składu chemicznego, fazowego i stanu fizycznego. W żużlach wielkopiecowych obserwuje się niejednorodność fazy szklistej. Następuje wtrącanie centrów mikrokrystalizacji, występują fragmenty szkła, które różni się składem chemicznym od składu podstawowej masy, oraz pęcherzyki gazów. Obserwuje się również produkty reakcji powstałe pod wpływem czynników atmosferycznych (Peukert, 2000). Badacze (Demoulian *et al.*, 1980) dowodzą, że stopień zeszklenia żużla nie jest jedynym kryterium jego aktywności hydraulicznej, a składniki występujące w mniejszej koncentracji w żużlu mają na ten parametr znaczący wpływ. Aby ocenić aktywność hydrauliczną żużla należy określić również jego skład chemiczny.

Ze względu na skład chemiczny żużli wielkopiecowych rozpatruje się aktywność hydrauliczną biorąc pod uwagę pięć następujących parametrów chemicznych: $\text{CaO}+\text{MgO}$, Al_2O_3 , równoważne Na_2O , P_2O_5 i MnO . Wzrost wytrzymałości na ściskanie zapraw z dodatkiem żużla wielkopiecowego obserwuje się, gdy wzrasta ilość tlenków $\text{CaO}+\text{MgO}$ i Al_2O_3 kosztem ilości SiO_2 (Locher, 2006). Dron (Dron, 1980) uważa, że zawartość jonów glinowych decyduje o aktywności hydraulicznej żużla. Jak wynika z jego badań struktura szkła żużlowego składa się z pojedynczych lub rozgałęzionych łańcuchów, a w momencie aktywacji żużla do fazy ciekłej jako pierwsze przechodzą właśnie jony glinowe, natomiast tlenek magnezu pełni rolę mocnej zasady. Smolczyk (Smolczyk, 1980) podaje jaki wpływ na wytrzymałość zaprawy z cementu hutniczego ma zawartość tlenku glinu (rys. 3).



Rys. 3. Zmiany wytrzymałości zaprawy z udziałem cementu hutniczego w zależności od zawartości Al₂O₃ w żużlu; cement zawierający 75% żużła o powierzchni właściwej wg Blaine'a równej 3850 cm²/g

Jednak ocena wytrzymałości cementu z dodatkiem żużła na podstawie ilości tlenków zawartych w żużlu wielkopieczowym może być wykorzystana w niewielu przypadkach. Wynika to z faktu, że na wytrzymałość zaprawy na ściskanie wpływa wiele dodatkowych czynników, mianowicie zawartość żużła w cemencie, rodzaj klinkieru zastosowanego jako aktywator reakcji wiązania żużła i powierzchnia właściwa żużła i cementu (Locher, 2006).

Do oceny aktywności hydraulicznej żużła wielkopieczowego stosuje się szereg metod. Jedną z metod stosowanych m.in. w Polsce, Japonii i w Niemczech jest wyznaczenie współczynnika aktywności na podstawie składu chemicznego żużła wielkopieczowego (Peukert, 2000):

$$Z = \frac{CaO + MgO + Al_2O_3}{SiO_2} \quad (1.1)$$

W tabeli 5 przedstawione zostały wymagania dotyczące składu chemicznego mielonego granulowanego żużła wielkopieczowego zawarte z normie PN-EN 15167-1: 2006 (U) ¹. Właściwości żużła podane w tabeli są określone według procedur w normie PN-EN 196-2:2006.

¹ Przewiduje się ustanowienie normy PN-EN 15167: 2007 w 2007 r.

Tabela 5. Właściwości granulowanego żużla wielkopieczowego według PN-EN 15167: 2006 (U)

Właściwości	Zawartość, % masowo
1	2
MgO	≤18,0
Siarczki	≤2,0
Siarczany	≤2,5
Straty prażenia związane z utlenianiem siarczków	≤3,0
Chlorki	≤0,1
Zawartość wilgoci	≤1,0
Współczynnik aktywności hydraulicznej po 7 dniach twardnienia	≥45,0
Współczynnik aktywności hydraulicznej po 28 dniach twardnienia	≥70,0

Kolejnym kryterium oszacowania właściwości hydraulicznych jest wskaźnik aktywności żużla, który oblicza się jako stosunek wytrzymałości na ściskanie kombinacji 50% (masowo) mielonego żużla wielkopieczowego i 50% (masowo) cementu do wytrzymałości na ściskanie cementu użytego do badań. Wskaźnik aktywności żużla oblicza się po 7 i 28 dniach twardnienia (PN-EN 196-1: 2006).

Pal *et al.* podają (Pal *et al.*, 2003), że Keil² wyznaczył wskaźnik hydrauliczny *HI* jako kryterium rozpoznania żużla dobrej jakości. Wskaźnik oblicza się wg następującego wzoru:

$$HI_{70/30} = \frac{(a - c)}{(b - c)} \cdot 100, \quad \% \quad (1.2)$$

gdzie: *a* – wytrzymałość próbki o zawartości 70% żużla i 30% cementu portlandzkiego w danym okresie badania, MPa,

b – wytrzymałość próbki o zawartości 100% cementu portlandzkiego w danym okresie badania, MPa,

c – wytrzymałość próbki o zawartości 70% zmielonego kwarcu i 30% cementu portlandzkiego w danym okresie badania, MPa.

² Keil F., *Slag cements*, Proceedings of the Third International Symposium on the Chemistry of Cements, Cement and Concrete Association, London UK, 1952, s. 530-571

Wskaźnik hydrauliczny, zdaniem zagranicznych badaczy (Pal *et al.*, 2003), lepiej identyfikuje materiał w postaci żuźla wielkopieczowego będącego dodatkiem do cementu, gdyż odnosi się do jego reaktywności, a zastosowanie 70% żuźla w badaniu pozwala na określenie jego jakości jako spoiwa. Autor dowodzi, że wartość wskaźnika hydraulicznego ma ścisły związek z fizycznymi i chemicznymi właściwościami żuźla, takimi jak: zawartość tlenków SiO₂, CaO, MgO, Al₂O₃, zawartość fazy szklistej czy powierzchnia właściwa wg Blaine'a. Zdefiniowany wskaźnik hydrauliczny można bezpośrednio odnieść do wartości wskaźnika aktywności żuźla, który charakteryzuje jego wytrzymałość.

Ze względu na fakt, że na aktywność hydrauliczną żuźli wpływają również własności fizyczne przedstawiono szereg metod oceny żuźli opartych na pomiarach parametrów fizycznych, często w powiązaniu ze składem chemicznym (Peukert, 2000). Ocenę aktywności żuźli przeprowadza się na podstawie:

- współczynników załamania światła, które w przypadku żuźli o wysokiej zawartości związków wapnia są wyższe niż 1.65;
- wielkości ciepła dewitryfikacji, oznaczonego przy pomocy termicznej analizy różnicowej; dla szkieł żuźlowych ciepło to zawiera się w przedziale 40–80 cal/g;
- potencjału hydraulicznego będącego różnicą ciepła rozpuszczania żuźli zeszkłonych i całkowicie wykryształizowanych po czterech godzinach wygrzewania w temperaturze 1000°C; potencjał hydrauliczny dobrego żuźla zawiera się w granicach 70–80 cal/g (Peukert, 2000);
- luminescencji żuźli pod wpływem promieniowania ultrafioletowego (Locher³);
- obserwacji pod mikroskopem optycznym zachowania się rozdrobnionego żuźla w obecności dwuprocentowego roztworu Al₂(SO₄)₃ i mierzenia czasu pojawienia się wzrostu kryształów gipsu. Autor tej metody (F. Kcil) uważa, że hydrauliczność żuźli jest ściśle związana z szybkością tworzenia się kryształów gipsu (Peukert, 2000).

Powierzchnia ziaren niektórych żuźli ma hydrofobowy charakter i nie wykazuje powinowactwa z wodą, które jest określane przez kąt zwilżenia (dla żuźla średnio 50°). Ze względu na tę cechę żuźle są wykorzystywane w drogownictwie do wykonywania warstw drenażowych (Roper, 1980).

Hydratacja granulowanego żuźla wielkopieczowego w wodzie jest procesem bardzo powolnym, który zależy od wielu czynników, ale w głównej mierze od zawartości fazy szklistej. Granulowany żużel wielkopieczowy jest zaliczany do

³ Locher E. W., IV International Symposium, Washington 1960.

materiałów o utajonych właściwościach hydraulicznych. Oznacza to, że sam nie wiąże

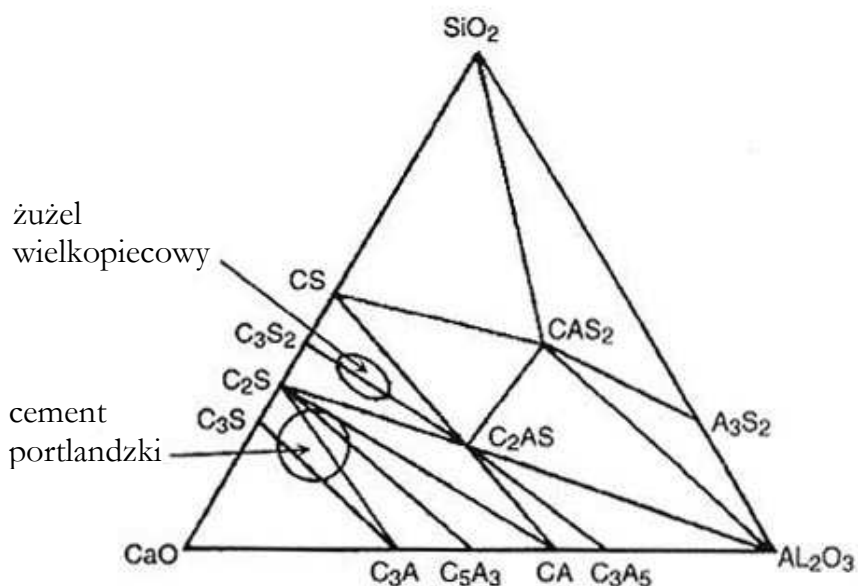
z wodą lub proces ten zachodzi bardzo powoli (Peukert, 2000). Wg Mehty (Mehta, 1989) w wyniku ekspozycji ziaren żużla na działanie wody na ich powierzchni powstaje otoczka form glinokrzemianów, które hamują penetrację wody w głąb ziarna i bez obecności chemicznego aktywatora postęp hydratacji jest zatrzymany. Aby utrzymać proces hydratacji żużel rozdrabnia się i odpowiednio aktywuje, dzięki czemu materiał ten wiąże i twardnieje w wodzie, analogicznie do cementu portlandzkiego. Aktywatorami żużla mogą być związki zasadowe (np. $\text{Ca}(\text{OH})_2$ będący produktem hydratacji cementu portlandzkiego, NaOH , szkło wodne), związki słabo kwaśne (np. CaSO_4) oraz czynniki fizyczne (podwyższona temperatura i ciśnienie) (Cement, *kruszywa...*, 2005).

W wyniku reakcji żużla z wodą i aktywatorem powstają takie same fazy, jak w przypadku procesu twardnienia cementu portlandzkiego, a największy udział ma faza C-S-H. Analogia właściwości wiążących jest związana z podobnym procesem wytwarzania żużla i klinkieru portlandzkiego, tj. na drodze termicznej przeróbki surowców mineralnych (żużel w piecu hutniczym, klinkier w piecu obrotowym) oraz wynika ze zbliżonego składu chemicznego (Cement, *kruszywa...*, 2005).

Tabela 6. Skład chemiczny krajowych żużli wielkopieczowych i klinkieru portlandzkiego (Cement, *kruszywa...*, 2005)

Składnik	Żużel wielkopieczowy		Klinkier portlandzki
	Huta „Katowice”	Huta im T. Sendzimira	
	Zawartość, % wag.		
1	2	3	4
CaO	44,2	42,9	63,4
SiO ₂	38,6	39,7	22,5
Al ₂ O ₃	8,4	8,2	5,5
MgO	6,1	5,9	1,5
SO ₃	2,0	1,9	0,5
Fe ₂ O ₃	1,0	0,8	3,1

Jednakże produkt hydratacji granulowanego żużla wielkopieczowego w postaci fazy C-S-H przybiera formę żelową i różni się pod względem struktury od fazy C-S-H powstałej w wyniku hydratacji cementu portlandzkiego. Wynika to z faktu, że stosunek C/S (ilości CaO do SiO₂) w fazie C-S-H występującej w żużlu wynosi 1.0–1.5, podczas gdy w cemencie wynosi on 1.5–2.0. Oznacza to, że skład żużla jest bliższy stechiometrycznie do krzemianu dwuwapniowego – C₂S, natomiast skład cementu jest bliższy do krzemianu trójwapniowego C₃S (rys. 4).



Rys. 4. Granulowany mielony żużel wielkopieczowy i cement portlandzki w układzie $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ (Pal *et al.*, 2003)

Zawartość reaktywnej fazy szklistej w żużlu wielkopieczowym oraz jego miאלkość mają znaczący wpływ na jego efektywność hydrauliczną i reaktywność jako dodatku do betonu.

Przeprowadzono badania (Babu, Kumar, 2000), w których przy różnym zakresie procentowego udziału żużla wielkopieczowego w spoiwie (10–80%) oszacowano tzw. efektywność hydrauliczną żużla poprzez określenie zmienności wytrzymałości na ściskanie betonu po 28 dniach twardnienia w zależności od stosunku ilości użytej wody do ilości spoiwa (w/s) w betonie z udziałem żużla wielkopieczowego i betonie z udziałem cementu portlandzkiego. Korzystając z pojęcia efektywności hydraulicznej uzyskuje się możliwość programowania wytrzymałości na ściskanie betonu wykonanego na spoiwie żużlowo-cementowym, która osiąga tę samą wartość co wytrzymałość betonu wykonanego z cementu portlandzkiego.

1.3.3. Popiół fluidalny z węgla brunatnego

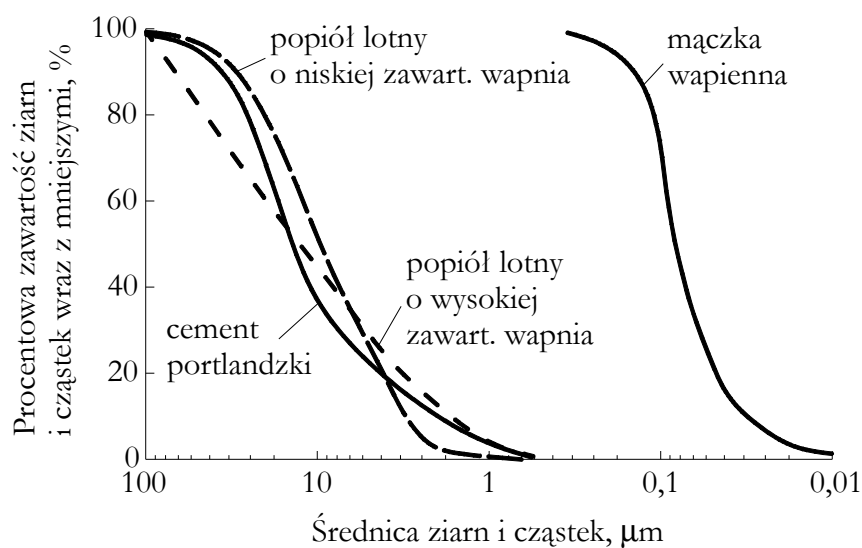
Popiół lotny jest ubocznym produktem spalania powszechnie stosowanym w przemyśle materiałów wiążących, m.in. jako składnik cementów powszechnego użytku, cementów specjalnych oraz jako dodatek do betonów. Zastosowanie popiołu lotnego w produkcji cementu, podobnie jak w przypadku żużla wielkopieczowego, wiąże się z wysokimi kosztami produkcji klinkieru portlandzkiego.

Popiół lotny jest otrzymywany w wyniku elektrostatycznego lub mechanicznego wytrącania w elektrofiltrach cząsteczek pyłu z gazów odlotowych kotłowni opalanych pyłem antracytu, węgla kamiennego lub brunatnego. Popiół lotny ma właściwości pucolanowe (krzemionkowy), natomiast popiół o większej zawartości wapnia wykazuje właściwości pucolanowe i hydrauliczne (PN-EN 197-1).

Popioły lotne powstają w kotłach konwencjonalnych (pyłowych) lub fluidalnych. Zmielony do postaci drobnego pyłu węgiel (może być również z materiałem współspalonym) wdmuchiwany jest do paleniska kotła i spalany w temperaturze 1400°C (w przypadku kotłów konwencjonalnych) lub w temperaturze 800–900°C

i w obecności sorbentu wiążącego tlenki siarki (w przypadku kotłów fluidalnych). W trakcie procesu spalania w kotłach konwencjonalnych częściowemu lub całkowitemu topnieniu ulegają mineralne, nie dające się spalić, części skał zawarte w węglu. Część stopionych cząsteczek mineralnych (40–70% odpadu), o uziarnieniu

1–300 μm , zostaje wyprowadzona strumieniem gazów spalinowych i zatrzymana w filtrze w postaci popiołu lotnego (Brylicki, Łagosz, 1999).



Rys. 5. Porównanie uziarnienia cementu portlandzkiego, popiołu lotnego i mączki wapiennej (Mehta, Monteiro, 2006)

Stosowanie kotłów fluidalnych związane jest z wymogami ochrony środowiska i koniecznością modernizacji instalacji wykorzystywanych w procesie spalania paliw stałych. Popiół lotny ze spalania fluidalnego ma nieco inne właściwości niż popiół ze spalania konwencjonalnego, co wynika z innego przebiegu samego procesu. Spalanie węgla w kotle fluidalnym połączone jest z

odsiarczaniem spalin. Proces odsiarczania spalin polega na spalaniu węgla w obecności sorbentu (wapnia lub dolomitu), który wiąże tlenki siarki i azotu. Intensywność spalania w warstwie pozwala na obniżenie temperatury spalania do 800–900°C, czego konsekwencją jest zmniejszenie się ilości wytwarzanych w procesie spalania tlenków azotu. Powstałe popioły są mieszaniną popiołu z paliwa, produktu odsiarczania (anhydrytu) i zdekarbonatyzowanego sorbentu w postaci aktywnego CaO oraz pewnej ilości wtórnego (nierozłożonego) CaCO₃, która nie zawiera fazy szklistej i ziaren o owalnych kształtach. Gdy odsiarczaniu poddawane są gazy odlotowe, proces ten nie wpływa na jakość popiołów lotnych. W pozostałych przypadkach w urządzeniach odpylających wytrącany jest produkt uboczny – mieszanina popiołu z paliwa, produktów odsiarczania, sorbentu (CaCO₃) oraz tlenku wapnia. Produkt ten z różnych powodów nie może być wprost użyty jako składnik cementów ani jako dodatek do betonów (Gawlicki, Giergiczny, 2004; Ciszewski, 2004).

Podział kotłów fluidalnych ze względu na prędkość przepływającego czynnika w komorze spalania, skład frakcyjny materiału stanowiącego warstwę fluidalną oraz ciśnienia panującego w komorze paleniskowej jest następujący (Ciszewski, 2004):

- kotły fluidalne ze złożem stacjonarnym, w których proces spalania przebiega pod ciśnieniem atmosferycznym – AFBC (*Atmospheric Fluidized Bed Combustion*),
- kotły fluidalne ze złożem stacjonarnym, w których proces spalania przebiega pod podwyższonym ciśnieniem – PFBC (*Pressurized Fluidized Bed Combustion*),
- kotły fluidalne ze złożem cyrkulacyjnym – CFBC (*Circulating Fluidized Bed Combustion*),
- kotły fluidalne z ciśnieniowym złożem cyrkulacyjnym – PCFB (*Pressurized Circulating Fluidized Bed Combustion*).

Właściwości lotnych popiołów fluidalnych zależą głównie od następujących czynników (Brylicki, Lysek, 1996):

- rodzaj spalanego paliwa (węgiel kamienny, brunatny, łupki bitumiczne, produkty wzbogacania węgla, odpady komunalne),
- rodzaj i właściwości sorbentu oraz stosunek Ca/S w procesie,
- sposób prowadzenia spalania w kotle i jego konstrukcja (np. wielkość instalacji i strumienia gazów spalinowych, czas przebywania sorbentu w strefie odsiarczania, temperatura spalania),
- stopień utlenienia produktów odsiarczania gazów.

Produkty ze spalania fluidalnego, w porównaniu do popiołów i żużli z palenisk konwencjonalnych, wyróżniają się następującymi cechami (Jarema-Suchorowska, 2002):

- podwyższona zawartość związków wapnia (CaO),
- podwyższona zawartość związków siarki w postaci siarczanów (od kilku do kilkunastu %), czasami występują również niewielkie ilości siarczynów,
- podwyższona zawartość strat prażenia (od kilku do prawie 30%) wywołana obecnością węgla i nadmiarem sorbentu,
- niższe stężenie naturalnych pierwiastków promieniotwórczych,
- odmienna budowa krystalograficzna – brak spieków i fazy szklistej,
- niższa gęstość nasypowa i rozbudowana powierzchnia właściwa popiołu lotnego.

Dotychczasowe doświadczenia w zastosowaniu popiołów lotnych ze spalania fluidalnego jako dodatku do cementu i betonu wskazują na niepożądaną jego cechę jaką jest zwiększenie wodożądności oraz szybka utrata urabialności mieszanki betonowej.

Popioły lotne charakteryzujące się dużą zawartością związków wapnia, można usystematyzować ze względu na technologię ich powstawania w następujący sposób (Giergiczny, 2005):

- popioły lotne wapniowe z palenisk konwencjonalnych,
- popioły lotne z produktami z suchego odsiarczania spalin:
 - z palenisk konwencjonalnych,
 - z palenisk fluidalnych.

Metody suchego odsiarczania spalin oparte są głównie na adsorpcji tlenu siarki (SO₂) na sorbentach stałych. W tym przypadku popiół zawiera produkty odsiarczania w stanie stałym oraz pozostałości nie w pełni przereagowanego sorbentu (Giergiczny, 2005).

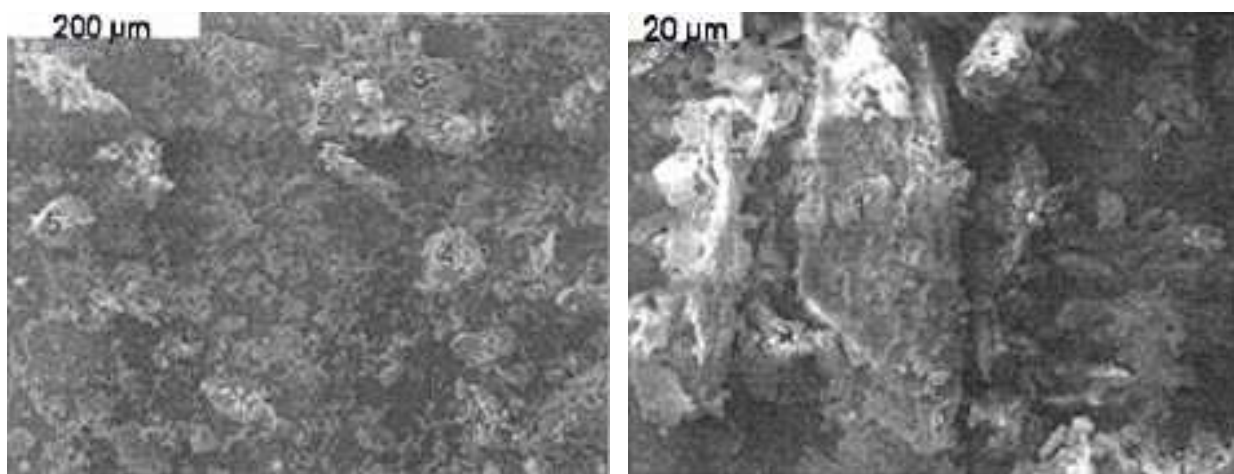
Popiół lotny z dużą zawartością związków wapnia charakteryzują również podstawowe wskaźniki aktywności hydraulicznej:

- moduł zasadowości ($M_z = \text{CaO}/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3)$),
- wytrzymałość na ścislenie zaprawy popiołowej po 28 dniach twardnienia wyższa od 1MPa.

Wapniowe popioły lotne z kotłów fluidalnych zawierają następujące składniki mineralne: anhydryt jako produkt odsiarczania, gehlenit, anortyt, hematyt, kwarc, kalcyt, glinian trójwapniowy, siarczanoglinian czterowapniowy oraz nie związany tlenek wapniowy. Natomiast nie występują w nich mullit, ani charakterystyczne dla popiołów konwencjonalnych, zeszkłone formy kuliste. Zawartość anhydrytu, nieprzereagowanego sorbentu w postaci kalcytu, wolnego

CaO i produktu jego hydratacji $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a także peryklazu ma duży wpływ na aktywność pucolanową popiołu fluidalnego. Wymienione składniki odgrywają aktywną rolę w procesach wiązania i twardnienia tworzyw mineralnych, na przykład natychmiast po dodaniu wody do popiołu anhydryt wraz z glinianem trójwapniowym i innymi rozpuszczalnymi krzemianami bierze udział w tworzeniu się ettringitu, a wodorotlenek wapnia wiąże reaktywne krzemiany i glin tworząc fazę C-S-H i C-S-A-H. Przydatność popiołów fluidalnych jest w dużej mierze uzależniona również od zawartości niespalonego węgla, która w popiołach krajowych zwykle nie przekracza 2–3%. Większa niż 5% zawartość tego składnika przekreśla możliwość wykorzystania popiołu fluidalnego w spoiwach budowlanych (Brylicki, Lysek, 1996; Gawlicki, Roszczynialski, 2003; Giergiczny, 2006; Ramachandran, 1995).

Cząstki popiołu fluidalnego z węgla brunatnego charakteryzują się drobnym, nieregularnym uziarnieniem oraz rozbudowaną powierzchnią właściwą, która określana metodą Blaine'a wynosi zwykle od 2500 do 6000 cm^2/g (fot. 2) (Gawlicki, Giergiczny, 2005; Neville, 2000).



Fot. 2. Przeciętna mikrostruktura popiołu fluidalnego (Król *et al.*, 2005)

1.3.4 Produkty hydratacji wykorzystanych spoiw

Analiza procesu hydratacji spoiw mineralnych najczęściej jest odnoszona do przebiegu i produktów tego procesu w zaczynie z cementu portlandzkiego. Typowe fazy powstające w takim zaczynie usystematyzowano w tabeli 7.

Tabela 7. Typowe fazy w zaczynie cementowym

Nazwa mineralogiczna	Skład fazowy	Pokrój	Dane literaturowe
1	2	3	4
Uwodnione krzemiany wapnia	C-S-H	typ I -włókna wyrastające promieniście z ziaren, igły zwężone na końcu, listewki, rurki; dł. 0,5-2 μm , średnica ok. 2 μm ; typ II -sieć włókien lub płytek o strukturze trójwymiarowej tworzącej „plaster pszczeli”; typ III -nieregularne, izometryczne lub spłaszczone cząstki w zwartych skupieniach, wielkość poniżej 0,3 μm ; typ IV -ściśle upakowane skupienia ziaren powstałe na miejscu wyjściowych ziaren cementu, wielkość ułamka mm;	Nocuń-Wczelik, 2003
Ettringit - uwodniony siarczanoglinian wapnia	$\text{C}_3\text{A } 3\text{C}\bar{\text{S}}$ 30-33H	wydłużone igły lub słupki o stałej średnicy na długości i dobrze wykształconej formie zewnętrznej;	Jarmontowicz, 1990
Monosiarczanoglinian	$\text{C}_3\text{A } \text{C}\bar{\text{S}}$ 12H	cienkie, heksagonalne płytki tworzące zespoły z charakterystycznymi łączeniami typu płaszczyzna-krawędź;	Nocuń-Wczelik, 2003
Wodorotlenek wapnia	CH	płytki heksagonalne o różnej grubości, słupy heksagonalne, płytki o nieokreślonym kształcie, masywne, uwarstwione struktury, otoczki porów, kruszywa lub zbrojenia	Nocuń-Wczelik, 2003
Węglany wapnia w formie kalcytu	$\text{C}\bar{\text{C}}$	izometryczne tabliczkowe, słupkowe lub igielkowe kryształy, mogą występować formy heksagonalne lub nacięki	Liber-Madziarz, Teisseyre, 2000

Uwaga: w chemii cementu stosowane są następujące oznaczenia: C=CaO, A=Al₂O₃, S=SiO₂, F=Fe₂O₃, $\bar{\text{S}}$ =SO₃, H=H₂O, N=Na₂O, K=K₂O, $\bar{\text{C}}$ =CO₂.

Stopień hydratacji szkła żużlowego zależy od trzech czynników: budowy szkła, stopnia zmielenia żużla oraz aktywatora zastosowanego do pobudzenia reakcji hydratacji. Największy stopień hydratacji żużla w środowisku alkalicznym

wykazują żuźle zasadowe o zawartości fazy szklistej powyżej 90%. Przeciętny stopień hydratacji żuźla po 28 dniach twardnienia nie przekracza 50%, co ma niebagatelne znaczenie dla właściwości betonów w późniejszym okresie czasu. Powstała w procesie hydratacji faza C-S-H decyduje o strukturze porów stwardniałego zaczynu z żuźla aktywowanego alkaliami, w którym ponad 70% całej porowatości to pory żelowe. W miarę upływu czasu i postępu hydratacji żuźla porowatość maleje i średni promień porów zmniejsza się, dzięki czemu zaczyn jest bardziej zwarty i mniej podatny na korozyjne działanie środowiska (Małolepszy, 2003).

Procesy hydratacji spoiwa żuźlowego polegają na rozpuszczaniu szkła glinokrzemianowego stanowiącego główny składnik granulowanego żuźla wielkopieczowego w wodzie zarobowej o wysokim pH 12–14. Proces rozpuszczania może być ułatwiony poprzez dodatek alkalicznego aktywatora. Podczas twardnienia zaczynów żel fazy C-S-H typ I ulega stopniowej krystalizacji, czemu towarzyszy wydzielanie jonów sodowych do roztworu, dzięki czemu możliwa jest dalsza aktywacja szkła i postęp hydratacji. Według niektórych autorów w stwardniałych zaczynach żuźlowo-alkalicznych głównym produktem hydratacji jest słabo skryształizowana lub żelowa faza C-S-H typ I, kalcyt, uwodnione glinokrzemiany wapniowe – hydrogranaty, uwodniony karboglinian wapniowy oraz zeolity sodowe i sodowo-wapniowe, takie jak natrolit i thomsonit (Stryczek *et al.*, 2005).

Podstawowym produktem hydratacji stwardniałego zaczynu z żuźla aktywowanego alkaliami jest faza C-S-H o zmiennym stosunku C/S (1,0–2,0).

W stwardniałym zaczynie żuźla aktywowanego alkaliami wyróżnia się głównie fazę C-S-H typ III i IV, a w niewielkiej ilości występuje również C-S-H typ II. Wymienione formy C-S-H stanowią ok. 80% wszystkich produktów hydratacji. W mniejszej ilości występują inne formy, np. hydrogehlenit. Największe ilości fazy C-S-H powstają w pobliżu ziaren żuźla, ze względu na największe stężenie krzemu w fazie ciekłej. Natomiast w porach zaczynu faza C-S-H tworzy lepiej skryształizowane formy, które zmniejszają jego porowatość (Kurdowski, 1990; Małolepszy, 2003). Badania mikrostruktury stwardniałego zaczynu z cementu żuźlowego wykazują występowanie różnych form fazy C-S-H, która jest bardziej zwarta, słabiej skryształizowana i bogatsza w MgO i Al₂O₃ w porównaniu do fazy C-S-H stwardniałego zaczynu z cementu portlandzkiego, a kryształy ettringitu przyjmują postać igiełek, które są krótsze i cieńsze niż te występujące w zaczynie z cementu portlandzkiego (Regourd *et al.*, 1980). Czynnikiem determinującym powstanie bardziej zwartej tekstury jest wzrost stosunku C/S w fazie C-S-H w wyniku adsorpcji jonów Ca²⁺, co powoduje zwiększenie adhezji między ziarnami żuźla. Proces ten można zintensyfikować poprzez zmielenie żuźla do większej

powierzchni właściwej oraz pielęgnację w podwyższonej temperaturze (Sersale *et al.*, 1980).

Dodatki w postaci żużli czy popiołów lotnych w istotny sposób modyfikują mikrostrukturę zaczynów, która jest bardziej zwarta, co wynika ze zwiększonej zawartości fazy C-S-H, będącej produktem reakcji żużla i wodorotlenku wapniowego. Oprócz fazy C-S-H typ III w późniejszych stadiach hydratacji pojawia się faza, która jest produktem wewnętrznym pochodzącym od dodatku. Lokalnie stwierdza się występowanie fazy C-S-H typ II, która charakteryzuje się luźniejszą strukturą. Występuje również hydrogehlenit C_2AS i bardzo drobny ettringit pochodzący od glinu zawartego w żużlu. Na powierzchni ziaren popiołu osadza się warstwa podwójna złożona z $Ca(OH)_2$ i C-S-H formując otoczkę, która z czasem ulega pogrubieniu. Wewnątrz niej zachodzi rozpuszczanie substancji szklistej popiołu – pojawiają się zarodki kryształów mullitu i kwarcu występujących w tej fazie. Ziarna popiołu z otoczkami są włączane w czasie procesu hydratacji w szkielet zaczynu. Niektórzy autorzy zwracają uwagę na możliwość uprzywilejowanego tworzenia się ettringitu w pobliżu ziaren popiołu (Nocuń-Wczelik, 2003).

3. Dziedzina, plan i program eksperymentu

W celu ustalenia programu badań w rozprawie doktorskiej wykorzystano metodę statystycznego planowania eksperymentu, która pozwala na ustalenie ograniczonej liczby układów planu doświadczenia w taki sposób, aby możliwe było otrzymanie adekwatnej funkcji obiektu badań. Przyjęto funkcję regresji w postaci wielomianu aproksymującego drugiego stopnia kilku zmiennych x_i :

$$x = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k b_{ij} x_i x_j ; \quad (x_1, x_2, \dots, x_k) \in U \quad (3.1)$$

gdzie: U – dziedzina eksperymentu.

W celu oszacowania współczynników funkcji regresji wykorzystano w pracy plan statycznie zdeterminowany poliselekcyjny Hartleya na hipersześcianie, w którym liczba wartości wielkości wejściowych wynosi $n_{max} = 3$ (Polański, 1984).

Przed przystąpieniem do właściwego programu badań wykonano badania wstępne mające na celu określenie zakresu dozowania poszczególnych składników zawiesiny twardniejącej (bentonitu, żużla wielkopieczowego i popiołu fluidalnego), co umożliwiło skomponowanie materiału o odpowiednich parametrach technologicznych, tj.: lepkości umownej nie większej niż 60 s oraz odstoju dobowym wody nie przekraczającym 10%.

W tabeli 8 przedstawiono dziedzinę eksperymentu, a w tabeli 9 plan eksperymentu i program badań zastosowane w części doświadczalnej pracy.

Tabela 8. Dziedzina eksperymentu. Dozowanie na 1000 dm³ wody

Czynnik	Oznaczenie	Wartość środkowa zakresu zmienności	Jednostkowy zakres zmienności
1	2	3	4
Bentonit	x_1	50	10
Żużel	x_2	335	140
Popiół	x_3	95	80

Tabela 9. Plan eksperymentu i program badań

Nr receptury	Postać zakodowana planu eksperymentu			Dozowanie stałych składników (kg/1000 dm ³ wody)		
	x_1	x_2	x_3	Bentonit	Żużel	Popiół
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>
1	-1	-1	+1	40	195	175
2	+1	-1	-1	60	195	15
3	-1	+1	-1	40	475	15
4	+1	+1	+1	60	475	175
5	-1	0	0	40	335	95
6	+1	0	0	60	335	95
7	0	-1	0	50	195	95
8	0	+1	0	50	475	95
9	0	0	-1	50	335	15
10	0	0	+1	50	335	175
11	0	0	0	50	335	95

Zawiesinę twardniejącą wykonano w warunkach laboratoryjnych z następujących składników:

- wody wodociągowej o temperaturze $18\pm 1^\circ\text{C}$,
- bentonitu sodowego DYWONIT S (AT-15-5508/2002-ITB),
- mielonego granulowanego żużla wielkopiecowego z Huty „Katowice”,
- lotnego popiołu fluidalnego z węgla brunatnego z Elektrowni Turów.

Poszczególne składniki zawiesiny ważono na wadze laboratoryjnej z dokładnością do 2 g. Zawiesinę wykonywano ze stałą kolejnością dozowania składników i następującymi czasami mieszania:

- woda zarobowa + bentonit – 3 min,
- j.w. + żużel wielkopiecowy – 1.5 min,
- j.w. + popiół fluidalny – 1.5 min.

Właściwości materiałów wykorzystanych do sporządzenia zawiesiny twardniejącej przedstawiono w tabelach: bentonit – tabela 10, żużel wielkopiecowy – tabela 11, popiół fluidalny z węgla brunatnego – tabela 12.

Tabela 10. Właściwości techniczne bentonitu o nazwie handlowej DYWONIT S

Material	Właściwości					
	Gęstość wł., g/cm ³	Gęst. obj.*, g/cm ³	Wilg.*, %	Wskaźnik pęcznienia (2g/100ml/ 24h), cm ³	Zawartość ziaren >0,063 mm przesiewanie na sucho, %	Zawartość ziaren >0,040 mm przesiewanie na mokro, %
1	2	3	4	5	6	7
DYWONIT S	2,81±0,05	0,85±0,1	≤12	≥25	≤38	≤5

* parametry określone w stanie powietrzno-suchym

Tabela 11. Skład chemiczny mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego z Huty „Katowice”

Właściwości fizyczne					Skład chemiczny						
Pow. właściwa wg Blaine’a, cm ² /g	Wytrzymałość na ściskanie, MPa		Wytrzymałość na rozciąganie, MPa		Zawartość tlenków, % mas.						
	po 7 dniach	po 28 dniach	po 7 dniach	po 28 dniach	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Cl
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
4050	11,8	29,7	3,6	6,6	34,60	7,20	1,82	46,92	6,12	0,81	0,046

Żużel wielkopieczowy z Huty „Katowice” spełnia wymagania normy PN-EN 197-1 pod względem zawartości tlenków wapnia, magnezu i dwutlenku krzemu, których suma powinna przekraczać 2/3 masy oraz stosunek sumy tlenku wapnia i magnezu do dwutlenku krzemu powinien być wyższy od 1.0. W przypadku żużla z Huty „Katowice” suma tlenków wynosi 87.6%, stosunek tlenków wynosi 1.53, a zawartość fazy szklistej wynosi ponad 95%.

Tabela 12. Skład chemiczny lotnego popiołu fluidalnego z węgla brunatnego z Elektrowni Turów (Kledyński *et al.*, 2004)

Zawartość tlenków, w % mas.											
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Mn ₃ O ₄	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	Straty prażenia
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
36,21	5,13	26,74	0,05	1,41	16,24	1,44	6,38	0,14	0,59	2,06	1,98

Popioły lotne ze spalania fluidalnego węgla brunatnego w Elektrowni Turów S.A. charakteryzują się bardzo dobrą stabilnością podstawowych parametrów chemicznych i gwarantują powtarzalność właściwości kompozytów wykonanych z ich udziałem (Kabała, Listkiewicz, 2004).

Pokazany plan eksperymentu zrealizowano w trzech wariantach, różniących się zakresem wykorzystania procesu mechanicznej aktywacji spoiwa, którym nadano następujące oznaczenia:

- NA – zawiesina z popiołem fluidalnym nieaktywowanym mechanicznie,
- PA – zawiesina z popiołem fluidalnym aktywowanym mechanicznie,
- PZA – spoiwo żużlowo-popiołowe (uprzednio wymieszane) aktywowane mechanicznie.

Mechaniczna aktywacja popiołu jest procesem fizycznym, nie wymagającym stosowania odczynników chemicznych, przeprowadzanym w specjalnie skonstruowanym aktywatorze (Patent RP nr 180380). Polega na dostarczeniu do rozdrobnionego materiału odpowiedniej ilości energii mechanicznej tak, aby nie nastąpiło dalsze zmniejszenie rozmiarów ziaren, lecz zmiana ich wewnętrznej energii, struktury porów oraz powstanie aktywnych centrów na odświeżonej wskutek tarcia i zderzeń powierzchni ziaren. Aktywacja mechaniczna opatentowaną metodą służy m.in. do poprawy właściwości użytkowych popiołów fluidalnych oraz sorbentów stosowanych do odsiarczania spalin kotłowych (Nowak *et al.*, 2000).

Aktywacja mechaniczna popiołu fluidalnego z węgla brunatnego ma na celu poprawienie jego właściwości użytkowych, a co za tym idzie również charakterystyk wytrzymałościowych i przeciwfiltracyjnych zawiesin twardniejących wykonanych z jego użyciem. Aktywacja mechaniczna spoiwa żużlowo-popiołowego (uprzednio wymieszanego) miała na celu sprawdzenie właściwości zawiesiny twardniejącej wykonanej z gotowej mieszanki aktywowanej mechanicznie. Stworzyłoby to możliwość skomponowania gotowego spoiwa, które byłoby dostarczane na budowę i bezpośrednio mieszane z wodą, co znacznie usprawniłoby pracę, ograniczyło czas wykonania zawiesiny i możliwość popełnienia błędu przy dozowaniu składników.

4. Badania zawiesiny płynnej

Zawiesina twardniejąca w stanie płynnym powinna spełniać określone wymagania w zależności od przyjętej technologii wykonywania robót. Dotychczas nie sformułowano wytycznych, które określałyby właściwości zawiesiny twardniejącej, odpowiednich dla różnych technologii wykonania przesłon przeciwfiltracyjnych czy wykopów wąskoprzestrzennych. Zasadniczo, zawiesina powinna charakteryzować się łatwością pompowania w miejsce wbudowania i zdolnością do przemieszczania się w wykopie podczas głębiania, zapewniać stateczność ścian wykopu lub otworu głębianego pod jej osłoną, cechować się stabilnością, czyli odpornością na zmiany gęstości słupa zawiesiny oraz wiązać w wymaganym czasie. Duże znaczenie ma także ekonomiczność wykonania konstrukcji z zawiesiny twardniejącej co oznacza, że powinna być ona niepodatna na sedymentację cząstek stałych i wydzielanie wody.

Charakterystyka materiałów, z których wykonano zawiesinę twardniejącą, poszczególne receptury zawiesiny oraz stany aktywacji zostały opisane w rozdziale 3.

4.1. Gęstość objętościowa

Zawiesina twardniejąca wykorzystywana w technologii przesłon przeciwfiltracyjnych powinna zapewniać stateczność ścian wykopów wąskoprzestrzennych. Oznacza to, że parcie hydrostatyczne zawiesiny powinno być wyższe niż parcie czynne ośrodka gruntowego i parcie hydrostatyczne wody gruntowej, działające na ściany wykopu w czasie głębiania. Spełnienie tego warunku możliwe jest wtedy, gdy zawiesina wykazuje dostatecznie wysoką gęstość objętościową ρ w stanie płynnym (Piaskowski, 1980).

Pomiar gęstości wykonano przy użyciu wagi ramiennej Baroida. Czyste i zwilżone wodą naczynie napelniano świeżą mieszanką zawiesiny twardniejącej, a następnie przykrywano nakrywką z otworem przelewowym. Nakrywkę dociskano aż do pełnego osadzenia, a nadmiar płuczki, który wypłynął przez otworek, usuwano dokładnie z nakrywki i ścianek naczynia. Następnie ramię wagi umieszczano w łożysku podstawy i równoważono zawartość naczynia przesuwając ciężarek wzdłuż ramienia do punktu, w którym osiągnęło ono położenie poziome według wskazań poziomnicy. Gęstość objętościowa ρ badanej zawiesiny to wartość na podziałce ramienia wskazana przez krawędź ciężarka.

W tabeli 4.1. w Załączniku 1 przedstawiono wartości gęstości objętościowej próbek świeżej zawiesiny twardniejącej przygotowanych na podstawie wybranego planu eksperymentu, w trzech stanach aktywacji mechanicznej spoiwa. Na rys. 4.1 w Załączniku 1 pokazano wpływ dozowania popiołu fluidalnego i żużla wielkopiecowego na zmianę gęstości objętościowej zawiesiny płynnej. Na rys. 4.2 przedstawiono porównanie wartości gęstości objętościowej zawiesiny wykonanej w trzech formach mechanicznego przetworzenia.

Niepewność pomiaru gęstości objętościowej zawiesiny płynnej wynosi $\Delta\rho = \pm 0.01 \text{ g/cm}^3$.

4.2. Odstój dobowy wody

Kolejnym ważnym parametrem zawiesiny twardniejącej, zarówno ze względów technologicznych, jak i ekonomicznych, jest odstój dobowy wody. Zbyt mała koncentracja bentonitu w zawiesinie powoduje nadmierne wydzielanie wody, co może skutkować niejednakową gęstością słupa zawiesiny w wykopie i zagrażać jego stateczności (Rafalski, 1995).

Odstój dobowy wody O_d jest to procentowy udział objętości wody, jaka wydzielila się samoistnie z zawiesiny pozostawionej w cylindrze pomiarowym o objętości 1 dm^3 na okres jednej doby. W celu dokonania pomiaru odstoju dobowego wody należy wypełnić cylinder pomiarowy zawiesiną i pozostawić go w bezruchu na 24 godziny. Dopuszczalna maksymalna wartość odstoju dobowego zawiesiny twardniejącej, poniżej której zawiesiny są stabilne i praktycznie użyteczne, wynosi ok. 10%.

Niepewność pomiaru odstoju dobowego wody wynosi $\Delta O_d = \pm 1.0\%$.

W tabeli 4.2 w Załączniku 1 przedstawiono wyniki pomiarów odstoju dobowego wody z zawiesiny wykonanej w trzech stanach aktywacji mechanicznej spoiwa. Na rys. 4.3 w Załączniku 1 przedstawiono odstój dobowy wody jedenastu receptur zawiesiny w trzech formach aktywacji mechanicznej.

4.3. Przesącz filtracyjny

Cząstki bentonitu, spoiwa i innych dodatków stałych obecnych w zawiesinie twardniejącej, tworzą warstwę na ściankach gruntu w drażonym wykopie, która przeciwdziała przenikaniu zawiesiny głębiej w grunt. Jednak w przypadku, gdy warstwa ta jest cienka, a porowatość gruntu duża oraz w wyniku działania ciśnienia w głębszych warstwach przesłony w momencie jej wykonywania może nastąpić odfiltrowanie wody z zawiesiny (Rafalski, 1995). Oznaczanie filtracji przy wykorzy-

staniu metody przesączu filtracyjnego pozwala ocenić odporność na oddawanie wody przez zawiesinę w stanie płynnym. Metoda polega na pomiarze objętości przesączu jaki uzyskuje się z zawiesiny płynnej przy użyciu prasy filtracyjnej (rys. 6, fot. 3). Prasa filtracyjna wykonana została ze stali kwasoodpornej i jest przystosowana do wysokich ciśnień. Składa się z cylindra o średnicy wewnętrznej 76.2 mm i wysokości 63.5 mm. Podstawa, do której przykręcany jest cylinder, zaopatrzona jest w otwory umożliwiające odpłynięcie wody wyciskanej z zawiesiny w wyniku działania ciśnienia oraz uszczelkę, która uniemożliwia ucieczkę wody między cylindrem a podstawą. Podczas wykonywania badania na dnie naczynia umieszcza się sitko o liczbie 600–1000 oczek na 1 cm². Przekrój strumienia filtracji brutto wynosi 45.6 cm². Na sicie umieszcza się bibułę filtracyjną, aby zapobiec przesączaniu się zawiesiny przez sito. Prasa filtracyjna umieszczona jest na czterech szpilkach. Przesącz jest odprowadzany z prasy rurką odpływową do cylindra pomiarowego. Cylinder jest od góry zamknięty pokrywą z zaworem, do którego przymocowany jest przewód ciśnieniowy (do 1.0 MPa) o średnicy wewnętrznej 8 mm i grubości ścianki 2 mm. Przewód podłączony jest do agregatu sprężarkowego ELPA typ WEN-CE o maksymalnym ciśnieniu obliczeniowym 0.8 MPa. Zakres ciśnienia wywieranego na zawiesinę znajdującą się w prasie wynosi 0.1–0.5 MPa.

Wykonanie oznaczenia polega na napełnieniu cylindra, szczelnie zamocowanego do podstawy, zawiesiną do wysokości 43.5 mm. Pod rurką dopływową umieszcza się suche naczynie pomiarowe do odbioru przesączu. Na cylinder nakłada się pokrywę i wywiera na zawiesinę ciśnienie 0.1 MPa przez 10 minut. Po upływie tego czasu odłącza się prasę od sprężarki i określa się ilość przesączu z dokładnością do 1.0 ml oraz grubość i wagę plastra jaki powstał w wyniku działania ciśnienia na zawiesinę z podaniem jego krótkiej charakterystyki opisowej (np. twardy, miękki, zwięzły, itp.). Jeśli przed upływem 10 minut nastąpi całkowite wyciśnięcie wody z zawiesiny, pod uwagę bierze się czas pomierzony od momentu rozpoczęcia badania do zatrzymania wypływu. Następnie badanie powtarza się zwiększając działające na zawiesinę ciśnienie o 0.1 MPa.

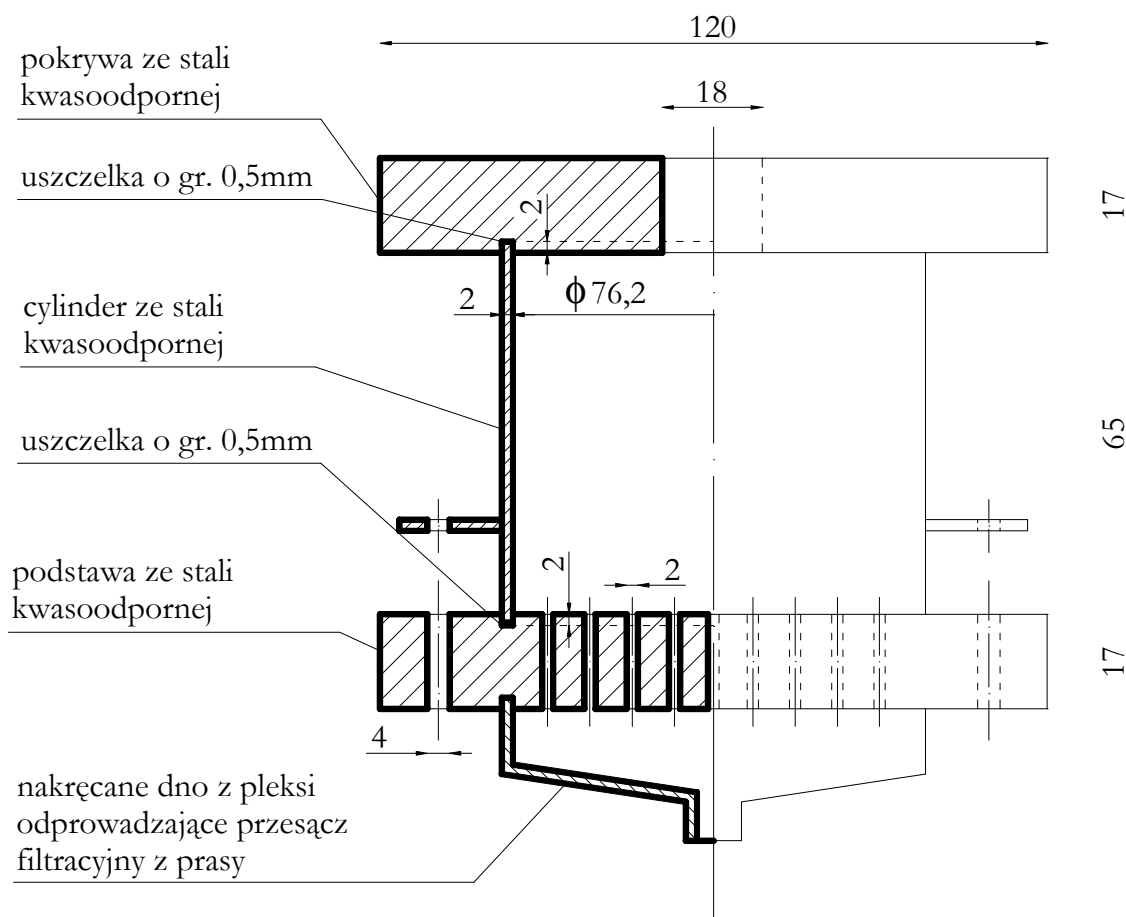
Niepewność pomiaru ilości przesączu filtracyjnego wynosi $\Delta v = \pm 1.0$ ml.

Ubytek zawiesiny (w %) w wyniku działania ciśnienia wyznacza się na podstawie pomiaru objętości zawiesiny płynnej w cylindrze przed wykonaniem badania oraz pomiaru objętości plastra zawiesiny powstałego w wyniku działania ciśnienia.

W szacowaniu niepewności wykorzystano materiały Polskiego Centrum Badań i Certyfikacji, *Akredytacja laboratoriów badawczych – systemy zapewniania jakości w laboratoriach badawczych wg EN 45001*, Materiały szkoleniowe British Standards Institution, 1995.

Niepewność względna $\frac{\Delta V}{V}$ pomiaru objętości zawiesiny płynnej w cylindrze wynosi maksymalnie 0.5%.

Niepewność względna $\frac{\Delta V_{pl}}{V}$ pomiaru objętości plastra zawiesiny otrzymanego w prasie filtracyjnej w wyniku działania ciśnienia wynosi maksymalnie 1.0%.



Rys. 6. Prasa filtracyjna



Fot. 3. Prasa filtracyjna do badania ilości przesączu

W tabelach 4.3, 4.4, 4.5 w Załączniku 1 podano wyniki otrzymane z oznaczania filtracji zawiesiny (w trzech stanach aktywacji składników spoiwa).

Na rys. 4.4, 4.5, 4.6 w Załączniku 1 przedstawiono ubytek masy zawiesiny w %, w trzech stanach aktywacji mechanicznej, w funkcji ciśnienia.

4.4. Lepkość umowna

Lepkość umowna zawiesiny twardniejącej jest ważnym parametrem ze względu na technologię doprowadzenia zawiesiny w miejsce wbudowania i jej zdolność do przemieszczania się w wykopie podczas jego pogłębiania. Lepkość umowna, ze względów technologicznych, powinna zawierać się w granicach 30–60 s.

Badanie lepkości umownej L zawiesiny płynnej wykonano za pomocą lejka połowego Marsha (rodzaj wiskozymetru wypływowego). W celu wykonania pomiaru należy przymknąć wylot lejka palcem i napełnić go świeżo wymieszaną zawiesiną do poziomu siatki (obj. ok. 1.5 dm^3). Następnie lejek należy umieścić nad cechowanym cylindrem o pojemności 1000 cm^3 i otworzyć wylot lejka. Miarą lepkości umownej L jest czas wypływu 1 dm^3 zawiesiny płynnej do cylindra. Wynik podany jest w sekundach.

Niepewność pomiaru lepkości umownej zawiesiny płynnej wynosi $\Delta t = \pm 0.5 \text{ s}$.

W tabeli 4.6 w Załączniku 1 podano lepkości umowne zawiesin płynnych w trzech formach aktywacji mechanicznej składników spoiwa. Na rys. 4.7 w Załączniku 1 pokazano uzyskane wartości lepkości umownej płynnej zawiesiny.

4.5. Wytrzymałość strukturalna

Wytrzymałość strukturalna jest jedną z kilku cech, jakie musi spełniać zawiesina płynna wykorzystywana przy wykonywaniu wykopów wąskoprzestrzennych. Parametr ten określa się jako minimalną wartość naprężeń stycznych, wymaganych do upłynnienia żelu tiksotropowego w określonych warunkach pomiaru. Dostatecznie wysoka wytrzymałość strukturalna zawiesiny tiksotropowej zabezpiecza przed osypywaniem się ziaren gruntu ze ścian wykopu oraz zapewnia wymaganą stabilność zawiesin zanieczyszczonych gruntem urabianym z wykopu. Wartość wytrzymałości strukturalnej zależy od uziarnienia gruntu, w którym wykonywany jest wykop oraz metody jego głębienia i musi być dobierana doświadczalnie (Piaskowski, 1971).

Oznaczenie wytrzymałości strukturalnej zawiesiny płynnej wykonano za pomocą szirometru, który składa się z naczynia cylindrycznego z przymocowaną do dna listwą pionową z podziałką i dwu tulejek duraluminiowych o długości 38.9 mm, średnicy wewnętrznej 35.6 mm i masie 5 g. Czyste naczynie napełnia się świeżo wymieszaną zawiesiną. Po upływie 1 minuty na listwę z podziałką nakłada się tulejkę tak, aby dolna krawędź sięgała poziomu płuczki. Następnie należy tulejkę puścić i jednocześnie włączyć stoper. Jeśli tulejka opada dłużej niż 1 minutę za miarę wytrzymałości strukturalnej zawiesiny przyjmuje się odczyt z podziałki szirometru. Natomiast jeśli tulejka opada krócej niż 1 minutę miarą wytrzymałości strukturalnej jest czas opadania w sekundach. Po przeprowadzeniu pomiaru należy wyjąć tulejkę i pozostawić zawiesinę w bezruchu na 10 minut. Po upływie tego czasu należy powtórzyć pomiar jak poprzednio.

Niepewność pomiaru wytrzymałości strukturalnej zawiesiny płynnej wynosi $\Delta t_w = \pm 0.5$ s.

W tabelach 4.7, 4.8, i 4.9 przedstawiono wyniki uzyskane podczas badania wytrzymałości strukturalnej zawiesiny płynnej w trzech formach aktywacji mechanicznej. Na rys. 4.8–4.13 w Załączniku 1 przedstawiono wytrzymałość strukturalną zawiesin w trzech formach aktywacji mechanicznej spoiwa.

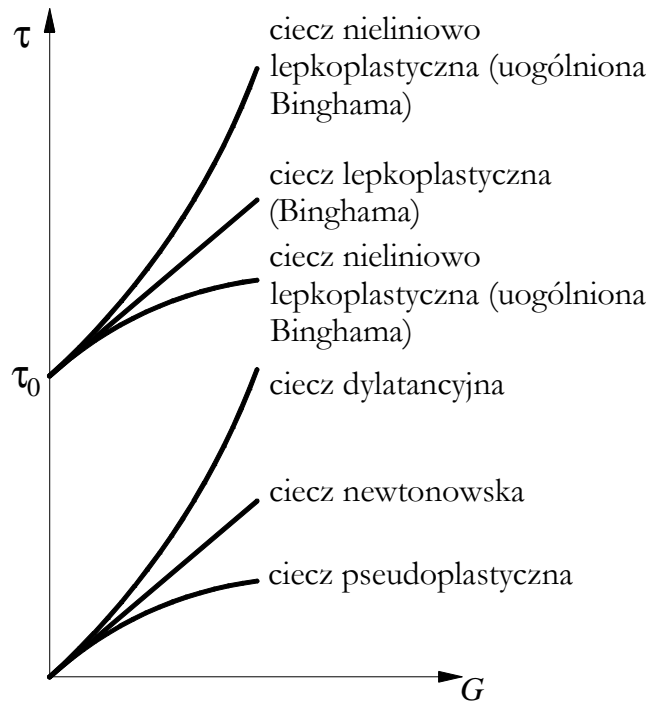
4.6. Krzywe płynięcia

Część studialna

Pod wpływem działania obciążeń na materiał (ciało stałe lub ciecz) w czasie powstają i rozwijają się odkształcenia, które zależą od wielkości obciążeń jak również od ich prędkości, czasu trwania i historii. Badaniem i opisem zmiennych relacji między naprężeniem i odkształceniem materiałów pod działaniem obciążeń oraz z uwzględnieniem upływu czasu zajmuje się nauka zwana reologią (Szwabowski, 1999). W szczególności reologia zawieszin zajmuje się zmienną lepkością materiałów, odrywaniem i mieszaniem się cząstek substancji poddawanych naprężeniom, układaniu się substancji względem podłoża lub naczynia, prędkością tłoczenia substancji i formowaniem jej powierzchni. Pod pojęciem materiału rozumie się wszystkie rzeczywiste układy materialne wyodrębnione z otoczenia i zachowujące ciągłość swojej struktury.

Modele reologiczne opisujące właściwości reologiczne ciał rzeczywistych oraz rodzaje cieczy w ujęciu reologicznym zostały dokładnie omówione w literaturze przedmiotu (Ferguson, Kembłowski, 1995; Kurdowski, 1990; Szwabowski, 1999; Grzeszczyk, 1999).

Charakterystyczną właściwością cieczy jest lepkość. W wyniku działania naprężenia ciecze ulegają odkształceniu, które utrzymuje się po usunięciu naprężenia, a ciecz nie powraca do stanu przed odkształceniem. Właściwości reologiczne takiej cieczy opisane są prawem Newtona. Wykres naprężeń stycznych w funkcji prędkości ścinania nazywamy krzywą płynięcia i dla płynu newtonowskiego ma on postać linii prostej przechodzącej przez początek układu współrzędnych i nachylenie w stosunku do osi poziomej równe lepkości cieczy. Ciecze, dla których krzywa płynięcia w danej temperaturze i pod danym ciśnieniem nie przyjmuje postaci linii prostej przechodzącej przez początek układu współrzędnych, nazywane są cieczami nienewtonowskimi. Wśród nich wyróżniamy ciecze, które posiadają i nie posiadają granicy płynięcia, tzn. granicznego naprężenia stycznego, poniżej którego substancja zachowuje się jak ciało stałe sprężyste (Ferguson, Kembłowski, 1995).



Rys. 7. Krzywe płynięcia cieczy nie posiadających granicy płynięcia τ_0 (ciecz pseudoplastyczna, newtonowska i dylatancyjna) oraz cieczy posiadających granicę płynięcia τ_0 (lepkoplastyczna i nieliniowo lepkoplastyczna); τ - naprężenie styczne, G - prędkość ścinania (Ferguson, Kembłowski, 1995)

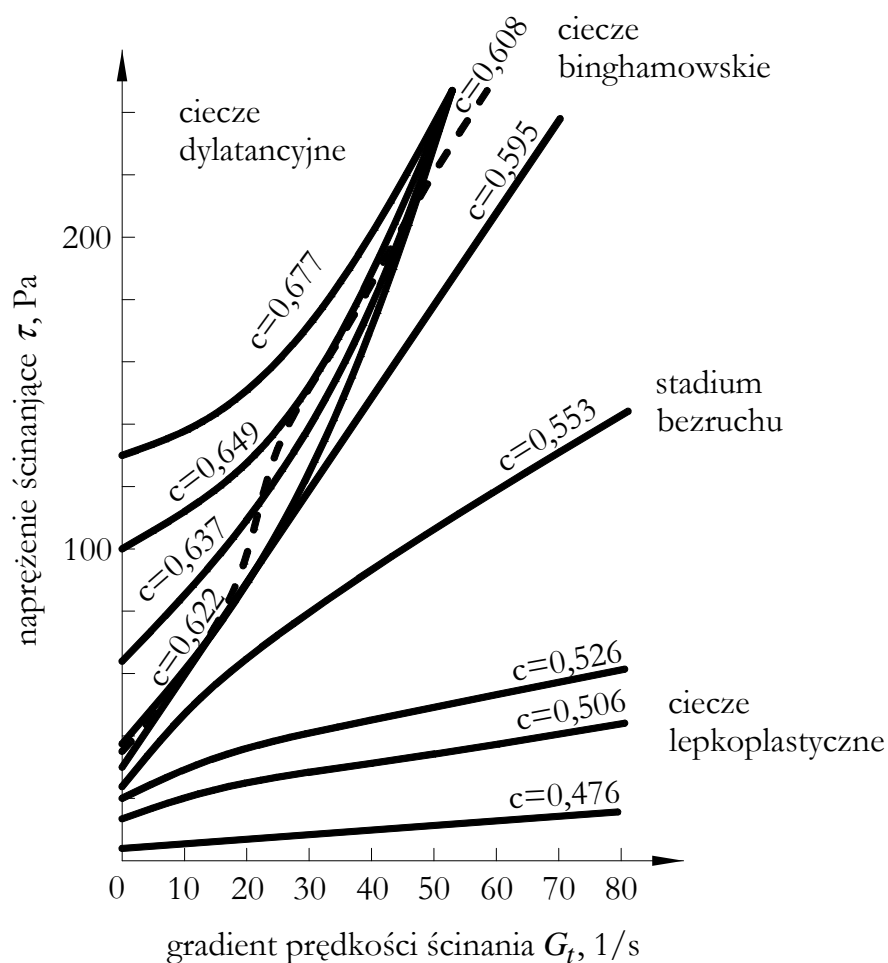
Do opisu płynięcia cieczy wykorzystuje się modele reologiczne obrazujące związek między naprężeniami stycznymi τ a gradientem prędkości ścinania G . Płynne zaczyny i pasty zawierające cementy portlandzkie są klasyfikowane do modeli reologicznych przedstawionych w tabeli 13.

Tabela 13. Modele reologiczne stosowane do zawiesin i past cementowych (Papo, 1988; Jones i Taylor, 1977)

Model reologiczny	Równanie reologiczne	Parametry reologiczne	Uwagi
1	2	3	4
Bingham	$\tau = \tau_0 + \eta_p G$	τ – naprężenia ścinające, τ_0 – granica płynięcia, η_p – lepkość plastyczna, G – prędkość ścinania,	ma zastosowanie do zawiesin o wysokim współczynniku w/c
Herschela-Bulkleya	$\tau = \tau_0 + KG^n$	K – miara konsystencji, n – miara pseudoplastyczności,	człon staly równania jest odpowiednikiem granicy płynięcia, człon potęgowy jest związany z niszczeniem struktury;
Roberstona-Stiffa	$\tau = A(G + B)^c$	A, C – parametry jak par. K i n z równania Herschela-Bulkleya, B – parametr korygujący granicę płynięcia,	dla $C=1$ → równanie Bingham; dla $B=0$ → równanie Herschela-Bulkleya, dla $B=0$ i $C=1$ → równanie Newtona; parametr C ma związek ze stosunkiem w/c w zawieszinie
Eyringa	$\tau = a \cdot \sinh^{-1} \cdot b \cdot G$	a, b – stałe,	nie uwzględnia granicy płynięcia
Cassona	$\tau = \tau_0 + \eta_\infty G + 2(\tau_0 \eta_\infty)^{1/2} \cdot G^{1/2}$	τ_0 – granica płynięcia przy bardzo dużych naprężeniach ścinających, η_∞ – lepkość przy bardzo dużych naprężeniach ścinających,	równanie zakłada skupianie się rozproszonych cząstek w hipotetyczne łańcuchy o dl. zależnej od sił międzycząsteczkowych i naprężenia ścinającego; równanie nieodpowiednie dla bardzo skoncentrowanych zawiesin
Sisko	$\tau = a \cdot G + b \cdot G^c$	a – stała odpowiadająca lepkości przy bardzo dużej prędkości ścinania, b, c – parametry stałe,	model nie zapewnia odpowiedniej dokładności oszacowania granicy płynięcia zaczynów cementowych

1	2	3	4
Williamsona	$\tau = \eta_{\infty} G + \tau_f \frac{G}{G + \Gamma}$	η_{∞} – jw., τ_f – parametr równy co do wartości miejsca przecięcia asymptoty krzywej przeplwywu z osią naprężeń ścinających, Γ – parametr opisujący odchylenie zachowania cieczy od modelu Bingham;	<p>model stosowany do opisu zachowania reologicznego świeżych past cementowych</p>
Vom Berga	$\tau = \tau_0 + b \sinh^{-1} \frac{G}{c}$	b, c – stałe,	<p>do opisu zachowania podczas ścinania past cementowych</p>

Właściwości reologiczne płynnych zaczynów i past cementowych były badane głównie w wiskozymetrach rotacyjnych, a podstawowym składnikiem zaczynów i past był cement portlandzki. Odpowiednie do opisu zachowania reologicznego zawiesin i past cementowych okazały się trzy modele: Herschla-Bulkleya, Robertsona-Stiffa i Sisko. Jednak najlepszym z nich okazał się model Herschla-Bulkleya, w przypadku którego stwierdzono dobrą korelację między wynikami eksperymentalnymi a samym równaniem (Papo, 1988). Na rys. 8 pokazano wpływ wzrostu stężenia fazy stałej w zaczynie cementowym na jego właściwości reologiczne (Legrand, 1972).



Rys. 8. Krzywe płynięcia zapraw cementowych w zależności od zawartości fazy stałej (Legrand, 1972)

Odształcalność postaciową cieczy charakteryzują parametry reologiczne. Są to stałe materiałowe, do których należą (Szwabowski, 1999):

- lepkość plastyczna, charakterystyczna dla ośrodków przejawiających granicę płynięcia, stanowi miarę oporu jaki stawia mieszanka płynięciu postaciowemu; Szwabowski (Szwabowski, 1999) podaje, że z badań

Bombleda⁵ oraz Muraty i Kikukawy⁶ wynika, że lepkość plastyczna mieszanki betonowej rośnie wraz ze wzrostem temperatury i jej wpływ na lepkość jest wyraźniejszy im mniejsza jest koncentracja kruszywa;

- spójność mieszanki jest to zdolność do zachowania nadanego jej kształtu, jeżeli naprężenia styczne nie są nadmiernie duże; jest to efekt wszechstronnego ciśnienia kapilarnego, wynikającego z występowania zjawisk powierzchniowych na styku faz występujących w mieszance betonowej: stałej, ciekłej i gazowej;
- współczynnik tarcia wewnętrznego charakteryzuje opór tarcia wewnętrznego mieszanki stawiany jej odkształceniu postaciowemu, który wywołany jest tarciami pomiędzy poszczególnymi ziarnami przy ich przemieszczaniu się względem siebie; parametr ten uzależniony jest od wielkości ziaren, ich kształtu, porowatości, koncentracji objętościowej kruszywa w mieszance oraz zastosowanego cementu;
- moduł odkształcalności (sztywności) postaciowej zależy od obciążenia mieszanki; obciążenie wywołuje gradient ciśnienia w wodzie i związany z tym przepływ filtracyjny, powodujący trwałość części odkształceń mieszanki; Szwabowski przytacza badania Powersa⁷, z których wynika, że sztywność postaciowa jest funkcją stosunku objętości ziaren fazy stałej do objętości wody w mieszance oraz zależy od historii odkształceń;

Rozpatrując badaną mieszankę jako ośrodek ciągły o strukturze nierozdrobnionej można zastąpić spójność oraz współczynnik tarcia wewnętrznego granicą płynięcia τ_0 . Parametry reologiczne mieszanki zależą od stanu jej struktury.

Właściwości reologiczne zawiesin twardniejących bentonitowo-cementowych nie zostały dotychczas dostatecznie rozpoznane. Rafalski (Rafalski, 1995) przytacza, że Jefferis⁸ wykonał badania lepkości plastycznej i pozornej zawiesin bentonitowo-cementowych, natomiast Deere⁹ wyznaczył zależność między lepkością umowną mierzoną lejkiem Marsha a lepkością plastyczną obliczaną na podstawie badań w wiskozymetrze rotacyjnym.

⁵ Bomble I.P., *Rhéologie du mortiers et des béton frais – influence du facteurs ciment*, Fresh Concrete, Proc RILEM Sem., t. 1, University of Leeds 1983.

⁶ Murata J., Kikukawa H., *Studies on rheological analysis of fresh concrete*, Fresh Concrete, Proc. RILEM Sem., t. 1, University of Leeds 1983.

⁷ Powers T.C., *The properties of fresh concrete*, Wiley & Sons, New York 1968.

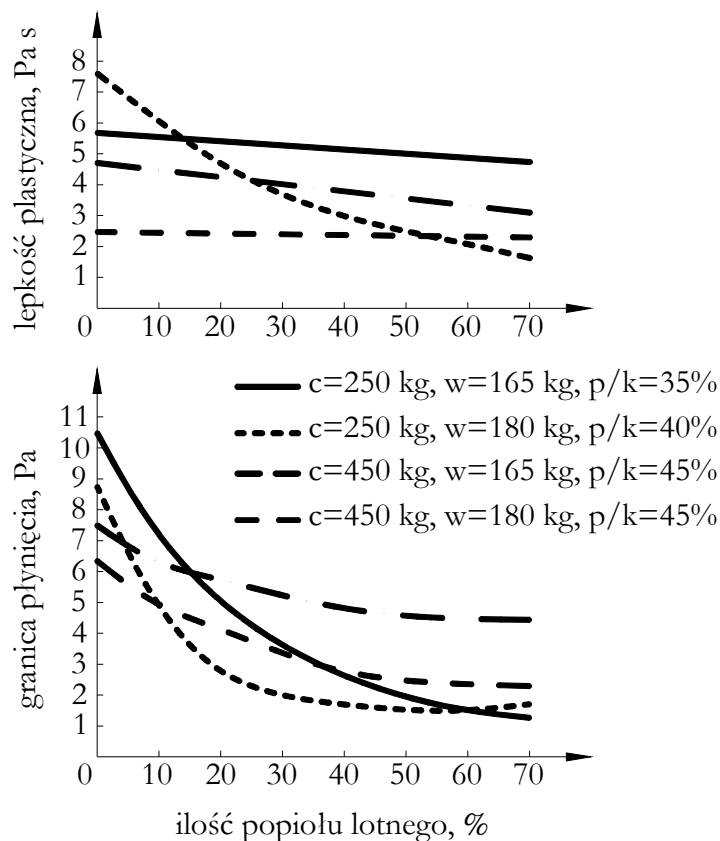
⁸ Jefferis S.A., *Effects of mixing on bentonite slurries and grouts*, Proceedings of the Conf. On Grouting in Geotechnical Engineering, New Orleans 1982.

Jefferis S.A., *Bentonite-cement slurries for hydraulic cut-offs*, Proc. Of the 10th Int. Conf. On Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm 1981.

⁹ Deere D.U., *Cement-bentonite grouting for dams*, Proc. Of the Conf. On Grouting in Geotechnical Engineering, New Orleans 1982.

Lepkość plastyczna mieszanki zależy od jej geometrii struktury przestrzennej i koncentracji cząstek stałych. Wraz ze wzrostem koncentracji ziaren fazy stałej wykładniczo rośnie lepkość, aż do osiągnięcia wielkości odpowiadającej koncentracji krytycznej. Natomiast lepkość mieszanki poddanej ścinaniu spada wraz ze wzrostem czasu ścinania. Zjawisko to wynika z uporządkowania przestrzennej struktury ziarnowej mieszanki oraz uwolnienia części wody meniskowej i błonkowej, w wyniku działania sił zewnętrznych, większych od sił kapilarnych i adhezji działających dotychczas w mieszance (Szwabowski, 1999).

Jako dodatki do mieszanek stosuje się m.in. popiół lotny i mielony żużel wielkopieczowy, które umożliwiają osiągnięcie lepszych parametrów technologicznych mieszanki oraz obniżenie jej kosztów. Popiół lotny, zastosowany jako częściowy zamiennik ilości cementu w mieszance, powoduje uszczelnienie struktury zaczynu poprzez wypełnienie porów międzyziarnowych cementu, poprawia urabialność mieszanki, jej spoistość, powoduje, że jest ona bardziej odporna na wyciek wody i łatwiejsza do pompowania. Dodatek popiołu lotnego jako zamiennika części cementu w składzie mieszanki, redukuje granicę płynięcia mieszanki, a wielkość tego efektu rośnie wraz z ilością i jakością dodanego popiołu. Powoduje również zmniejszenie, choć w mniejszym zakresie, lepkości plastycznej. Należy jednak pamiętać, że właściwości popiołu zależą od rodzaju spalanego węgla i reżimu spalania (Szwabowski, 1999). Na rys. 9 pokazano wpływ częściowego zastąpienia popiołem lotnym cementu na granicę płynięcia mieszanki betonowej.



Rys. 9. Wpływ częściowego zastąpienia cementu popiołem lotnym na lepkość i granicę płynięcia różnych mieszanek (Szwabowski, 1999); ozn. cement – c, woda – w, piasek – p, kruszywo – k

Badania te dotyczą popiołu lotnego pochodzącego z konwencjonalnego spalania węgla. Ten rodzaj popiołu charakteryzuje się sferycznymi ziarnami wielkości 1–100 μm . Dotychczas nie rozpatrywano wpływu na właściwości reologiczne mieszanki popiołu pochodzącego ze spalania fluidalnego, który składa się z ziaren o nieregularnym kształcie (fot. 2). Dodatek tego rodzaju popiołu do betonu powoduje wzrost wodożądności i zmniejszenie urabialności mieszanki betonowej.

Granulowany mielony żużel wielkopiecowy zwykle stosowany jest jako dodatek do cementu portlandzkiego w trakcie produkcji cementu hutniczego. Zmniejsza wodożądność mieszanki i skłonność do segregacji kruszywa podczas mieszania oraz poprawia jej urabialność. Jednak duże zmiany ilości zastosowanej wody mogą tę urabialność pogorszyć. Szwabowski podaje, że z badań Yanagity i Wami¹⁰ krzywych płynięcia mieszanek o różnym udziale procentowym żużla

¹⁰ Yanagita K., Wami H., *Evaluating the flow properties of high strength concrete*, Utilization of High Strength Concrete, 3rd Int. Symp. Lillehammer, Norway 1993.

hutniczego w spoiwie wynika, że granica płynięcia mieszanek maleje wraz ze wzrostem ilości żużla (wagowo), natomiast lepkość plastyczna rośnie. Zjawisko to wynika ze zmiany struktury zaczynu, gdyż żużel ma większą miarkość niż cement i wypełnia przestrzeń między ziarnami cementu, przez co zwiększa się ilość wody wolnej. Jednak wpływ dodatku żużla na reologię mieszanki jest mniejszy niż dodatek popiołu lotnego.

Część badawcza

Badania reologiczne zawiesin bentonitowo-żużlowo-popiołowo-wodnych w prezentowanej pracy wykonano na reometrze standardowym firmy Brookfield typ DV-III Ultra. Do wykonania badania użyto zlewki szklanej o pojemności 600 ml i wrzeciona cylindrycznego niestandardowego.

W celu wyznaczenia krzywych płynięcia zawiesiny należy obliczyć następujące parametry:

- moment skręcający ze wzoru:

$$M = \frac{\%M \cdot a}{100}, \quad \text{N}\cdot\text{m} \quad (4.1)$$

gdzie: $\%M$ – odczyt procentu momentu skręcającego przy danej prędkości obrotowej,

a – maksimum skali momentu dla wrzeciona niestandardowego typ LV, $\text{N}\cdot\text{m}$, $a=673.7 \cdot 10^{-7} \text{ N}\cdot\text{m}$.

- gradient prędkości ścinania ze wzoru:

$$G_t = \frac{2\omega \cdot R_c^2 \cdot R_b^2}{x^2 (R_c^2 - R_b^2)}, \quad 1/\text{s} \quad (4.2)$$

gdzie: ω - prędkość kątowna wrzeciona, -, wyznaczona z zależności:

$$\omega = \frac{2\pi}{60} \cdot \text{RPM}, \quad (4.3)$$

dla RPM – prędkość obrotowa ustalana skokowo, obr./min,

R_c – promień zlewki, cm, $R_c=9.0$ cm,

R_b – promień wrzeciona, cm, $R_b=0.5125$ cm,

x – promień, na którym mierzymy gradient prędkości ścinania, cm,

$x=R_b$.

Gradient prędkości ścinania występujący w badaniach wiskozymetrycznych jest gradientem technicznym G_t , nie jest on rzeczywistą wartością gradientu prędkości ścinania G . Gradient prędkości ścinania G_t nazywany jest często prędkością odkształcenia i zależy on od wymiarów systemu cylindrów i jest proporcjonalny do prędkości obracającego się cylindra.

- naprężenia ścinające ze wzoru:

$$\tau = \frac{M}{2\Pi \cdot R_b^2 \cdot L}, \quad \text{Pa} \quad (4.4)$$

gdzie L – długość efektywna wrzeciona, cm, $L=5.395$ cm.

- lepkość plastyczna ze wzoru:

$$\eta = \frac{\tau}{G_t}, \quad \text{Pa}\cdot\text{s} \quad (4.5)$$

Wyniki badań zawiesiny twardniejącej wykonanej według receptur 1–4 z udziałem nieaktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego zostały zawarte w Załączniku 1 w tabelach 4.10–4.13. Wykonano wykresy technicznych krzywych płynięcia zawiesiny (rys. 4.14, 4.16, 4.18, 4.20) oraz zmian lepkości przy różnych gradientach prędkości ścinania (rys. 4.15, 4.17, 4.19, 4.21). Uzyskane wielkości naprężeń ścinających τ i gradientów prędkości ścinania G_t tworzą tzw. techniczną krzywą histerezy i są podstawą do analizy wyników i określenia charakterystyki reologicznej zawiesiny bentonitowo-żużlowo-popiołowo-wodnej.

Niepewność względna pomiaru gradientu prędkości ścinania wynosi maksymalnie 1%. Natomiast niepewności względne naprężeń ścinających i lepkości pozornej wynoszą maksymalnie 14%.

5. Badania zawiesiny stwardniałej

Ze względu na główne zastosowanie zawiesin twardniejących na przesłony przeciwfiltracyjne – konstrukcje wykonywane w podłożu budowli wodnych, w walcach przeciwpowodziowych czy składowiskach odpadów – muszą one, jako materiał, prezentować odpowiednie właściwości wytrzymałościowe i filtracyjne oraz zapewnić dobrą współpracę między konstrukcją a gruntem. Zakres badań zawiesiny stwardniałej w ramach niniejszej rozprawy obejmuje sprawdzenie następujących właściwości:

- wytrzymałość na ściskanie i na rozciąganie przy rozłupywaniu,
- przepuszczalność hydrauliczna,
- odkształcalność,

oraz określenie składu fazowego i mikrostruktury wybranych zawiesin z wykorzystaniem następujących metod:

- termicznej analizy różnicowej,
- dyfrakcji rentgenowskiej,
- skaningowej mikroskopii elektronowej.

Badania właściwości wytrzymałościowych i filtracyjnych przeprowadzono w czterech terminach: po 14, 28, 60 i 120 dniach twardnienia próbek, natomiast badanie odkształcalności przeprowadzono na próbkach o wybranych recepturach po 28 i 90 dniach twardnienia. Do każdego badania, w każdym terminie wykorzystano po trzy próbki zawiesiny, w celu określenia powtarzalności wyników pomiarów. Natomiast badania składu fazowego i mikrostruktury wykonano po 28 i 90 dniach twardnienia próbek.

5.1. Właściwości mechaniczne i filtracyjne

5.1.1. Wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu

W czasie twardnienia zawiesiny następuje przyrost wytrzymałości na ściskanie, co wynika z obecności spoiwa. Jednak wartość tego parametru jest dużo niższa w porównaniu z wytrzymałością jaką osiąga beton. Wynika to zarówno z obecności bentonitu w składzie zawiesiny, jak również z wymagań stawianych dla tego materiału. Ze względu na zastosowanie zawiesiny twardniejącej na przesłony przeciwfiltracyjne – konstrukcje wykonywane w podłożu gruntowym – powinna ona charakteryzować się wytrzymałością na ściskanie po 28 dniach twardnienia na poziomie

1.0 MPa. Wynika to z podstawowej roli jaką pełnią przesłony, a mianowicie ograniczenia lub wyeliminowania przepływu wody gruntowej. Bariera przeciwnfiltracyjna z zawiesiny twardniejącej powinna być szczelna i jednocześnie plastyczna, aby możliwa była współpraca z gruntem, w który jest wbudowana. Zbyt wysoka wytrzymałość mechaniczna zwiększa sztywność materiału konstrukcyjnego, co może prowadzić do rozluźnienia gruntu na styku z przesłoną i powstania uprzywilejowanej drogi filtracji wody.

Próbki zawiesiny twardniejącej do badań wytrzymałościowych wykonywano w metalowych formach walcowych o średnicy i wysokości równej 8 cm. Formy metalowe składają się z cylindra i podstawy. Na podstawie umieszczano gumę o grubości 1 mm, a następnie przykręcano cylinder. Działanie to miało na celu zapewnienie maksymalnej szczelności formy i uniemożliwienie ewentualnego wypływu świeżo zarobionej zawiesiny. Dodatkowo (w razie konieczności) styk metalowego cylindra i gumy był zabezpieczony silikonem, a wewnętrzna powierzchnia formy przed wypełnieniem była smarowana olejem, co miało ułatwić rozformowanie próbek po stwardnieniu (fot. 4).



Fot. 4. Próbką zawiesiny twardniejącej w formie metalowej

Do momentu stwardnienia próbki były przechowywane w warunkach laboratoryjnych pod folią. W okresie wyższych temperatur, gdy następowało szybkie parowanie wody z powierzchni twardniejących próbek, była ona uzupełniana aż do dnia rozformowania.

Po stwardnieniu (następowało to w 3–5 dniu po wykonaniu zawiesiny) próbki były rozformowywane i przechowywane do dnia badania w wannach z wodą o temperaturze $+18\pm 2^\circ\text{C}$.

W dniu badania próbki zawiesiny wyjmowano z wody i odstawiano na 15 minut do wyschnięcia. Następnie je ważono na wadze laboratoryjnej o skali do 1000 g i mierzono ich wysokości oraz średnice w celu wyznaczenia gęstości objętościowej, którą obliczano z następującego wzoru:

$$\rho_{st} = \frac{m}{V}, \quad \text{g/cm}^3 \quad (5.1)$$

gdzie: m – masa próbki, g,

V – objętość próbki, cm^3 .

Na niepewność oznaczenia gęstości objętościowej stwardniałej zawiesiny składają się niepewność wykonania pomiarów średnicy i wysokości, która wynosi $\Delta d = \Delta h = \pm 0.01$ cm oraz niepewność pomiaru masy próbki na wadze elektronicznej, która wynosi $\Delta m = \pm 0.05$ g.

Niepewność względna oznaczenia gęstości objętościowej zawiesiny stwardniałej wynosi maksymalnie 1.0%.

Badania wytrzymałości na ściskanie f_c i na rozciąganie przy rozłupywaniu f_t wykonano w prasie hydraulicznej ZD 20. W każdej serii badano po 3 próbki w celu zapewnienia powtarzalności wyników. W przypadku badania wytrzymałości na ściskanie powierzchnia górna próbek, a w razie potrzeby również dolna, przed wykonaniem badania były wyrównywane przy pomocy gipsu budowlanego w celu dopasowania jej do głowic maszyny wytrzymałościowej i zapewnienia możliwie osiowego działania siły.

Wytrzymałość na ściskanie próbek walcowych f_c wyznaczono ze wzoru:

$$f_c = \frac{F}{A}, \quad \text{MPa} \quad (5.2)$$

gdzie: F – wartość siły niszczącej, kN,

A – pole podstawy próbki, m^2 .

Na niepewność wyznaczenia wytrzymałości na ściskanie składają się niepewność pomiaru średnicy próbki, od której zależy wartość niepewności pomiaru pola powierzchni próbki oraz niepewność pomiaru siły wywieranej na próbkę podczas badania. Niepewność pomiaru średnicy próbki wynosi $\Delta d = \pm 0.01$ cm, a niepewność pomiaru siły $\Delta F = \pm 0.05$ kN.

Niepewność względna pomiaru wytrzymałości na ściskanie zawiesiny stwardniałej wynosi maksymalnie $\pm 9\%$.

Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu f_t wyznaczono ze wzoru:

$$f_t = \frac{2 \cdot F}{\Pi \cdot L \cdot d}, \quad \text{MPa} \quad (5.3)$$

gdzie: F – wartość siły niszczącej, kN,

L – długość linii styku – wysokość próbki, m,

d – wymiar przekroju poprzecznego – średnica próbki, m.

Na niepewność wyznaczenia wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu składają się niepewność pomiaru średnicy i wysokości próbki oraz niepewność pomiaru siły wywieranej na próbkę. Niepewność pomiaru średnicy i wysokości próbki wynosi $\Delta d = \Delta b = \pm 0.1$ cm, a niepewność pomiaru siły $\Delta F = \pm 0.05$ kN.

Niepewność względna pomiaru wytrzymałości na rozciąganie przy rozłupywaniu zawiesiny stwardniałej wynosi maksymalnie 13%.

Wyniki badań wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu przedstawiono w Załączniku 2 w tabelach 5.1–5.3, a wykresy wytrzymałości w funkcji czasu twardnienia próbek zawiesiny stanowią odpowiednio rys.: 5.1–5.11 – wytrzymałość na ściskanie oraz 5.12–5.22 – wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu.

5.1.2. Przepuszczalność hydrauliczna

Zjawisko filtracji może wystąpić w ośrodku porowatym. Polega ono na ruchu cieczy lub gazu w porach – wolnych przestrzeniach w postaci kanalików oraz szczelin występujących między stykającymi się ze sobą nieruchomymi cząstkami stałymi ośrodka. W przypadku, gdy pory są całkowicie wypełnione wodą mówimy o ośrodku nasyconym. Natomiast, gdy w porach występuje woda i gaz mówimy o ośrodku nienasyconym (Mitosek, 1997).

Woda w ośrodku porowatym występuje w kilku formach, mianowicie jako woda związana (higroskopijna i błonkowata), kapilarna i woda wolna. Woda higroskopijna (adsorbowana) tworzy powłokę wodną na powierzchni cząstki stałej ośrodka, z którą jest trwale związana. Woda błonkowata tworzy drugą warstwę, poza wodą higroskopijną, na powierzchni cząstki stałej ośrodka porowatego (jest z nią słabiej związana) i przesuwana się z jednej cząstki stałej na drugą dążąc do wyrównania grubości warstw. Woda kapilarna podnosi się w kanalikach powstałych z porów między cząstkami stałymi ponad zwierciadło swobodne w wyniku działa-

nia sił napięcia powierzchniowego i adhezji między wodą a cząstkami stałymi ośrodka. Woda wolna wypełnia pory ośrodka, a jej ruch wynika z działania siły ciężkości lub sił parcia (Pisarczyk, 2005; Mitosek, 1997).

Zawiesina twardniejąca to materiał konstrukcyjny będący mieszaniną wody, spoiwa i dodatków. Ze względu na obecność tych składników można je zaliczyć do materiałów o cechach podobnych do betonu, zapraw czy zaczynów cementowych. Właściwości filtracyjne tych kompozytów zależą od ich porowatości oraz wielkości, rozkładu, kształtu, krętości i ciągłości porów (Neville, 2000).

Porowatość zaczynu cementowego zależy w dużej mierze od sposobu jego wykonania, zagęszczania mieszanki oraz ilości cementu i jest niezwykle ważną cechą warunkującą m.in. jego przepuszczalność, wytrzymałość, odporność na agresję chemiczną czy mrozoodporność.

Wyróżniamy trzy rodzaje porowatości (Mitosek, 1997):

- porowatość powierzchniowa m_A definiowana jako stosunek powierzchni porów A_p w przekroju do powierzchni całego przekroju A (ziaren i porów) i wyrażona wzorem:

$$m_A = \frac{A_p}{A}, \quad (5.4)$$

- porowatość objętościowa m definiowana jako stosunek objętości porów V_p do całkowitej objętości warstwy V wyrażona wzorem:

$$m = \frac{V_p}{V}, \quad (5.5)$$

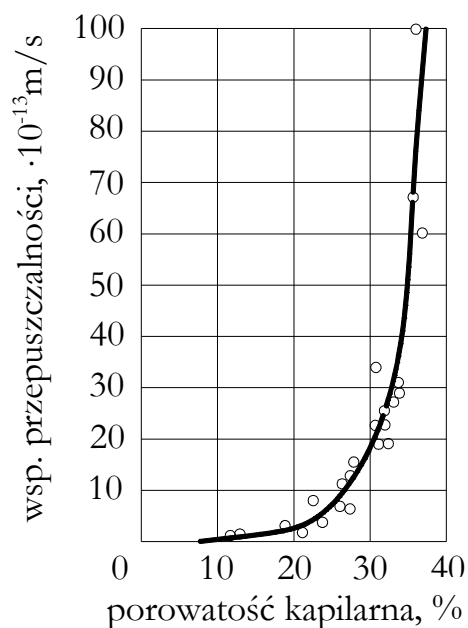
- porowatość efektywna ε definiowana jako stosunek objętości cieczy mogącej swobodnie opuścić dany ośrodek porowaty V_c do objętości samego ośrodka V wyrażona wzorem:

$$\varepsilon = \frac{V_c}{V}, \quad (5.6)$$

Pory występujące w stwardniałym materiale typu zaczyn cementowy czy beton możemy podzielić na otwarte, które z kolei dzielimy na przelotowe i ślepe, oraz zamknięte. Przepuszczalność stwardniałego zaczynu cementowego czy betonu zależy od ilości porów otwartych przelotowych, którymi ciecz jest prowadzona przez cały materiał (Aksielrud, Altszuler, 1987; Hall, Hoff, 2002). Biorąc pod uwagę rozmiar porów występujących w betonie możemy je podzielić na następujące rodzaje (Rusin, 2002):

- pory powietrzne o średnicy powyżej 10 μm , które powstają w wyniku niepełnego zagęszczenia mieszanki, bądź są celowo wprowadzane poprzez zastosowanie specjalnych dodatków napowietrzających beton; można je zaobserwować w stwardniałej mieszance gołym okiem lub przy pomocy prostych urządzeń optycznych; mają one kształt sferyczny, obły i nie są ze sobą bezpośrednio połączone;
- pory kapilarne o średnicy 0.01–10 μm , które możemy podzielić na duże (o średnicy 0.05–10 μm) i małe (o średnicy 0.01–0.05 μm); tworzą one w przestrzeni stwardniałego zaczynu cementowego system przypadkowo rozmieszczonych, połączonych ze sobą nieregularnych pustek o różnych kształtach, którymi transportowane są gazy i ciecze, głównie woda z rozpuszczonymi w niej substancjami; część najmniejszych porów kapilarnych jest zawsze wypełniona wodą, a pozostała część może wodę oddawać okresowo poprzez parowanie oraz wchłaniać poprzez adsorpcję lub ciśnienie kapilarne;
- pory żelowe o średnicy 0.001–0.004 μm będące pustkami wewnętrznymi hydratów skryształizowanych w różnym stopniu i stanowiących wraz z utworami koloidalnymi mieszaninę produktów hydratacji cementu nazywaną żelem; woda występująca w porach żelowych jest bardzo silnie zaadsorbowana i usunięcie jej możliwe jest wyłącznie po wysuszeniu materiału w temperaturze około 150°C; zawartość porów żelowych w stwardniałym zaczynie cementowym jest stała (około 28% objętości żelu) niezależnie od wartości początkowej współczynnika w/c;

Stwardniały zaczyn cementowy jest materiałem o zwartej teksturze, o bardzo małych i licznych porach i cząstkach stałych. Przepuszczalność zaczynu cementowego w stosunku do wody uwarunkowana jest jego porowatością kapilarną (rys. 10) i zmienia się wraz z postępem hydratacji w czasie twardnienia (Neville, 2000).



Rys. 10. Zależność między przepuszczalnością a porowatością kapilarną zaczynu cementowego (Powers, 1958)

Przepuszczalność zaczynu cementowego zależy również od ilości spoiwa (stosunku w/s w zaczynie) i wielkości ziaren, gdyż przy tym samym stosunku w/s zaczyn wykonany z bardziej drobnoziarnistego spoiwa charakteryzuje się niższą porowatością. Niebagatelne znaczenie ma także właściwa pielęgnacja na mokro stwardniałego zaczynu i jej długość, która znacznie zmniejsza jego przepuszczalność.

Na ruch cieczy w zaczynie cementowym mają również wpływ procesy, które zachodzą poprzez dyfuzję i sorpcję i wraz z przepływem cieczy przez ośrodek porowaty składają się na jego cechę jaką jest przenikalność. Jednym z tych procesów jest podciąganie kapilarne, które zachodzi w ośrodku porowatym bezpośrednio stykającym się ze źródłem wody. Proces ten ma miejsce, gdy w kanałkach o niewielkich rozmiarach powstaną silne podciśnienia wynikające z przyczepności wody do ścianek kanałków i napięcia powierzchniowego na granicy między wodą a powietrzem (Neville, 2000; Szuster, Utrysko, 1992; Wilun, 1982).

Kolejnym procesem jest dyfuzja – transport jonów i cząsteczek w porach zaczynu cementowego, który zachodzi w momencie wystąpienia gradientu stężeń, a nie różnicy ciśnień. Na proces ten ma wpływ udział porów żelowych w stwardniałym zaczynie, a konkretnie ich powierzchnia, krętość oraz częste zmiany średnicy (Kurdowski, Garbacik, 2005; Neville, 2000).

Absorpcja jest to proces polegający na wnikaniu cząsteczek czy jonów do struktury ośrodka porowatego. Za pośrednictwem tego zjawiska można zmierzyć

objętość przestrzeni jaką zajmują pory w stwardniałym zaczynie cementowym (betonie), którą wyraża się miarą nasiąkliwości (Neville, 2000).

Pomiaru porowatości dokonuje się przy pomocy wielu metod, które zostały opisane w literaturze przedmiotu (Aksielrud, Altszuler, 1987; Hall, Hoff, 2002). Najpopularniejszą jest metoda porozymetrii rtęciowej polegająca na umieszczeniu próbki badanego materiału w penetrometrze i „wciskaniu” rtęci w pory poprzez podniesienie ciśnienia.

Rozpatrując przepływ w ośrodku porowatym bierzemy pod uwagę ruch laminarny cieczy, gdyż odbywa się on w porach o małych przekrojach, w których różnice ciśnień, a zatem i spadki hydrauliczne są zwykle niewielkie. W konsekwencji prędkości cieczy przepływającej przez ośrodek porowaty są bardzo małe, w większości przypadków dużo mniejsze od 1 mm/s (Pisarczyk, 2001). W rezultacie wielu badań wyznaczono graniczną wartość liczby Reynoldsa, poniżej której ruch jest laminarny, wyrażonej wzorem:

$$Re = \frac{v \cdot d_{10}}{\nu} \leq 5, \quad - \quad (5.7)$$

gdzie: v – prędkość filtracji, m/s,

d_{10} – średnica miarodajna ziaren gruntu, m,

ν - kinematyczny współczynnik lepkości cieczy, m²/s.

Średnica miarodajna ziaren gruntu jest to taka ich średnica, że wraz z mniejszymi jest ich w gruncie 10% masy. Parametr ten uzyskuje się poprzez wykonanie przesiewu badanej próbki gruntu przez zestaw kalibrowanych sit o różnych średnicach. Pełni on funkcję średnicy zastępczej ziaren, która charakteryzuje cały ośrodek porowaty. Wprowadzając do opisu ośrodka wielkość średnicy miarodajnej przyjmuje się założenie, że jest on jednorodny i cechuje się właściwościami filtracyjnymi gruntu rzeczywistego.

W rzeczywistym ośrodku porowatym woda przepływa kanalikami o skomplikowanym kształcie i zmiennych przekrojach, więc określenie lokalnych prędkości rzeczywistych, kolejnych wymiarów przekrojów kanalików czy rzeczywistej drogi jaką cząsteczka wody przebywa nie jest możliwe. Stąd do praktyki obliczeń hydraulicznych wprowadzono pojęcie przepływu filtracyjnego, który jest umownym, fikcyjnym modelem przepływu. Obszar filtracji, przez który odbywa się przepływ filtracyjny nie zawiera ziaren, a ciecz porusza się w całym obszarze wzdłuż regularnych torów. Granice obszaru filtracji pokrywają się z granicami ośrodka porowatego, w którym odbywa się przepływ, a ciśnienia i przepływy w odpowiadają-

cych sobie punktach obu obszarów są jednakowe. Prędkość filtracji wody podlegającej przepływowi filtracyjnemu wyznacza się ze wzoru (Szuster, Utrysko, 1992):

$$v = \frac{q}{A}, \quad \text{m/s} \quad (5.8)$$

gdzie: v – prędkość filtracji, m/s,

q – natężenie przepływu, m³/s,

A – powierzchnia przekroju poprzecznego ośrodka, przez który odbywa się przepływ, m².

Małe przekroje kanalików i małe prędkości przepływu gwarantują, że opory ruchu (spadek hydrauliczny) i prędkości są wzajemnie proporcjonalne, więc opisując je możemy skorzystać z prawa sformułowanego przez Henry Darcy w 1856 r.:

$$v = k \cdot i, \quad \text{m/s} \quad (5.9)$$

gdzie: k – przepuszczalność hydrauliczna, m/s,

i – gradient hydrauliczny, wyrażony wzorem:

$$i = \frac{\Delta H}{l}, \quad (5.10)$$

gdzie: ΔH – przyrost naporu hydrodynamicznego, m,

l – droga filtracji (wysokość próbki), m.

W przypadku ośrodka porowatego o niskiej przepuszczalności, np. grunt spoisty, filtracja wody rozpoczyna się dopiero po przekroczeniu tzw. spadku granicznego (początkowego), gdyż przepływ utrudnia woda błonkowa, która całkowicie wypełnia pory. Filtracja następuje dopiero w momencie, gdy zaistnieje takie naprężenie ścinające w błonkach wody (wywołane gradientem hydraulicznym), które przekroczy jej opór na ścinanie. Wartość granicznego spadku hydraulicznego, który spowoduje przepływ wody w ośrodku porowatym, uzależniona jest od uziarnienia ośrodka – im jest ono drobniejsze tym większy powinien być gradient graniczny (Pisarczyk, 2001).

Współczynnik przepuszczalności hydraulicznej k zależy od właściwości ośrodka porowatego, takich jak porowatość czy uziarnienie oraz od właściwości przepływającej w nim cieczy, czyli lepkości, która zmienia się wraz ze zmianą temperatury wody (Pisarczyk, 2001). Aby wyznaczyć współczynnik przepuszczalności hydraulicznej ośrodka porowatego należy uwzględnić jego przepuszczalność właściwą K (Garbulewski, 2003):

$$q = K \cdot \frac{\gamma}{\mu} \cdot \frac{\Delta H}{l} \cdot A, \quad \text{m}^3/\text{s} \quad (5.11)$$

gdzie: q – przepływ jednostkowy, m^3/s ,

K – przepuszczalność właściwa gruntu, m^2 ,

γ – ciężar jednostkowy cieczy, kN/m^3 , równy iloczynowi jej gęstości objętościowej i przyspieszenia ziemskiego,

μ – lepkość dynamiczna cieczy, $\text{Pa}\cdot\text{s}$.

Pozostałe oznaczenia jak we wzorach (5.8) i (5.10).

Przepuszczalność hydrauliczna k ośrodka porowatego jest zależna od przepuszczalności właściwej K w następujący sposób:

$$k = K \cdot \frac{\gamma}{\mu}, \quad \text{m/s} \quad (5.12)$$

Oznaczenia jak we wzorze (5.11).

Zależność współczynnika przepuszczalności hydraulicznej k od właściwości przepływającej cieczy jaką jest temperatura, przedstawia zależność:

$$k_{10} = \frac{k_T}{0,7 + 0,03 \cdot T}, \quad \text{m/s} \quad (5.13)$$

gdzie: k_{10} – współczynnik filtracji odniesiony do temperatury wody $+10^\circ\text{C}$, m/s ,

k_T – współczynnik filtracji wyznaczony przy danej temperaturze, m/s ,

T – temperatura przepływającej wody, $^\circ\text{C}$.

Do badania przepuszczalności hydraulicznej użyto próbek wykonanych w plastikowych formach walcowych o średnicy 7.5 cm i wysokości 8 cm. Formy zostały uprzednio specjalnie przygotowane: wewnątrz wykonano ryflowanie o szerokości 2 mm i głębokości 1.8 mm, w odstępach 2 mm, a przed wypełnieniem form zawieszoną wykonano wewnątrz nich dwa pierścienie z wodoodpornego silikonu, w celu zapobieżenia ewentualnemu przepływowi wody na styku próbki zawiesziny z formą plastikową w trakcie badania przepuszczalności hydraulicznej. Przed wykonaniem próbek dno formy plastikowej zabezpieczono przed wypłynięciem zawiesziny za pomocą folii spożywczej (fot. 5). Po stwardnieniu próbki były przechowywane do dnia badania w formach w wannach wypełnionych wodą o temperaturze $18 \pm 2^\circ\text{C}$. Przepuszczalność hydrauliczną zawieszin twardniejących badano w czterech terminach: po 14, 28, 60 i 120 dniach.



Fot. 5. Próbkę zawiesiny twardniejącej w formie plastikowej przeznaczoną do badania przepuszczalności hydraulicznej

Do wyznaczenia współczynnika przepuszczalności hydraulicznej zawiesiny twardniejącej wykorzystano metodę ze zmiennym gradientem hydraulicznym i . Badanie wykonano w odpowiednio do tego celu przystosowanej aparaturze, której szczegółowy opis został przedstawiony przez Falacińskiego (Falaciński, 2006). W badaniu metodą zmiennego spadku hydraulicznego określa się w danych momentach czasowych (t_1, t_2, \dots, t_i) wysokość słupa wody (h_1, h_2, \dots, h_i) w rurce naporowej o przekroju poprzecznym a , która przepływa później przez próbkę o wysokości l i przekroju poprzecznym A . Na tej podstawie oblicza się przepuszczalność hydrauliczną k_T :

$$k_T = \frac{a \cdot l}{A(t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}, \quad \text{m/s} \quad (5.14)$$

gdzie: a – pole przekroju poprzecznego rurki zasilającej, m^2 , ($a=3.8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$)

l – droga filtracji (wysokość próbki), m ,

A – pole przekroju poprzecznego próbki poddanej badaniu, m^2 ,
($A=0.0044 \text{ m}^2$),

t_i – czas odczytu wysokości słupa wody w rurce, s ,

h_i – wysokość słupa wody w momencie odczytu, m .

Wykonano badanie przepuszczalności hydraulicznej zawiesiny stwardniałej na dwa sposoby: z malejącym i rosnącym początkowym gradientem hydraulicznym. Metoda badania z malejącym początkowym gradientem hydraulicznym polegała na napełnieniu rurki zasilającej próbkę do maksymalnej wartości gradientu równej 43.75, a następnie odnotowaniu w odstępach czasowych zmian poziomu wody w rurce. Metoda badania z rosnącym początkowym gradientem hydraulicznym polegała na podnoszeniu poziomu zwierciadła wody w rurce zasilającej, począwszy od gradientu równego 5, skokowo o wartość 5, aż do osiągnięcia maksymalnej wartości spadku (43.75) i odczytywaniu, po upływie ustalonego czasu, zmiany opadania poziomu wody w rurce. Metodę badania przepuszczalności hydraulicznej z wykorzystaniem rosnącego skokowo początkowego gradientu hydraulicznego wykorzystano do badania krótkotrwałej przepuszczalności hydraulicznej (Kledyński *et al.*, 2004).

Niepewność względna pomiaru przepuszczalności hydraulicznej zawiesiny stwardniałej wynosi maksymalnie 15%.

Wyniki badania przepuszczalności hydraulicznej stwardniałej zawiesiny wykonanej ze spoiwa w trzech różnych stanach aktywacji mechanicznej zostały zawarte w Załączniku 2 w tabelach 5.1–5.3, a wykresy przepuszczalności hydraulicznej w funkcji czasu przedstawiono na rys. 5.23–5.33.

5.1.3. Odkształcalność

Reologia jest nauką zajmującą się zachowaniem cieczy (rozdział 4.2.3) i ciała stałego pod wpływem obciążenia działającego w czasie. Rozpatrując odkształcenia ciała stałego mówimy o dwóch zjawiskach reologicznych jakimi są:

- pelzanie – powolne, stale narastające odkształcenie ciała stałego pod wpływem działania niezmiennego w czasie długotrwałego obciążenia;
- relaksacja – powolna zmiana wartości naprężeń przy stałym, utrzymującym się długi okres odkształceniu konstrukcji.

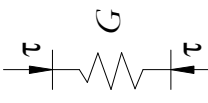
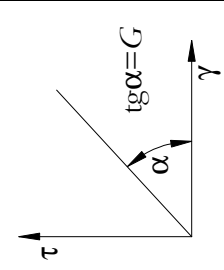
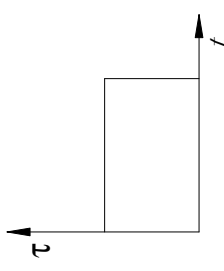
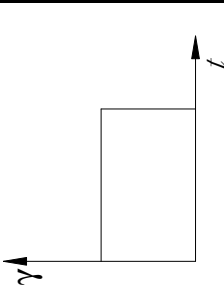
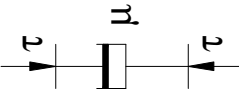
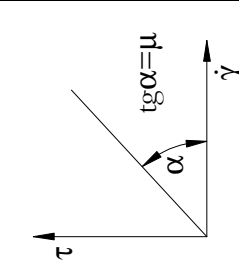
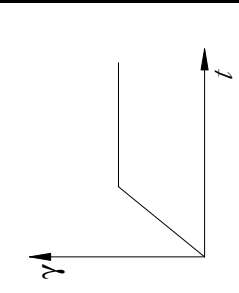
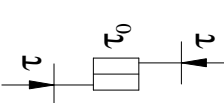
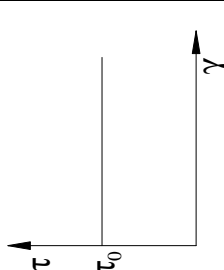
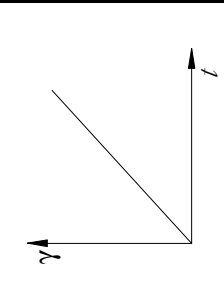
Zachowanie się materiału pod obciążeniem jest funkcją czasu i temperatury. Istnieją materiały, które do pewnej wielkości obciążeń zachowują się jak ciało stałe, którego odkształcenia są skończone i ograniczone przy działaniu skończonych i ograniczonych obciążeń niezależnie od czasu ich działania, a po ich przekroczeniu zachowują się jak ciecz (Brzosko, 1969). Zachowanie reologiczne ciała stałego rozpatruje się do momentu jego zniszczenia.

Zachowanie ciała stałego pod obciążeniem charakteryzują następujące parametry reologiczne (Szwabowski, 1995):

- sprężystość – odwracalność zmian odkształceń wywołanych zmianą naprężeń, jakim poddany jest materiał; proces ten zachodzi do granicy sprężystości, powyżej której odkształcenia stają się trwałe;
- lepkość – właściwość materiału do przeciwstawiania się ruchowi wzajemnemu cząstek podczas płynięcia; parametr ten zależy od temperatury i gradientu prędkości płynięcia w materiale;
- plastyczność – właściwość objawiająca się występowaniem granicznego naprężenia – granicy plastyczności, powyżej której rozpoczyna się płynięcie materiału;

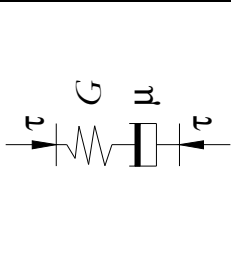
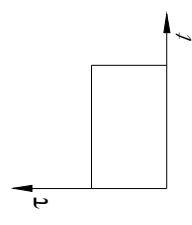
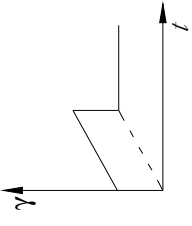
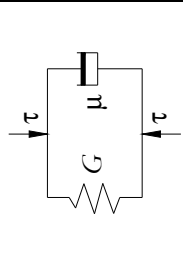
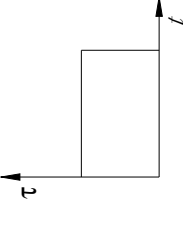
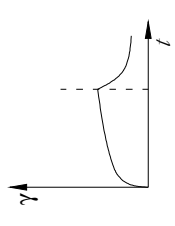
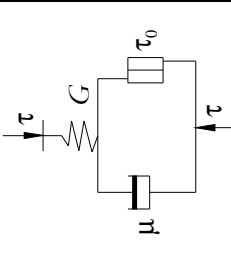
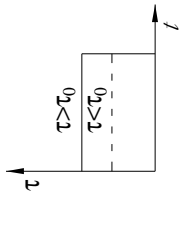
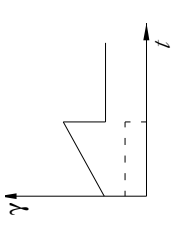
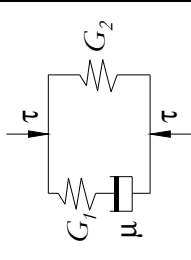
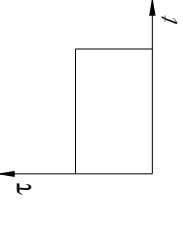
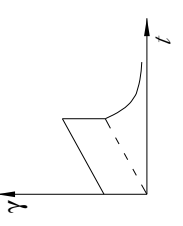
Powyższe cechy reologiczne są przedstawiane poprzez modele ciał reologicznych, z których buduje się złożone, wieloparametrowe modele ciał rzeczywistych. W tabeli 14 przedstawiono reologiczne modele jednoparametrowe ciał, równania reologiczne i charakterystyczne zależności (krzywa reologiczna, naprężenie-czas, odkształcenie-czas). W tabeli 15 przedstawiono modele dwu i więcej parametrowe powstałe przez połączenie poszczególnych ciał prostych w ciągi szeregowo lub równoległe ciał rzeczywistych.

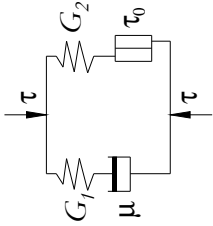
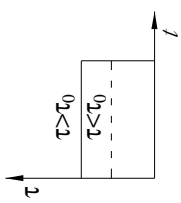
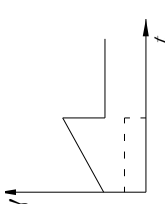
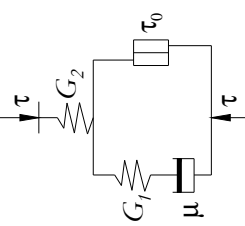
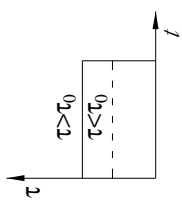
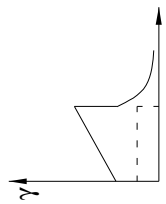
Tabela 14. Reologiczne modele jednoparametrowe ciał (Chrzanowski, 1995; Szwabowski, 1999)

1	2	3	4	5	6	7
Model	Równanie reologiczne	Krzywa reologiczna	Zależność naprężenie-czas	Zależność odkształcenie-czas		
Ciało sprężyste Hooke'a		$\tau = G \cdot \gamma$ τ – naprężenie styczne, G – moduł sprężystości postaciowej, γ – odkształcenie,				
Ciało idealnie lepkie Newtona		$\tau = \mu \cdot \dot{\gamma}$ μ – lepkość dynamiczna, $\dot{\gamma}$ – prędkość ścinania,		$\tau = \text{const.}$		
Ciało idealnie plastyczne Saint-Venanta		$\tau = \tau_0$ τ_0 – naprężenie graniczne,		$\tau \geq \tau_0$		

jednoparametrowy

Tabela 15. Reologiczne modele wieloparametrowe ciał (Chrzanowski, 1995; Szwabowski, 1999; Kisiel, 1967)

1	2	3	4	5	Uwagi
	Model	Zależność naprężenie-czas	Zależność odkształcenie-czas		
dwiparametrowy	Maxwella				stanowi szeregowo połączenie ciała Hooke'a i Newtona;
	Kelvina				stanowi równoległe połączenie ciała Hooke'a i Newtona;
	Bingham				model trójparametrowy stanowiący równoległe połączenie ciała lepkiego Newtona i plastycznego Saint-Venanta z szeregowo dołączonym ciałem sprężystym Hooke'a;
	Zenera				model trójparametrowy stanowiący równoległe połączenie ciała sprężystego Hooke'a i cieczy Maxwella – ciało lepko-sprężyste bez granicy plastyczności;

1	2	3	4	5	6
<p>wieloparametrowy</p>	<p>M/V</p>				<p>model czteroparametrowy stanowiący równoległe połączenie elementu złożonego z ciała sprężystego i lepkiego oraz elementu złożonego z ciała sprężystego i plastycznego – ciało lepko-sprężyste z określoną granicą plastyczności; gdy naprężenie wypadkowe jest mniejsze od gr. plastyczności – ciało Zenera; gdy większe – ciało Bingham;</p>
	<p>Szwedowa</p>				<p>model czteroparametrowy stanowiący równoległe połączenie elementu złożonego z ciała sprężystego i lepkiego, elementu plastycznego i dolączonego szeregowo elementu sprężystego; gdy naprężenie wypadkowe jest mniejsze od gr. plastyczności – ciało Hooke'a; gdy większe – model podobny do modelu M/V, ale mający inną wartość stałej sprężystości;</p>

Na wytrzymałość zawiesin, a co za tym idzie również ich odkształcalność, wpływ ma szereg czynników. Parametry te kształtują przede wszystkim materiały użyte do skomponowania składu zawiesin, ich dozowanie oraz dodatki w postaci np. popiołu lotnego czy żużła wielkopiecowego. Popiół lotny pochodzący ze spalania konwencjonalnego węgla jest powszechnie stosowany jako dodatek do mieszanki betonowej, który zastępuje pewną ilość cementu w jej składzie. Popiół lotny opóźnia początek wiązania mieszanki i spowalnia przyrost wytrzymałości w początkowym okresie twardnienia w porównaniu do betonu bez popiołu, natomiast przepuszczalność hydrauliczna stwardniałego betonu z dodatkiem popiołu lotnego oraz podatność na działanie środowiska agresywnego zmniejszają się.

Dodatek żużła wielkopiecowego w mieszance betonowej powoduje zmniejszenie wydzielania ciepła hydratacji i mniejszy skurcz podczas twardnienia betonu oraz wyższą wytrzymałość mechaniczną niż betonu bez tego dodatku. Wprowadzenie żużła wielkopiecowego do składu cementu lub betonu zmniejsza przepuszczalność hydrauliczną betonu i zwiększa jego odporność na agresję chemiczną.

Wytrzymałość zawiesin jest określana w warunkach laboratoryjnych, w których nie występuje agresywne oddziaływanie środowiska. Materiał w konstrukcji znajduje się w złożonej przestrzeni oddziaływań chemicznych, biologicznych, mechanicznych i innych fizycznych (Czarnecki, Emmons, 2002). Stąd parametry mechaniczne zawiesiny wbudowanej w przesłonę przeciwfiltracyjną mogą różnić się od tych oznaczonych w laboratorium, co należy uwzględnić przy projektowaniu tego rodzaju konstrukcji.

Badanie odkształcalności przy jednoosiowym stanie naprężeń (z możliwością swobodnych odkształceń bocznych) stwardniałej zawiesiny bentonitowo-żużlowo-popiołowo-wodnej wykonano na recepturach 1–4 w trzech formach aktywacji mechanicznej (ozn. NA – z udziałem nieaktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego, PA – z udziałem aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego, PŻA – z udziałem aktywowanego mechanicznie spoiwa żużlowo-popiołowego). Odkształcenia oznaczono w edometrach w dwóch terminach: po 28 i 90 dniach twardnienia próbek do chwili obciążenia. Wykonano próbki o następujących wymiarach: średnica $d_o=4.0$ cm i wysokość $h_o=2.0$ cm. Do badania przygotowano po trzy próbki z każdej receptury, na które nałożono odpowiednio obciążenie równe 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie. Odkształcenie próbek mierzono za pomocą czujnika zegarowego. Na podstawie wyników badań wyznaczono odkształcenie początkowe ϵ_0 jako pierwszy pomiar (po 1 minucie) od chwili przyłożenia obciążenia, natomiast

odkształcenie całkowite ε_c jako maksymalne odkształcenie próbki w czasie badania. Odkształcenie pelzania ε_d wyznaczono ze wzoru:

$$\varepsilon_d = \varepsilon_c - \varepsilon_0, \quad \text{mm} \quad (5.15)$$

w którym: ε_d – odkształcenie pelzania, mm,
 ε_c – odkształcenie całkowite, mm,
 ε_0 – odkształcenie początkowe, mm.

Wyniki badań edometrycznych zawiesiny stwardniałej zawarto w Załączniku 2 w tabelach 5.4–5.33. Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono wykresy odkształcenia w funkcji czasu trwania obciążenia próbek (rys. 5.34–5.58) oraz wykresy odkształceń początkowych, pelzania i całkowitych w funkcji naprężenia (rys. 5.59–5.76).

Niepewność pomiaru odkształcenia w edometrze jest równa $\Delta\varepsilon=0.005$ mm. Niepewność względna wyznaczenia naprężenia w próbce wynosi maksymalnie 1%.

5.2. Skład fazowy i mikrostruktura

Badanie składu fazowego i mikrostruktury zaczynów cementowych i betonu można wykonać za pomocą trzech technik badawczych: analizy termicznej, rentgenografii oraz mikroskopii elektronowej.

Analiza termiczna stanowi grupę różnych metod, które umożliwiają badanie zależności właściwości fizycznych substancji od temperatury. Metody badawcze analizy termicznej rozwinęły się w dwóch kierunkach: termicznej analizy różnicowej i termogravimetrii.

Metoda termicznej analizy różnicowej DTA (*Differential Thermal Analysis*) oparta jest na pomiarze różnicy temperatur pomiędzy badaną próbką i substancją wzorcową (termicznie obojętną) podczas ich ogrzewania lub chłodzenia z określoną stałą szybkością. Pomiar różnicy temperatur pozwala wyeliminować zewnętrzne zaburzenia termiczne, dzięki symetrycznemu układowi próbki i substancji wzorcowej (Schultze, 1974). Badania metodą termicznej analizy różnicowej dotyczą zmian energetycznych występujących w próbce na skutek reakcji endotermicznych lub egzotermicznych wywołanych np. utlenianiem oraz zmian ilościowych wynikających np. z dehydratacji faz zawierających wodę, dysocjacji termicznej węglanów lub dehydroksylacji wodorotlenków wapnia. Reakcje tego rodzaju są najczęściej związane z ubytkiem masy próbki w wyniku wydzielania się wody, dwutlenku węgla czy dwutlenku siarki. Najczęściej stosowaną

substancją wzorcową jest tlenek glinu ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$), tlenek magnezu MgO i prażony kaolinit (Krzywobłocka-Laurow, Jarmontowicz, 1983).

Analiza termogravimetryczna TG (*Thermal Gravimetry*) polega na rejestracji zmian masy próbki podczas jej ogrzewania lub chłodzenia. Powstała krzywa TG obrazuje zmiany masy w miligramach w sposób ciągły w funkcji temperatury lub czasu. Jej kształt jest również uzależniony od warunków pomiaru: szybkości ogrzewania, masy i kształtu próbki czy jakości atmosfery gazowej w piecu (Krzywobłocka-Laurow, Jarmontowicz, 1983).

Aby otrzymać prawidłowe dane należy dokładnie określić i zarejestrować warunki wykonywania analizy. Należą do nich ciśnienie, skład, czystość i charakterystyka atmosfery pieca (statyczna czy dynamiczna), wielkość i rozmieszczenie termoelementów rejestrujących różnice temperatur, sposób przygotowania naważki, jej wielkość, rozmieszczenie w pojemniku i stopień ubicia, materiał zastosowany na pojemniki oraz ich geometria, przebieg zmian temperatury i czasu podczas wykonywania pomiaru, rodzaj zastosowanej substancji wzorcowej. Przy interpretacji wyników termicznej analizy różnicowej czy termogravimetrii należy wykorzystać dodatkowe dane otrzymane z innych badań, m.in. z rentgenografii czy mikroskopii elektronowej (Schultze, 1974; Krzywobłocka-Laurow, Jarmontowicz, 1983).

Rentgenowska analiza dyfrakcyjna XRD (*X-ray diffraction*) jest nowoczesną techniką umożliwiającą badania szerokiego zakresu materiałów w postaci ciał stałych i ciekłych, takich jak: metale, minerały, polimery, plastiki, ceramika, półprzewodniki, etc. W instytucjach naukowych i przemyśle, dyfrakcja rentgenowska stała się niezastąpioną metodą badania, charakteryzowania i kontroli jakości materiałów. Obszary zastosowań techniki XRD, to jakościowa i ilościowa analiza fazowa, określanie struktur, badanie tekstury i naprężeń na podstawie obrazu dyfrakcyjnego rozproszenia promieni rentgenowskich.

Jakościowa analiza rentgenofazowa polega na identyfikacji struktur krystalicznych badanego materiału, przy wykorzystaniu wartości odległości międzypłaszczyznowych i intensywności refleksów, poprzez porównanie go ze strukturami znanych już związków. Analiza jakościowa betonu powinna być wykonywana oddzielnie dla zaczynu i oddzielnie dla kruszywa w celu zwiększenia dokładności metody (Lowuszkina, 1983).

Ilościowa analiza rentgenofazowa opiera się na założeniu, że istnieje zależność funkcyjna między zawartością danego minerału w badanym materiale a intensywnością refleksów dyfrakcyjnych, które pochodzą od tej fazy. Współczesne techniki komputerowe umożliwiają wprowadzenie otrzymanych wyników bezpośrednio do komputera i porównanie z obrazem dyfraktometrycznym wzorca

zarejestrowanym w pamięci. Obecnie w badaniach klinkieru portlandzkiego wykorzystuje się również metodę Rietvelda polegającą na porównaniu dyfraktogramu uzyskanego w trakcie badań z obrazem komponowanym cyfrowo z wzorców faz występujących w danym materiale. Metoda ta pozwala określić zawartość wszystkich podstawowych krystalicznych składników mineralnych klinkieru. Badanie tą metodą dostarcza rzetelnych wyników tylko wtedy, gdy dysponuje się danymi rentgenograficznymi faz, które w rzeczywistości występują w badanym układzie (Gawlicki, Paluch, 2003).

Elektronowy mikroskop skaningowy SEM (*Scanning Electron Microscope*) jest obecnie najbardziej rozpowszechnionym typem mikroskopu elektronowego służącym do obserwacji mikrostruktury ciał stałych, w tym różnorodnych materiałów budowlanych, od materiałów pochodzenia naturalnego, poprzez spieki, substancje szkliste i hydraty do produktów korozji. Przy pomocy tego rodzaju mikroskopu można ocenić kształt i wielkość ziaren, charakter powierzchni, obecność zrostów, wtrąceń, spękań, sposób zabudowy przestrzeni, kształt porów. Wyróżnia go bardzo duża głębia ostrości, która umożliwia bezpośrednią obserwację rozwiniętych powierzchni przelomów litych próbek.

Powierzchnia próbki badanej w SEM jest penetrowana wiązką elektronów pierwotnych o małej średnicy, emitowanych przez działko elektronowe, które podlegają zderzeniom sprężystym i niesprężystym z atomami próbki poddanej badaniu. Podczas zderzeń niesprężystych z elektronami zewnętrznych powłok atomów na powierzchni próbki następuje przekazanie energii i emisja elektronów wtórnych, które są rejestrowane przez detektor umiejscowiony w komorze mikroskopu i obraz powierzchni badanej próbki jest odtwarzany.

Powiększenie w mikroskopie skaningowym określane jest poprzez stosunek wymiarów liniowych uzyskanego na monitorze obrazu do rzeczywistych wymiarów obserwowanego fragmentu próbki. Nowoczesne mikroskopy pozwalają na osiągnięcie powiększenia od 50 do 200 000 razy. Jednak w badaniach materiałów ceramicznych i pokrewnych optymalny zakres stosowanych powiększeń to 1000–20 000 razy, gdyż przy większych powiększeniach zwykle nie uzyskuje się obrazów zawierających więcej szczegółów (Nocuń-Wczelik, 2003).

SEM jest zazwyczaj zaopatrzony w mikrosondę elektronową służącą do oznaczania składu chemicznego mikroobszarów. Działanie mikrosondy polega na bombardowaniu próbki strumieniem elektronów o średnicy ok. 1 μm , w wyniku czego powstaje charakterystyczne promieniowanie rentgenowskie pierwiastków na powierzchni próbki. W spektrometrze rentgenowskim następuje analiza promieniowania, polegająca na określeniu długości fali i natężenia. Wyniki są rejestrowane przez układy elektroniczne, a na ich podstawie określa się rodzaj i

zawartość pierwiastków w badanym mikroobszarze próbki (Krzywobłocka-Laurow, Jarmontowicz, 1983).

Próbki przeznaczone do badania przy użyciu SEM nie powinny przekraczać wymiarów: średnicy $d_{max} \leq 10$ mm i grubości $h_{max} \leq 3$ mm. Przed przystąpieniem do badania próbkę należy wysuszyć w celu pozbycia się z porów wody niezwiązanej. Następnie próbkę przykleja się do podstawki, którą umieszcza się na stoliku preparatowym. W przypadku próbek przewodzących konieczne jest jedynie odtłuszczenie ich powierzchni. Natomiast powierzchnię próbek nieprzewodzących, takich jak zaczyny cementowe, zaprawy czy betony, należy pokryć cienką warstwą metalu. Zabieg ten zapobiega gromadzeniu się na powierzchni próbki nieprzewodzącej elektronów, co powoduje zakłócenia w obserwacji obrazu i może doprowadzić do zniszczenia preparatu. Rolę materiału przewodzącego pełnią metale szlachetne, głównie złoto, gdyż ono jest materiałem drobnoziarnistym przez co zapewnia dokładne odwzorowanie powierzchni preparatu oraz charakteryzuje się łatwością emisji elektronów i odpornością na działanie czynników chemicznych. Przygotowany preparat w postaci okruszków, przelomu, proszku lub zgładu umieszcza się w napyłarce próżniowej i pokrywa warstwą złota o grubości 0.01–1 nm (Nocuń-Wczelik, 2003).

5.2.1. Analiza termiczna (DTA i TG)

Badania termicznego rozkładu próbek zawiesin twardniejących bentonitowo-żużlowo-popiołowo-wodnych zostały wykonane w laboratorium badawczym Instytutu Szkła i Ceramiki w Warszawie. Badania przeprowadzono dla dwóch składów zawiesiny (2NA i 4NA) po 28 i 90 dniach twardnienia. Do badań stosowano derywatograf Netzsch 409 EP produkcji niemieckiej. Warunki analizy derywatograficznej:

- czułość DTA: 1/10,
- czułość DTG: 1/10,
- czułość TG: 100 mg,
- masa analizowanej próbki: 2NA – 168.60 mg, 4NA – 94.55 mg,
- atmosfera: powietrze,
- szybkość zmian temperatury: 10°C/min,
- zakres temperatur: 20–1000°C,
- błąd pomiaru temperatury: $\pm 1^\circ\text{C}$.

Przed przystąpieniem do badania próbki zostały wysuszone w celu usunięcia z nich wody niezwiązanej. Proces suszenia przeprowadzony został w atmosferze

powietrza w temperaturze do 40°C, aby nie dopuścić do ewentualnego rozłożenia gipsu.

Wyniki badań metodą analizy termicznej zostały zawarte w Załączniku 3 (tabele 5.34–5.41, rys. 5.80–5.85 i 5.88–5.93).

5.2.2. Rentgenowska analiza dyfrakcyjna

Pomiary metodą rentgenowskiej analizy fazowej zostały wykonane w laboratorium badawczym Instytutu Szkła i Ceramiki w Warszawie na aparacie Siemens D5000. Przed przystąpieniem do badania próbka była suszona w atmosferze powietrza w temperaturze do +40°C w celu usunięcia wody wolnej, a następnie rozdrobniona do miąższości pozwalającej na całkowite przejście próbki przez sito 0,04 mm i zwilżona alkoholem. Następnie napełniono pojemnik preparatem tak, aby jego grubość wynosiła minimum 0.5 mm.

Warunki analizy rentgenowskiej:

- promieniowanie: $\text{CuK}\alpha$,
- monochromator: grafitowy,
- napięcie lampy: 40 kV,
- natężenie lampy: 35 mA,
- przesłony: $S1 = 1.0 \text{ mm}$, $S2 = 2.0 \text{ mm}$, $S3 = 0.2 \text{ mm}$,
- krok: 0.04° ,
- czas zliczeń: 5 s,
- rotacja próbki: 15 RPM,
- zakres pomiaru: $5\text{--}60^\circ$.

Badaniom metodą dyfrakcji rentgenowskiej poddano lotny popiół fluidalny z węgla brunatnego, który wykorzystano do wykonania zawiesiny twardniejącej oraz dwie wybrane receptury zawiesiny stwardniałej: 2NA i 4NA po 28 i 90 dniach twardnienia. Wyniki badań w postaci dyfraktogramów zostały zawarte w Załączniku 3 (rys. 5.77–5.79 i 5.86–5.87).

Tabela 16. Odległości międzypłaszczyznowe podstawowych uwodnionych faz cementu i produktów ich karbonatyzacji występujących w zaczynie cementowym (Gorszkow *et al.*, 1981)

Składnik	Odległość międzypłaszczyznowa, Å
<i>1</i>	<i>2</i>
Uwodnione krzemiany wapnia (C-S-H)	3,07/2,80/1,83
Ettringit	9,73/5,61/3,88
Wodorotlenek wapnia (Ca(OH) ₂)	4,90/2,63/1,93
Węglan wapnia (CaCO ₃) – kalcyt	2,09/1,87/1,04
Uwodniony monosiarczanoglinian wapnia	8,90/7,60/3,80

5.2.3. Skaningowa mikroskopia elektronowa

Zdjęcia stwardniałej zawiesiny bentonitowo-zużłowo-popiołowo-wodnej zostały wykonane metodą SEM w Instytucie Wysokich Ciśnień PAN w Warszawie. Do badania wybrano próbki wykonane według receptury od 1 do 4 zawiesiny stwardniałej z udziałem nieaktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (ozn. NA), po 28 i 90 dniach twardnienia. Wybór wymienionych receptur zawiesiny wynika z ich właściwości, które kwalifikują je do materiałów z możliwością potencjalnego wykorzystania w przesłonach przeciwfiltracyjnych. Ograniczenie badań do zawiesiny wykonanej z udziałem nieaktywowanego mechanicznie popiołu wynika z faktu, że próbki w trzech formach aktywacji mechanicznej prezentują podobne właściwości mechaniczne i filtracyjne. Do analizy wyników badania metodą SEM wybrano pojedyncze zdjęcia zawiesiny stwardniałej dobrze obrazujące mikrostrukturę próbek oraz wyniki analizy chemicznej przeprowadzonej mikrosondą elektronową w formie wykresów. Pozostałe zdjęcia wykonane w trakcie badania zostały dołączone do pracy w formie elektronicznej.

Przed przystąpieniem do badania próbki były suszone w atmosferze helu w temperaturze do +40°C przez dobę w celu usunięcia z porów wody niezwiązanej. Niska temperatura suszenia oraz atmosfera helu zapobiegają rozłożeniu gipsu, który to proces trwale zmieniłby strukturę materiału i zafalszował wyniki badań. Przygotowane próbki zawiesiny twardniejącej zostały osadzone za pomocą odpowiedniego kleju na podstawkach, a następnie dodatkowo osuszone w atmosferze argonu i pokryte warstwą złota w napyłarce próżniowej. Badano mikrostrukturę przelomu próbek zawiesiny stwardniałej w skaningowym mikroskopie elektronowym firmy Zeiss model Leo 1530.

6. Omówienie wyników badań

Komponowanie składu zawiesin twardniejących tak, aby spełniały określone wymagania technologiczne i zapewniały stateczność wykopu, gdy są w fazie płynnej, jest ważną częścią procesu projektowania przesłon przeciwfiltracyjnych. Płynną zawiesinę powinny charakteryzować stabilność, mała podatność na sedymentację cząstek stałych lub odfiltrowanie wody z zawiesiny w wyniku wywierania na nią ciśnienia. Równie ważne są właściwości jakie prezentuje zawiesina po stwardnieniu. Przesłony przeciwfiltracyjne wykonywane z zawiesiny twardniejącej w gruncie mają przede wszystkim stanowić szczelną barierę dla przepływającej wody. Dlatego też jednym z podstawowych parametrów stwardniałej zawiesiny, którego poziom jest regulowany, jest przepuszczalność hydrauliczna. Zawiesiny powinny również prezentować odpowiedni poziom wytrzymałości na ściskanie w czasie twardnienia. Jednak warunki pracy przesłony w gruncie są złożone, więc oprócz wymienionych parametrów należy w ramach procesu projektowania sprawdzić także pozostałe właściwości zawiesin, takie jak odkształcalność.

Przeprowadzone badania doświadczalne miały na celu wyznaczenie funkcji obiektu badań w postaci wielomianu trzeciego stopnia $y=f(x_i)$ dla $i=1, 2, 3$. W celu zweryfikowania istotności wpływu poszczególnych składników wielomianu powtórzono wszystkie badania dla zarobu nr 1 ($x_1=-1, x_2=-1, x_3=1$). Następnie obliczono wariancje wartości badanych cech $S^2(z)$ oraz wariancje poszczególnych składników funkcji regresji (Polański, 1984). Kolejnym krokiem było wyznaczenie wartości statystyki testu *t-Studenta*, które porównano z wartością krytyczną, przyjętą na poziomie istotności 5%, dla stopni swobody $f=2$: $t_{(0,05;2)}=4,303$. Człony wielomianów, w przypadku których wartość statystyki dla kolejnych współczynników wielomianu była mniejsza od wartości krytycznej, zostały odrzucone. Uzyskane zależności pomiędzy badanymi właściwościami zawiesiny a jej składem (wartości zmiennych x_1, x_2, x_3 w postaci zakodowanej) oraz weryfikacja istotności wpływu poszczególnych składników wielomianu zostały przedstawione w Załączniku 4 w tabelach 6.1 i 6.2 (dla zawiesiny płynnej) i w tabelach 6.3 i 6.4 (dla zawiesiny stwardniałej). Na podstawie wyznaczonych funkcji regresji wykonano wykresy warstwicowe, które zostały zawarte w Załączniku 4 (rys. 6.1–6.6 dla zawiesiny płynnej oraz 6.7–6.16 dla zawiesiny stwardniałej).

6.1. Omówienie wyników badań zawiesiny płynnej

Gęstość objętościowa

Gęstość objętościowa zawiesiny twardniejącej w stanie płynnym jest znaczącym parametrem ze względu na stateczność wykopu wąskoprzestrzennego lub otworu w gruncie. Literatura (Rafalski, 1995) podaje, że zawiesiny twardniejące charakteryzują się gęstością objętościową w zakresie 1,12–1,59 g/cm³, który jest wystarczający do zapewnienia stateczności wykopu w przeciętnych warunkach wodno-gruntowych z uwzględnieniem mieszania się ziaren urabianego gruntu z zawiesiną podczas głębienia otworu.

Gęstość objętościowa badanej płynnej zawiesiny bentonitowo-żużlowo-popiołowo-wodnej zawiera się w zakresie 1,17–1,39 g/cm³ (Załącznik 1, tabela 4.1). Analizując funkcje regresji po weryfikacji istotności poszczególnych składników (Załącznik 4, tabela 6.2.) oraz plany warstwiczne (Załącznik 4, rys. 6.1) wykonane w oparciu o zweryfikowane funkcje można zauważyć, że bentonit sodowy jako składnik o najmniejszej gęstości właściwej nie ma wpływu na zmianę gęstości objętościowej płynnej zawiesiny lub zmiana gęstości równa jest niepewności pomiarowej tego parametru (por. próbek wykonanych według receptury 5 i 6). Nie wielkie zmiany gęstości objętościowej występują przy zmiennym dozowaniu popiołu fluidalnego z węgla brunatnego i stałej ilości żużła wielkopieczowego (próbki 1 i 2 oraz 3 i 4 różnią się gęstością w zakresie 4–7%). Jak wynika z rys. 6.1 w Załączniku 4 największy wpływ na zmianę gęstości objętościowej ma dozowanie żużła wielkopieczowego (gęstość objętościowa receptur 2 i 3 oraz 1 i 4 zmienia się w zakresie 11–13%).

Analizując otrzymane wyniki można wysunąć wniosek, że na wartość gęstości objętościowej zawiesiny największy wpływ ma dozowanie żużła, jako materiału o większej gęstości właściwej niż gęstość popiołu fluidalnego z węgla brunatnego i bentonitu sodowego. Można również zauważyć, że nie ma wyraźnych różnic między zawiesiną wykonaną z nieaktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego (ozn. NA) a zawiesiną z aktywowanym popiołem (ozn. PA) lub z aktywowaną mieszanką żużlowo-popiołową (ozn. PZA). Największa różnica w wartości gęstości objętościowej zawiesiny pomiędzy próbkami wykonanymi w trzech stanach aktywacji mechanicznej występuje w przypadku receptur 3 i 8 i wynosi maksymalnie 3%.

Odstój dobowy wody

Odstój dobowy wody zależy od koncentracji cząstek bentonitu w zawiesinie i nie powinien przekraczać 10%. Ograniczenie to wynika ze względów ekonomicznych oraz konieczności zapewnienia stateczności głębiego wykopu, ponieważ nadmierne wydzielanie wody z zawiesiny powoduje, że słup zawiesiny w wykopie ma niejednakową gęstość.

Analizując wyniki badań odstojów dobowych zawiesiny płynnej (Załącznik 1, tabela 4.2, rys. 4.3) oraz plan warstwicowy (Załącznik 4, rys. 6.2) można zauważyć, że na sedimentację cząstek stałych w zawiesinie w stanie płynnym wpływ ma dozowanie bentonitu. Wynika to z jego silnego pęcznienia w obecności wody, które powoduje, że zwiększa on swoją objętość nawet kilkanaście razy. Szczególnie jest to widoczne przy porównaniu poziomów odstojów zawiesin o recepturach 5 i 6, w których przy jednakowej ilości zastosowanego żużla wielkopieczowego i popiołu fluidalnego różnica w wartościach odstojów wynosi 3.5–6%. Wysoką różnicę w odstojach dobowych między próbkami wykonanymi według tej samej receptury, ale ze składnikami w różnych stanach aktywacji mechanicznej można zaobserwować w przypadku receptur 10 (85%) i 11 (57%). W przypadku próbki 10 większy odstój dobowy próbek wykonanych z udziałem aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego oraz spoiwa żużlowo-popiołowego wynika najprawdopodobniej z większego upakowania cząstek żużla i popiołu, które charakteryzują się nieregularnym kształtem. W odniesieniu do próbki nr 11 można to wyjaśnić w ten sposób, że ziarna aktywowanego mechanicznie spoiwa żużlowo-popiołowego mają bardziej aktywną powierzchnię wskutek działania łopatek aktywatora. Można przypuszczać, że dzięki temu zabiegowi ziarna w zawiesinie wchodzi w reakcję z wodą szybciej i na większej swojej powierzchni, niż przed aktywacją mechaniczną.

Przesącz filtracyjny

Wyniki badań ubytku masy zawiesiny w wyniku odfiltrowania wody, które pojawiają się, gdy na świeżo wykonaną zawiesinę działa ciśnienie, zostały przedstawione w Załączniku 1 tabelach 4.3, 4.4 i 4.5 oraz rys. 4.4, 4.5 i 4.6. Plan warstwicowy powstały w wyniku weryfikacji istotności wpływu poszczególnych składników wielomianu (Załącznik 4, tabela 6.2) został przedstawiony na rys. 6.3 w Załączniku 4. Wynika z niego, że na ilość odsączonej wody ma wpływ głównie dozowanie bentonitu.

Na podstawie wykresu przedstawionego na rys. 4.4 i odnoszącego się do ubytku wody z zawiesiny wykonanej z udziałem popiołu fluidalnego nieaktywowanego mechanicznie w funkcji przyrostu ciśnienia można podzielić zawiesiny na

dwie grupy: pierwsza (próbki 1-6) wykazująca się nieznacznym wzrostem ilości odsączonej wody z zawiesiny przy wzroście działającego ciśnienia (o 2.2–4.6%) oraz druga (próbki 7–11) wykazująca znacznie większe zmiany ubytku zawiesiny w wyniku odsączania wody w miarę przyrostu działającego ciśnienia (o 9.1–25.2%).

Spośród wszystkich receptur zawiesiny wykonanej z udziałem nieaktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego największą odporność na odfiltrowanie wody wykazuje receptura 4NA (skład na 1000 dm³ wody: bentonit – 60 kg, żużel – 475 kg i popiół – 175 kg), w przypadku której ubytek masy przy najniższym działającym ciśnieniu nie jest najniższy, jednak w miarę wzrostu ciśnienia zwiększa się nieznacznie (o 3.5%).

Rozpatrując wykres na rys. 4.5. oraz dane w tabeli 4.4 w Załączniku 1 ubytku masy w wyniku odsączania wody z zawiesiny wykonanej z udziałem popiołu fluidalnego aktywowanego mechanicznie można zauważyć, że wzrost ubytku masy ma we wszystkich próbkach podobny charakter. Najniższy ubytek wody w całym zakresie działającego ciśnienia ma próbka 6PA (skład na 1000 dm³ wody: bentonit – 60 kg, żużel – 335 kg i popiół – 95 kg) i wynosi on 26,5–44,9%.

Analizując wykres na rys. 4.6. Załącznik 1, dotyczącego ubytku masy zawiesiny wykonanej z udziałem spoiwa żużlowo-popiołowego aktywowanego mechanicznie można zaobserwować, że najbardziej odporną na działanie ciśnienia okazała się receptura 2PŻA (skład na 1000 dm³ wody: bentonit – 60 kg, żużel – 195 kg i popiół – 15 kg), dla której ubytek zawiesiny w całym zakresie działającego ciśnienia (0,1–0,5 MPa) jest najniższy i wynosi 38,0–49,5%.

Z porównania wyników otrzymanych z badania poszczególnych próbek wykonanych ze spoiwa w trzech stanach aktywacji mechanicznej widać, że zakres procentowego ubytku masy zawiesiny jest podobny i różni się tylko kilkoma procentami. Jedynie w przypadku próbek 2 i 6 można stwierdzić, że aktywacja mechaniczna poprawia ich odporność na odfiltrowanie wody z zawiesiny w wyniku działania ciśnienia. Zjawisko to nie znajduje potwierdzenia w zachowaniu się pozostałych próbek zawiesiny płynnej.

Lepkość umowna

Lepkość umowna próbek płynnej zawiesiny wykonanych według wybranego planu eksperymentu zawiera się w zakresie 35–47 s i mieści się w granicach wymagań, jakie powinna spełniać zawiesina płynna (30–60 s). Ograniczenia te wynikają z wymagań technologicznych stawianych zawiesinom twardniejącym, tzn. z zastosowania transportu hydraulicznego, za pomocą którego zawiesina jest przenoszona z mieszalnika do miejsca wbudowania. Z analizy otrzymanych danych (Załącznik 1, tabela 4.6, rys. 4.7) i planu warstwicowego (Załącznik 4, rys. 6.4) wynika, że na wartość lepkości świeżo wykonanej zawiesiny znacząco wpływa dozowanie bentonitu, a różnice w wartości lepkości względem próbek w różnych stanach aktywacji mechanicznej wynoszą maksymalnie 10%.

Wytrzymałość strukturalna τ_s

Wyniki otrzymane podczas badania wytrzymałości strukturalnej τ_s zawiesin płynnych w szirometrze są zawarte w Załączniku 1 (tabele 4.7, 4.8, 4.9, rys. 4.8–4.13). Z planu warstwicowego (Załącznik 4, rys. 6.5) przedstawiającego wytrzymałość strukturalną świeżo zarobionej zawiesiny pozostawionej na 1 minutę w bezruchu wynika, że na ten parametr wpływa w głównej mierze dozowanie bentonitu.

Z analizy wykresu na rys. 4.8 w Załączniku 1 obrazującego wytrzymałość strukturalną zawiesiny wykonanej z udziałem nieaktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego, po 1 minucie od pozostawienia jej w spoczynku wynika, że najdłuższy czas opadania tulejki (56 s), a więc i najwyższą wytrzymałość strukturalną wykazuje próbka wykonana według receptury 10NA (skład na 1000 dm³ wody: bentonit – 50 kg, żużel – 335 kg i popiół – 175 kg). Nieco niższy wynik – 50 s – uzyskała receptura 4NA (skład na 1000 dm³ wody: bentonit – 60 kg, żużel – 475 kg i popiół – 175 kg).

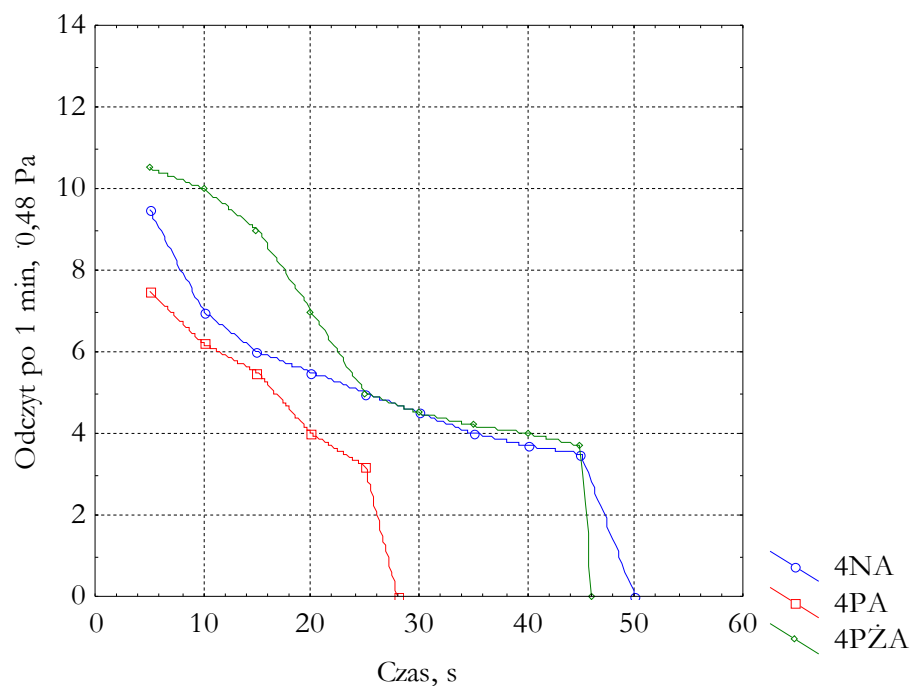
Rozpatrując wykres na rys. 4.10, dotyczący wytrzymałości strukturalnej zawiesiny wykonanej z udziałem aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego po 1 minucie od pozostawienia jej w spoczynku można zauważyć, że trzy próbki: 4PA, 10PA (skład j.w.) i 6PA (skład na 1000 dm³ wody: bentonit – 60 kg, żużel – 335 kg i popiół – 95 kg) wykazują najwyższą wytrzymałość strukturalną w porównaniu z pozostałymi recepturami (czas opadania tulejki wynosi 28 s). Zawiesina z udziałem aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego wykazuje znacznie mniejszą wytrzymałość strukturalną w porównaniu z zawiesiną wykonaną z udziałem popiołu nieaktywowanego mechanicznie.

Analizując wykres na rys. 4.12 w Załączniku 1 pokazujący wytrzymałość strukturalną zawiesiny wykonanej z aktywowanego spoiwa żużlowo-popiołowego można zauważyć, że najwyższą jej wartość – 46 s – osiąga receptura 4PŻA (skład j.w.). Natomiast próbka 10PŻA, w odniesieniu do tej samej receptury, lecz wykonanej z zawiesiny z udziałem nieaktywowanego (NA) i aktywowanego mechanicznie (PA) popiołu fluidalnego, osiągnęła znacznie niższą wartość wytrzymałości strukturalnej – 5 s.

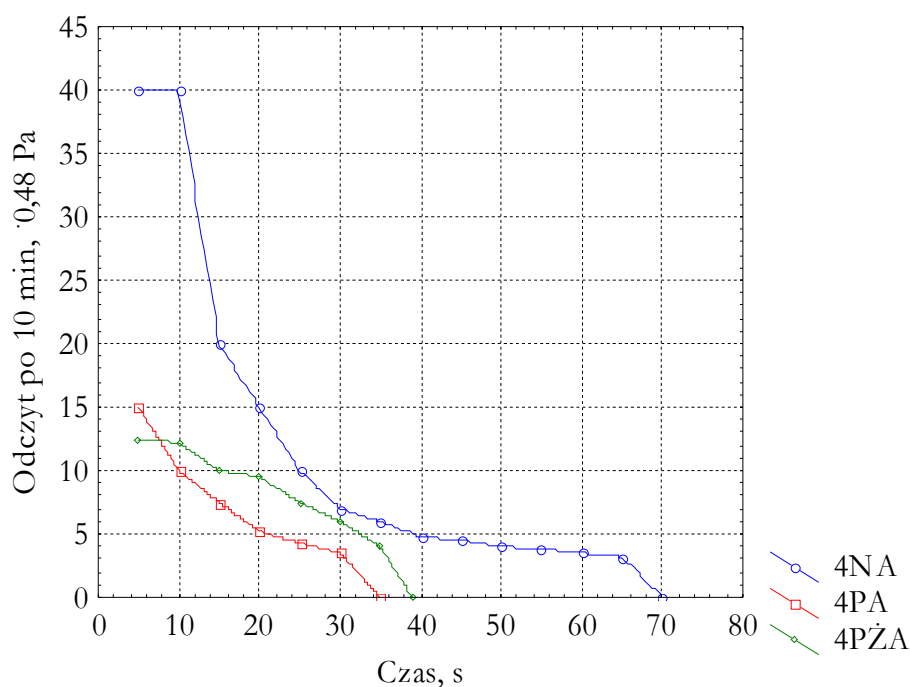
Z planów warstwicowych (Załącznik 4, rys. 6.6) obrazujących wpływ poszczególnych składników zawiesiny na wytrzymałość strukturalną po 10 min od pozostawienia jej w spoczynku wynika, że największe znaczenie ma dozowanie bentonitu, a pozostałe dwa składniki mają mniejszy wpływ. Wykres na rys. 4.9 dotyczy wytrzymałości strukturalnej zawiesiny wykonanej z udziałem nieaktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego po 10 min pozostawienia jej w bezruchu. Z wykresu wynika, że najwyższą wytrzymałość strukturalną prezentuje receptura 4NA – wynosi ona 70 s. Wytrzymałość strukturalna próbki 4NA znacznie odbiega swoją wartością od wytrzymałości pozostałych próbek.

Rozpatrując wykres na rys. 4.11 obrazujący wytrzymałość strukturalną zawiesiny wykonanej z udziałem aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego po 10 min pozostawienia jej w spoczynku można zauważyć, podobnie jak w przypadku próbki z zawiesiny z nieaktywowanym popiołem fluidalnym, że najwyższą wytrzymałość prezentuje receptura 4, jednak jest ona niższa o 35 s.

Analizując rys. 4.13 przedstawiający wykres wytrzymałości strukturalnej zawiesiny z udziałem aktywowanego spoiwa żużlowo-popiołowego po 10 min od pozostawienia jej w spoczynku można zauważyć, że tak jak w przypadku zawiesiny wykonanej z nieaktywowanym i aktywowanym mechanicznie popiołem fluidalnym, najwyższą wartość wytrzymałości strukturalnej (39 s) ma próbka 4PŻA i jest ona zbliżona do wartości osiągniętej przez recepturę 4 wykonaną z aktywowanym popiołem fluidalnym.



Rys. 11. Wytrzymałość strukturalna τ_s próbki 4 zawiesiny płynnej w trzech formach aktywacji mechanicznej po 1 minucie od pozostawienia w spoczynku; z nieaktywowanym popiołem fluidalnym z węgla brunatnego (ozn. NA), z aktywowanym popiołem fluidalnym z węgla brunatnego (ozn. PA) oraz z aktywowanym spoiwem żużlowo-popiołowym (ozn. PŻA)



Rys. 12. Wytrzymałość strukturalna τ_s próbki 4 zawiesiny płynnej w trzech formach aktywacji mechanicznej po 10 minutach od pozostawienia w spoczynku; z nieaktywowanym popiołem fluidalnym z węgla brunatnego (ozn. NA), z aktywowanym popiołem fluidalnym z węgla brunatnego (ozn. PA) oraz z aktywowanym spoiwem żużlowo-popiołowym (ozn. PŻA)

Z porównania uzyskanych wyników badania wytrzymałości strukturalnej po 1 i 10 min od pozostawienia zawiesiny w spoczynku okazuje się, że we wszystkich formach aktywacji mechanicznej spoiwa najlepsze wyniki osiągnęła zawiesina wykonana według receptury 4 (rys. 11 i 12), gdyż charakteryzuje ją największa koncentracja cząstek stałych w składzie. Oba wykresy jednoznacznie wskazują, że najwyższą wytrzymałością strukturalną cechuje się zawiesina, która zawiera nieprzetworzony mechanicznie popiół fluidalny. Z rys. 11 wynika, że podobne właściwości ma zawiesina na bazie spoiwa żużlowo-popiołowego aktywowanego mechanicznie, jednak druga część badania wskazuje, że pogarszają się one w czasie.

Krzywe płynięcia

Wyniki badań reologicznych czterech receptur (1–4) płynnej zawiesiny przedstawiono w Załączniku 1 (tabele 4.10–4.13, rys. 4.14–4.4.21). Zawiesiny twardniejące są materiałem niejednorodnym, z czego wynikły trudności w odczycie wyników z reometru. Z analizy wykresów naprężeń ścinających w funkcji gradientu prędkości ścinania (rys. 4.14, 4.16, 4.18, 4.20) wynika, że próbki 1–3 zawiesiny w stanie płynnym można sklasyfikować jako ciecze pseudoplastyczne, natomiast recepturę 4 jako ciecz dylatacyjną. Wszystkie cztery próbki nie wykazują granicy płynięcia τ_0 .

Analizując wykresy lepkości plastycznej, jaką przejawiały podczas badania poszczególne próbki płynnej zawiesiny, można zauważyć, że w przypadku próbek 1, 2 i 3 maleje ona wraz ze wzrostem czasu ścinania. Zjawisko to wynika z uporządkowania struktury przestrzennej zawiesiny. Odmienne zachowuje się receptura 4 pod wpływem działania naprężeń ścinających, w przypadku której w początkowym etapie ścinania następuje obniżenie lepkości, a następnie jej wzrost. Można przypuszczać, że jest to spowodowane dużą koncentracją cząstek żużla wielkopieczowego i popiołu fluidalnego, w wyniku czego następuje obniżenie naprężeń ścinających i wzrost lepkości zawiesiny, która jest zagęszczana ścinaniem.

6.2. Omówienie wyników badań zawiesiny stwardniałej

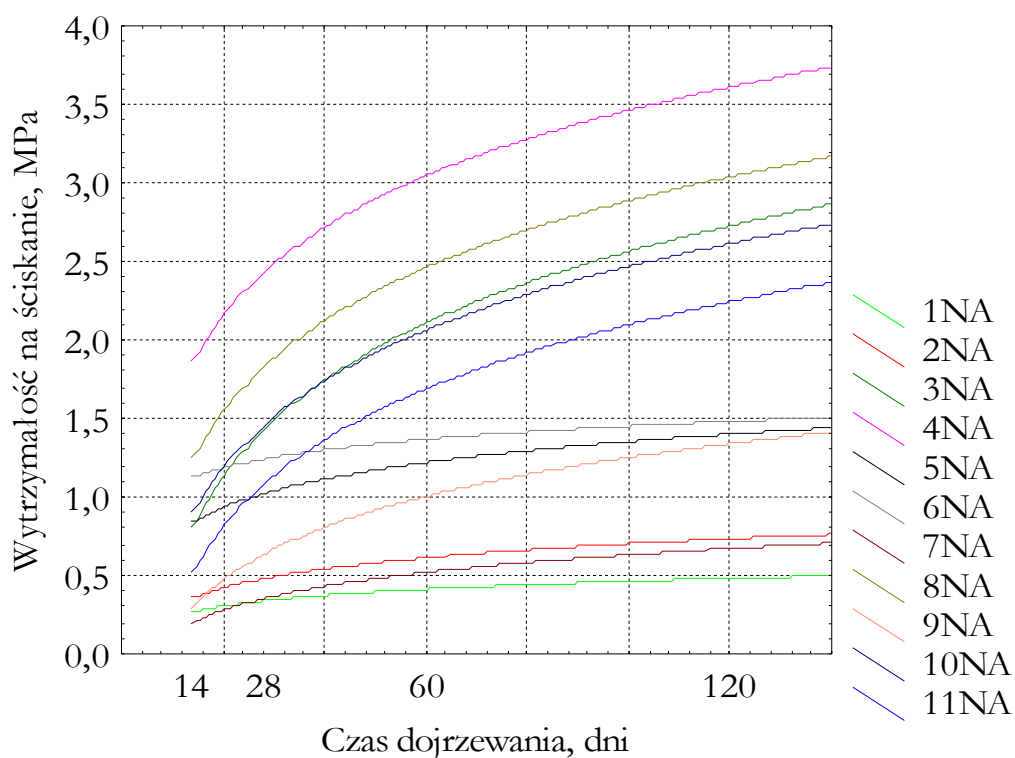
Wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie przy rozłupywaniu

Analizując plany warstwiczne dotyczące wytrzymałości na ściskanie zawiesiny stwardniałej (Załącznik 4, rys. 6.7–6.10) i biorąc pod uwagę weryfikację istotności wpływu składników wielomianu na ten parametr (Załącznik 4, tabela 6.4) można zauważyć, że na wytrzymałość zawiesiny w czasie twardnienia największy wpływ ma dozowanie żużla, co potwierdza ogólnie znane tendencje.

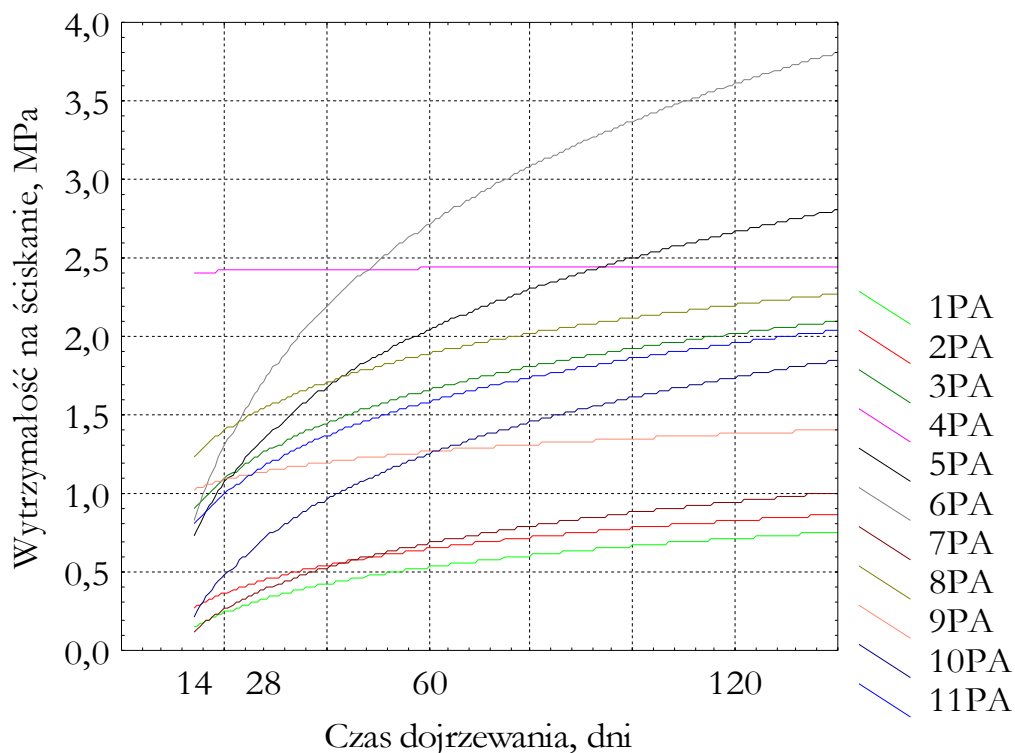
Biorąc pod uwagę oczekiwania odnośnie wytrzymałości na ściskanie w zakresie 0,5–1,0 MPa najbardziej obiecująco wypada zawiesina wykonana według receptury nr 2 (skład na 1000 dm³ wody: bentonit – 60 kg, żużel – 195 kg i popiół – 15 kg) z nieaktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (ozn. NA), której wytrzymałość po 28 dniach twardnienia wynosi 0,52 MPa. Zawiesina tej samej receptury, ale wykonana z mechanicznie przetworzonego popiołu fluidalnego (ozn. PA), ma podobny przebieg narastania wytrzymałości w czasie z tą różnicą, że wytrzymałość próbek w początkowym okresie twardnienia (po 14 dniach) jest o 38% niższa, a po 60 dniach twardnienia – o 17% wyższa w stosunku do wytrzymałości próbek 2NA. Na tym tle widać, że rozwój wytrzymałości próbek z udziałem aktywowanego spoiwa żużlowo-popiołowego (ozn. PŻA) przebiega nieco inaczej. Po okresie 28 dni twardnienia następuje znaczny przyrost wytrzymałości próbek 2PŻA, która po 60 i 120 dniach jest wyższa od wytrzymałości próbek NA o odpowiednio 21% i 19%.

Plany warstwiczne (Załącznik 4, rys. 6.11 i 6.12) dotyczące wpływu składników zawiesiny na wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu pokazują, że jedynie zawartość żużla ma znaczący wpływ na ten parametr. Wartość wytrzymałości na rozciąganie wszystkich receptur zawiesiny stwardniałej rośnie wolniej niż wytrzymałości na ściskanie. W niektórych przypadkach nie obserwuje się przyrostu wytrzymałości w czasie lub jest on niewielki, a dotyczy to głównie próbek wykonanych z mechanicznie przetworzonego spoiwa żużlowo-popiołowego.

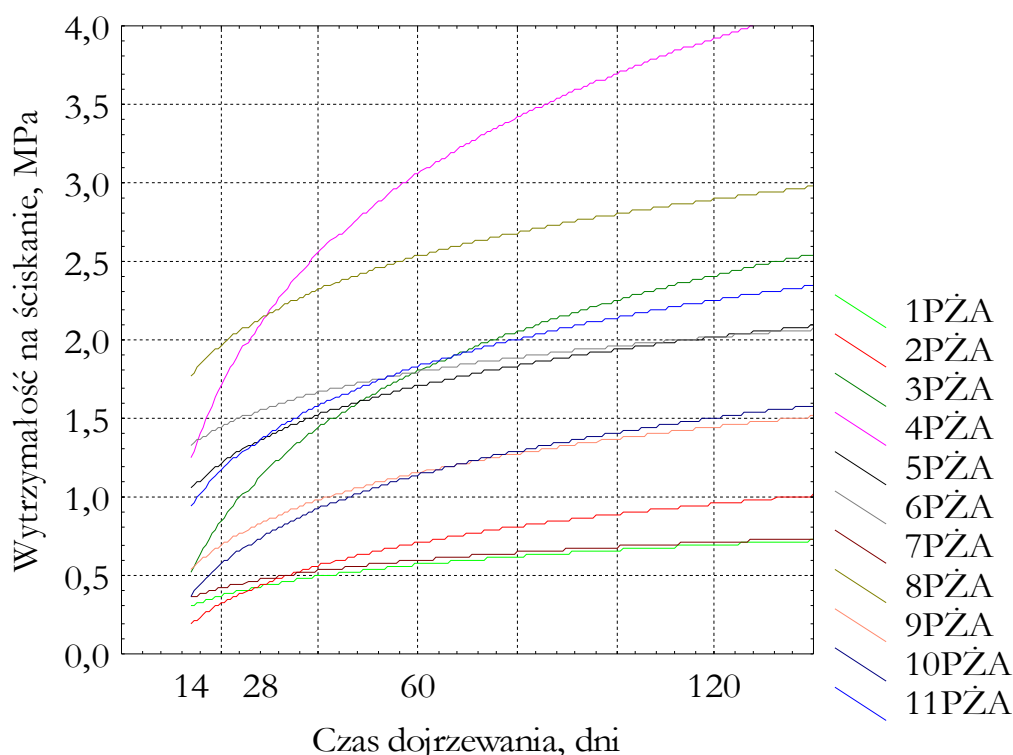
Analizując wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek 2NA (receptury potencjalnie użytecznej do wykonania ekranu przeciwfiltracyjnego) można zauważyć, że rośnie ona stopniowo w miarę twardnienia zawiesiny, zwiększając swoją wartość ponad trzykrotnie w czasie twardnienia. Natomiast wytrzymałość próbek 2PA i 2PŻA rośnie tylko dwukrotnie w całym okresie twardnienia.



Rys. 13. Wytrzymałość na ściskanie w czasie twardnienia receptur 1–11 z nieaktywowanym mechanicznie popiołem fluidalnym



Rys. 14. Wytrzymałość na ściskanie w czasie twardnienia receptur 1–11 z aktywowanym mechanicznie popiołem fluidalnym



Rys. 15. Wytrzymałość na ściskanie w czasie twardnienia receptur 1–11 z aktywowanym mechanicznie spoiwem żużlowo-popiołowym

Przepuszczalność hydrauliczna

Przepuszczalność hydrauliczną zawieszin twardniejących analizowano pod kątem wymagań, jakie są stawiane materiałom konstrukcyjnym przeznaczonym na ekrany przeciwfiltracyjne (*Rozporządzenie*, 2003), które określają maksymalną wartość współczynnika przepuszczalności hydraulicznej po 28 dniach twardnienia zawieszin rzędu 10^{-9} m/s.

Plany warstwiczne obrazujące wpływ dozowania żużla wielkopieczowego i popiołu fluidalnego na kształtowanie się przepuszczalności hydraulicznej w czasie twardnienia próbek (Załącznik 4, rys. 6.13–6.16) pozwalają stwierdzić, że w miarę zwiększania dozowania żużla następuje obniżenie wartości przepuszczalności hydraulicznej w wyniku zwiększenia szczelności struktury zawiesziny stwardniałej.

Rozpatrując pod kątem wyżej wymienionych wymagań kształtowanie się parametru przepuszczalności hydraulicznej w czasie twardnienia zawiesziny można zauważyć, że najlepsze wyniki wykazuje, podobnie jak w przypadku wytrzymałości, próbka 2NA wykonana z nieaktywowanym popiołem fluidalnym (Załącznik 2, rys. 5.24). W przypadku tej próbki nie odnotowuje się zwiększenia szczelności próbki w wyniku zastosowania procesu aktywacji mechanicznej składników spoiwa, a z upływem czasu próbki z nieaktywowanym popiołem fluidalnym i aktywowanym

spoiwem żuźlowo-popiołowym osiągają podobną wartość przepuszczalności hydraulicznej (ok. $5 \cdot 10^{-10}$ m/s).

Przepuszczalność hydrauliczna wszystkich receptur zawiesiny stwardniałej wykonanej w trzech formach aktywacji mechanicznej spoiwa obniża się w miarę upływu czasu twardnienia próbek. Aktywacja mechaniczna popiołu fluidalnego i spoiwa żuźlowo-popiołowego nie wnosi znaczących zmian w wielkości tego parametru. Zauważyć można jedynie jego obniżenie w początkowym okresie twardnienia (po 14 dniach), ale z czasem następuje jego wyrównanie w stosunku do próbek wykonanych z udziałem nieaktywowanego popiołu fluidalnego, a nawet można zauważyć, że osiągają one niższy poziom niż próbki ze spoiwem mechanicznie przetworzonym.

Odkształcalność

Odkształcalność próbek 1–4 w trzech stanach mechanicznego przetworzenia spoiwa badano po 28 i 90 dniach twardnienia zawiesiny, a wyniki zostały zawarte w Załączniku 2 (tabele 5.4–5.33, rys. 5.34–5.76). Z porównania odkształceń zawiesiny według receptury 1 w czasie w trzech formach aktywacji mechanicznej spoiwa, po 28 dniach twardnienia wynika, że najmniej podatną próbką na działanie długotrwałych naprężeń jest próbka 1PŻA, natomiast odkształcenia próbek 1NA i 1PA przebiegają podobnie z wyjątkiem próbki 1NA obciążonej 30% faktycznej wytrzymałości na ściskanie. Z porównania wykresów odkształceń początkowych (rys. 5.59, 5.65, 5.71), pełzania (rys. 5.60, 5.66, 5.72) oraz całkowitych (rys. 5.61, 5.67, 5.73) widać, że ich wartości rosną w miarę wzrostu obciążenia. Analizując wykresy odkształceń próbek 90-dniowych można w przypadku próbek 1NA i 1PA odnotować liniowy wzrost odkształceń z narastającym obciążeniem w czasie.

Rozpatrując recepturę nr 2 zawiesiny po 28 dniach twardnienia można odnotować, że próbki w trzech stanach mechanicznej aktywacji prezentują wzrost obciążeń początkowych w czasie działania naprężeń, natomiast wykresy odkształceń opóźnionych wskazują na obniżenie się ich w czasie. Z badania przeprowadzonego po 90 dniach twardnienia próbek widać, że w próbkach 2PA i 2PŻA następuje obniżenie wszystkich rodzajów odkształceń podczas działania długotrwałego obciążenia. Odkształcenia początkowe próbki 2NA również ulegają obniżeniu, natomiast odkształcenia pełzania cechuje wyraźny, a odkształcenia całkowite nieco mniejszy wzrost w czasie.

W przypadku próbki nr 3 można zaobserwować wzrost wszystkich analizowanych odkształceń po 28 dniach twardnienia w próbkach wykonanych ze spoiwa w trzech formach aktywacji mechanicznej. Takie samo zachowanie jest charaktery-

styczne dla próbek 3NA i 3PZA badanych w 90 dniu twardnienia z tym, że odkształcenia początkowe próbki 3NA nieco maleją w czasie. Natomiast próbka 3PA charakteryzuje się malejącymi odkształceniami początkowymi i końcowymi, pomimo wzrostu obciążenia wywieranego na próbkę.

Próbki receptury nr 4 we wszystkich trzech formach aktywacji mechanicznej badane po 28 dniach twardnienia przejawiają wzrost odkształceń w stosunku do działających na nie naprężeń. Wyjątkiem są odkształcenia pelzania próbki 3NA, które ulegają nieznacznemu obniżeniu. Próbki 4NA i 4PZA badane po 90 dniach twardnienia również wykazują wzrost odkształceń w czasie wraz ze wzrostem działających naprężeń, a tylko próbka 4PA przejawia niewielki spadek odkształceń początkowych i całkowitych w czasie.

Z przeprowadzonego badania odkształcalności zawiesiny stwardniałej nie można zaobserwować wyraźnego efektu, a z otrzymanych wyników nie można wywnioskować tendencji w zachowaniu się próbek pod obciążeniem długotrwałym. Przyczyną tego stanu może być niejednorodność próbek zawiesiny twardniejącej, co jest uwydatnione w rozrzutach wyników badania wytrzymałości na ściskanie (Załącznik 2, tabela 5.3). Prawdopodobne jest także to, że obciążenia, którym poddano próbki zawiesiny, były poza zakresem reakcji sprężystego zachowania materiału, który zaraz po przyłożeniu obciążenia był niszczone.

Skład fazowy i mikrostruktura

Do analizy wyników badań metodą analizy termicznej przyjęto odpowiednio przedziały temperatury, w których występują charakterystyczne ubytki masy materiałów (tabela 17).

Tabela 17. Interpretacja efektów endo- i egzotermicznych w próbkach zaczynów cementowych, cementowo-popiołowych i cementowo-popiołowo-bentonitowych według różnych badaczy (na podstawie analizy termicznej (DTA, TG i DTG))

Badany materiał	Zakres temperatur	Rodzaj efektu termicznego na krzywej DTA	Interpretacja efektów	Źródło literatury
1	2	3	4	5
Zaczyn cementowo-żuźłowy	50–300°C	endotermiczny	rozkład fazy C-S-H	Sersale <i>et al.</i> , 1980
	350–440°C	endotermiczny	rozkład fazy C-S-H	
	440–550°C	endotermiczny	rozkład Ca(OH) ₂	
	550–800°C	endotermiczny	rozkład CaCO ₃	
Zaczyn cementowo-popiołowy ¹⁾	100–300°C	endotermiczny	rozkład fazy C-S-H i ettringitu	Giergiczny, 2006
	400–500°C	endotermiczny	rozkład Ca(OH) ₂	
	700–800°C	endotermiczny	rozkład CaCO ₃	
	855–910°C	egzotermiczny	rozkład fazy C-S-H i synteza wollastonitu z produktów tego procesu	
Zaczyn cementowo-popiołowy ²⁾	100–300°C	endotermiczny	rozkład fazy C-S-H i ettringitu	Rajczyk <i>et al.</i> , 2004
	400–500°C	endotermiczny	rozkład Ca(OH) ₂	
Stwardniała zawiesina cementowo-popiołowo-bentonitowo-wodna ³⁾	100–200°C	endotermiczny	odwodnienie krzemianów i glinokrzemianów w bentonicie i zaczynie cementowym oraz dwuwodnego gipsu	Kledyński, 2000
	480–550°C	endotermiczny	rozkład Ca(OH) ₂	
	650–900°C	endotermiczny	rozkład CaCO ₃ oraz krzemianów i glinokrzemianów w bentonicie (650–750°C)	
Stwardniała zawiesina żuźłowo-popiołowo-bentonitowo-wodna ⁴⁾	100–400°C	endotermiczny	rozkład fazy C-S-H, ettringitu oraz odwodnienie krzemianów i glinokrzemianów pochodzących z bentonitu	Machowska, 2007 (badania własne)
	400–600°C	endotermiczny	rozkład Ca(OH) ₂	
	600–700°C	endotermiczny	rozkład krzemianów i glinokrzemianów w bentonicie	
	700–830°C	endotermiczny	rozkład fazy C-S-H, CaCO ₃ oraz krzemianów i glinokrzemianów w bentonicie	
	780–940°C	egzotermiczny	synteza wollastonitu	

- 1) z udziałem wapniowego popiołu lotnego
- 2) z udziałem popiołu fluidalnego z węgla kamiennego
- 3) z udziałem mieszaniny popiołowo-żuźłowej ze spalania węgla kamiennego
- 4) z udziałem popiołu fluidalnego z węgla brunatnego

Na krzywych DTA wykonanych dla próbek po 28 i 90 dniach twardnienia stwierdzono następujące maksima temperatur efektów termicznych – tabela 18.

Tabela 18. Temperatry charakterystyczne dla efektów endo- i egzotermicznych, odczytane z krzywych DTA dla próbek 2NA i 4NA po 28 i 90 dniach twardnienia

Receptura	Okres twardnienia, dni	Temperatry maksimum efektów termicznych, °C				
		3	4	5	6	7
	28	139	767	827	888	941
2NA	90	149	773	830	883	934
	28	137	747	781	828	891
4NA	90	150	771	833	882	-

Uzyskane w badaniach metodą analizy termicznej dane dotyczące maksimum efektów termicznych są charakterystyczne dla następujących zjawisk (Gorškow, Timašew, 1963):

- 140°C – efekt endotermiczny związany z rozkładem uwodnionych krzemianów i glinokrzemianów wapnia,
- 150°C – efekt endotermiczny pochodzący z rozkładu montmorillonitu wchodzącego w skład bentonitu sodowego,
- 750°C i 770°C – efekty endotermiczne związane z rozkładem pozostałej wody z fazy C-S-H i węglanu wapnia,
- 830°C – efekt endotermiczny związany z pełnym rozkładem pozostałości montmorillonitu oraz ubytkiem grupy hydroksylowej w tetraedrycznych warstwach krzemotlenowych w bentonicie,
- 880°C i 890°C – efekty egzotermiczne związane z syntezą krzemianu wapniowego (wollastonitu – CS) z produktów hydratacji fazy C-S-H oraz krzemianu magnezowego (hydromiki),
- 930°C – efekt egzotermiczny związany z przekształcaniem hydrokrzemianów wapnia pochodzących z gehlenitu oraz rekrytalizacją fazy szklistej w krystaliczną (rozkład melilitu),

- 940°C – efekt egzotermiczny związany z rozkładem melilitu związany z rekrytalizacją niezhydratyzowanego szkła oraz przekrytalizowaniem amorficznych produktów rozkładu minerałów ilastych pochodzących z popiołu fluidalnego.

W tabeli 19 przedstawiono procentowe ubytki masy zawiesin po 28 i 90 dniach twardnienia w wyodrębnionych przedziałach temperatury, charakterystyczne dla badanych zawiesin bentonitowo-żużłowo-popiołowo-wodnych.

Tabela 19. Ubytek masy (w %) próbek wykonanych według receptur 2NA i 4NA zawiesiny po 28 i 90 dniach twardnienia w przedziałach temperatury

Receptura	Okres twardnienia, dni	Całkowity ubytek masy próbki, %	Ubytek masy w określonych przedziałach temperatur, %			
			100–400 °C	400–600 °C	600–700 °C	700–940 °C
1	2	3	4	5	6	7
2NA	28	19,0	10,6	3,4	2,0	1,5
	90	20,3	11,0	4,0	1,9	2,4
4NA	28	13,7	7,4	2,0	1,8	1,1
	90	14,9	9,9	2,1	2,2	1,7

Porównując wyniki badania metodą termogravimetrii można zauważyć nieznaczny przyrost ubytku masy próbek pomiędzy 28 a 90 dniem twardnienia – o 1,3% dla próbki 2NA i o 1,2% dla próbki 4NA. Przyrost ubytku masy próbek 90 dniowych względem 28 dniowych następuje w przedziale charakterystycznym dla rozkładu fazy C-S-H w stwardniałej zawieszynie, co świadczy o zwiększeniu stopnia hydratacji zawiesziny w czasie twardnienia.

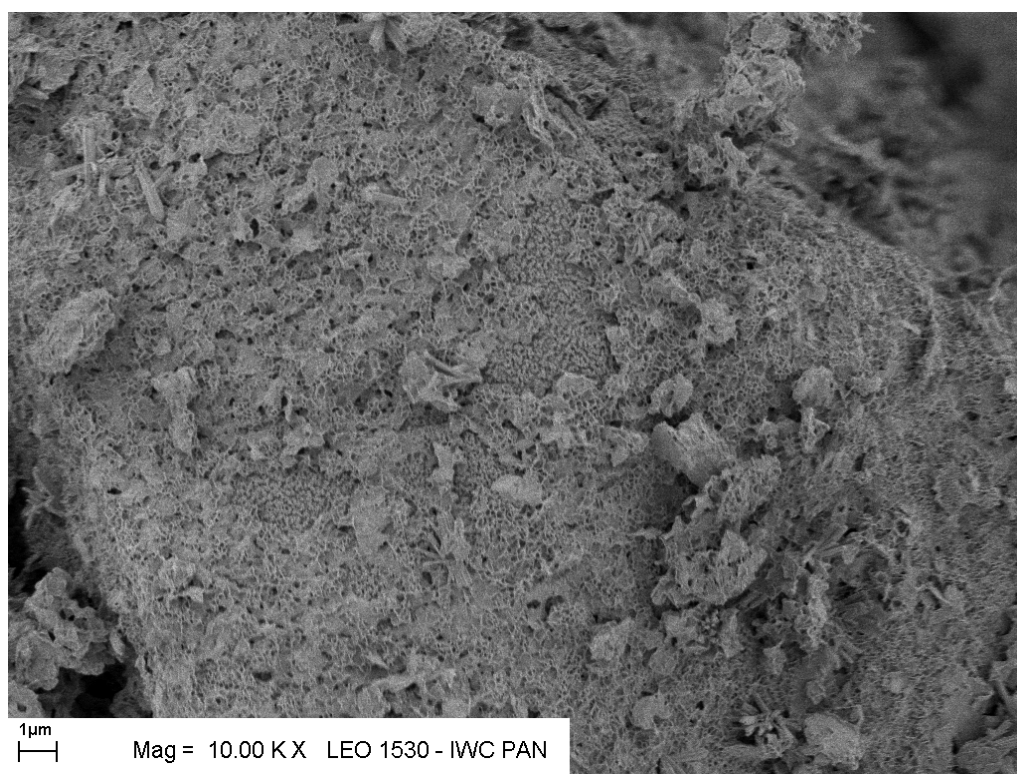
Na dyfraktogramach popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (Załącznik 3, rys. 5.77) widoczne są podstawowe składniki popiołu wapniowego, takie jak kwarc ($d=4.24, 3.34, 1.81$), anhydryt ($d=3.49, 2.85, 2.32$), kalcyt ($d=3.03, 2.09, 1.91$), hematyt ($d=2.69, 2.51, 1.84$) oraz wolne CaO ($d=2.76, 2.39, 1.69$). Zawartość w popiele fluidalnym anhydrytu, kalcytu oraz nie związanego tlenku wapniowego wpływa korzystnie na jego właściwości wiążące.

Badania rentgenograficzne próbki 2NA zawiesziny twardniejącej po 28 i 90 dniach twardnienia (Załącznik 3, rys. 5.78 i 5.86) wykazały obecność fazy C-S-H ($d=3.07, 2.80, 1.83$), ettringitu ($d=9.73, 5.61, 3.88$), kalcytu ($d=2.09, 1.87, 1.04$) oraz hematytu ($d=2.69, 2.51, 1.84$).

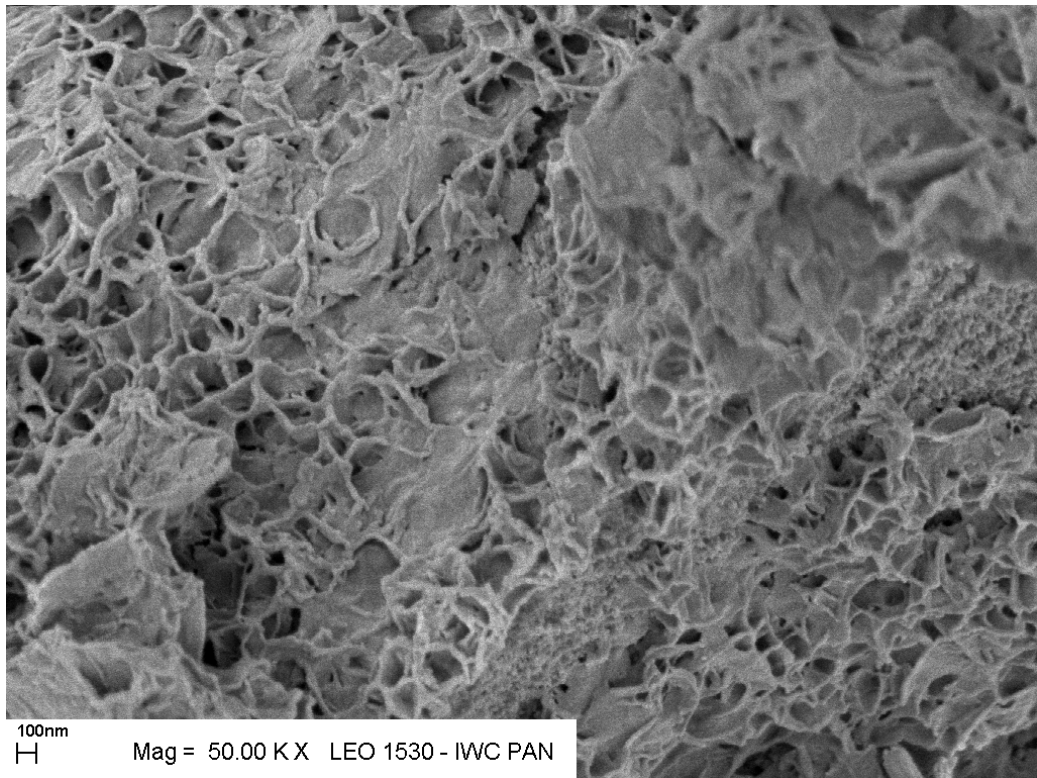
Badania rentgenograficzne próbki 4NA po 28 i 90 dniach twardnienia zawiesziny (Załącznik 3, rys. 5.79 i 5.87) wykazały również obecność fazy C-S-H, ettringitu, kalcytu oraz hematytu.

Na załączonych zdjęciach (fot. 6–9) przedstawiono mikrostrukturę stwardniałych zawiesin wykonanych według receptur 1–4 z udziałem nieaktywowanego popiołu fluidalnego z węgla brunatnego.

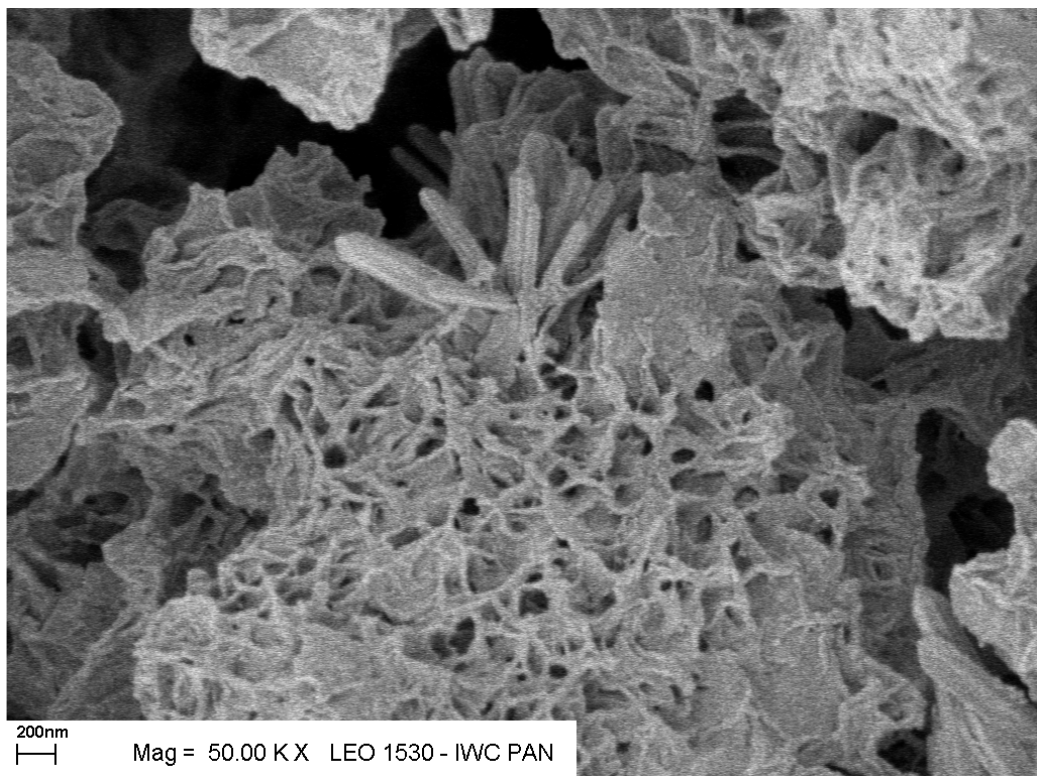
W próbce 1NA (fot. 6) zawiesiny stwardniałej wyróżniono nieprzereagowane ziarna żużla pokryte cienką warstwą masy wypełniającej złożonej głównie z uwodnionych krzemianów wapnia typu C-S-H, w formie najczęściej „zmiętych folii” (fot. 6b) oraz pojedyncze skupiska większych utworów rurkowatych, przypisywanych ettringitowi (fot. 6a, 6c).



a) próbka 1NA, powiększenie 10 000x, faza C-S-H i skupiska ettringitu



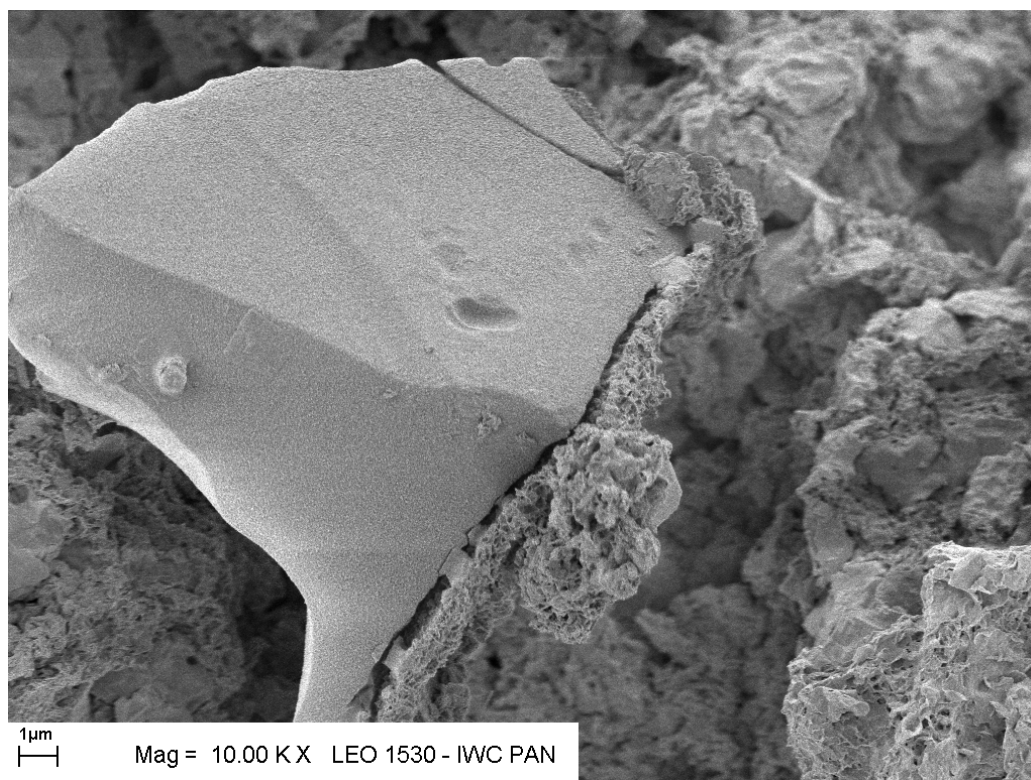
b) próbka 1NA, powiększenie 50 000x, faza C-S-H



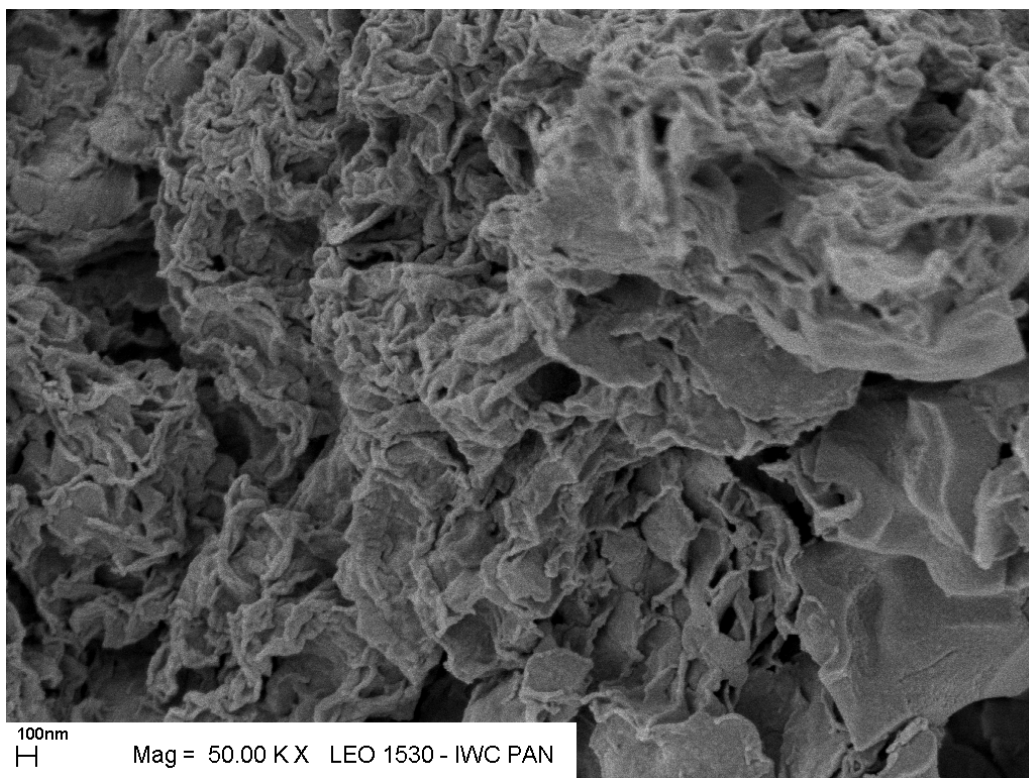
c) próbka 1NA, powiększenie 50 000x, faza C-S-H z promieniście ułożonymi rurkami ettringitu

Fot. 6. Mikrostruktura próbki 1NA zawiesziny po 28 dniach twardnienia;
 a) ziarno żużla pokryte fazą C-S-H, b) faza C-S-H, c) kryształy ettringitu w fazie C-S-H

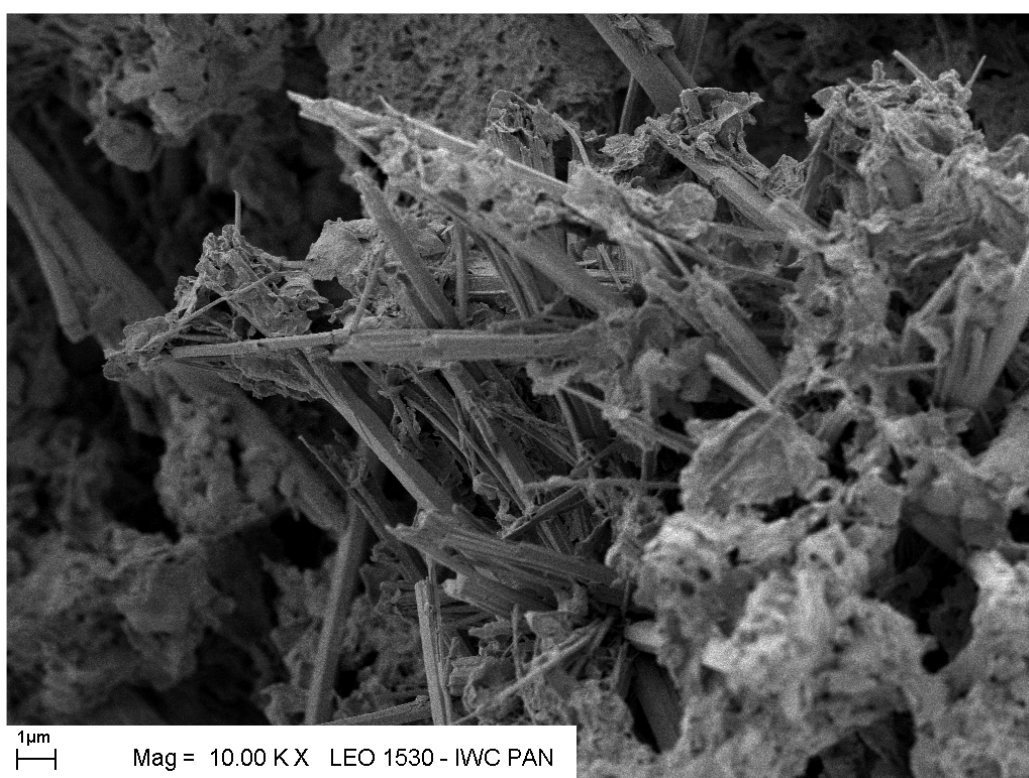
W próbce 2NA zawiesiny stwardniałej (fot. 7) wyróżniono nieprzereagowane ziarna żużla o czystej, nienaruszonej powierzchni, otoczone masą wypełniającą (fot. 7a), złożoną z uwodnionych krzemianów wapnia typu C-S-H, różniących się morfologią od występujących w próbce 1NA. Ponadto widoczne są skupiska wydłużonych rurek o postrzępionych końcach wyrastających promieniście z fazy C-S-H (fot. 7c), przypisywanych ettringitowi. Masa wypełniająca ma postać podobną do „zmiętych folii” (fot. 7b), ale mniej porowatą niż w próbce 1NA.



a) próbka 2NA, powiększenie 10 000x, nieprzereagowane ziarno żużla w fazie C-S-H



b) próbka 2NA, powiększenie 50 000x, faza C-S-H w postaci „zmiętych folii”

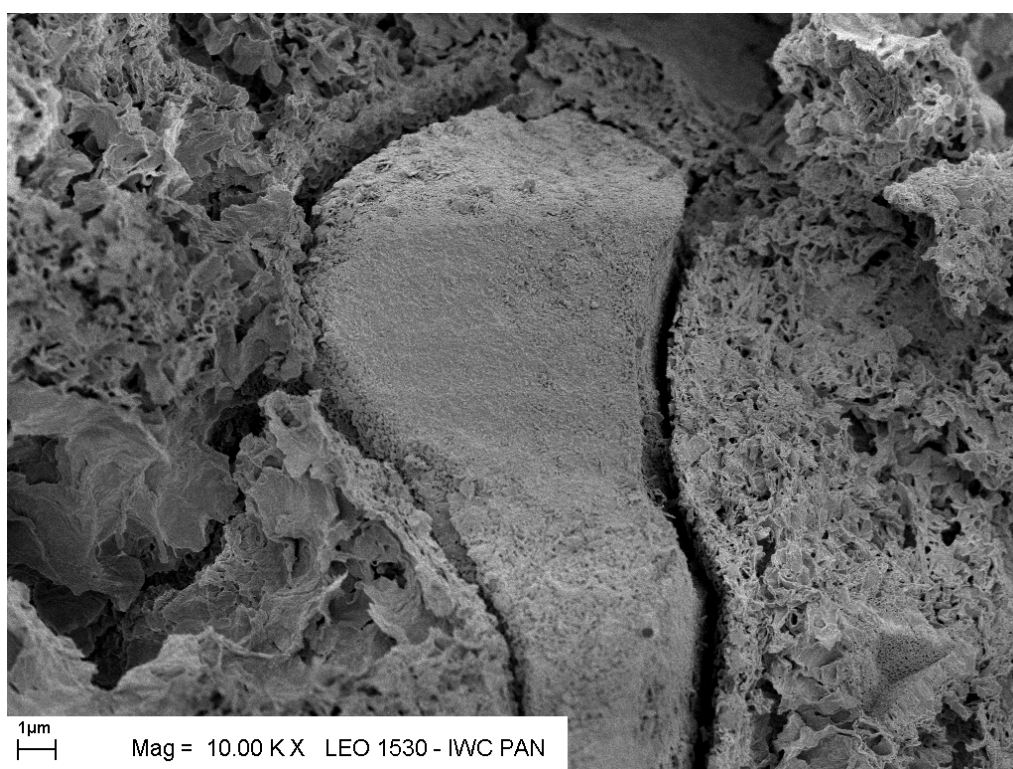


c) próbka 2NA, powiększenie 10 000x, kryształy ettringitu

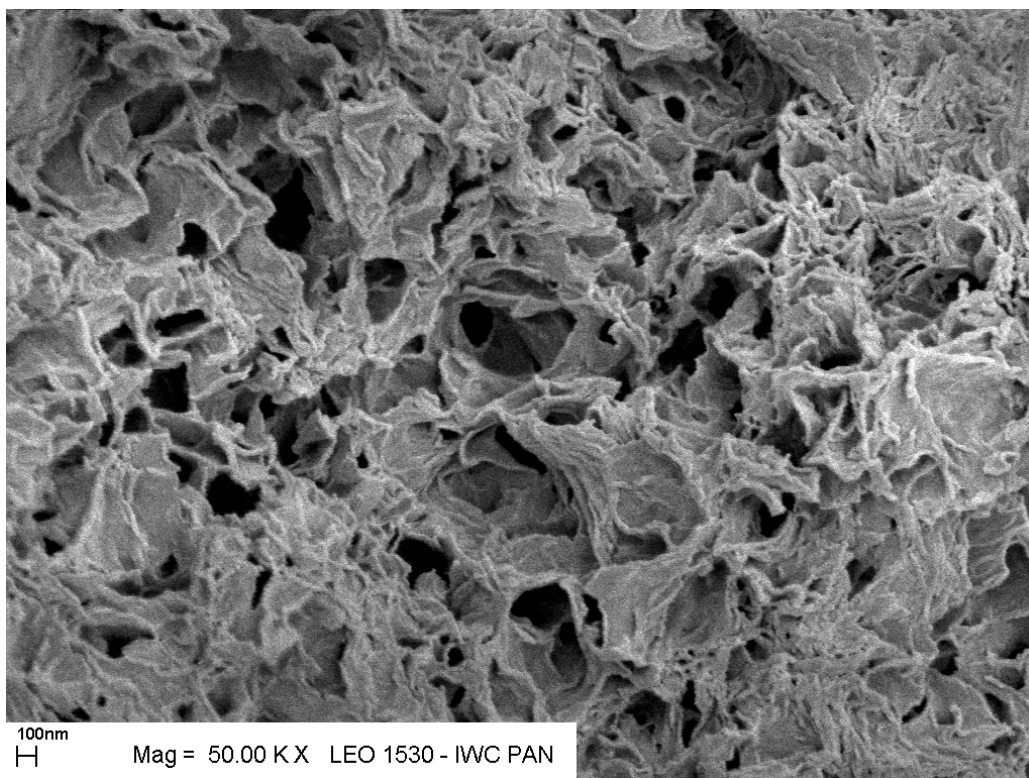
Fot. 7. Mikrostruktura próbki 2NA zawiesiny po 28 dniach twardnienia;
a) ziarno żużla, b) faza C-S-H typ II, c) kryształy ettringitu

W próbce 3NA zawiesiny stwardniałej (fot. 8) wyróżniono nieprzereagowane ziarna żużla w masie wypełniającej (fot. 8a), podobnie jak w przypadku próbki 2NA. Ziarno żużla pokryte jest warstwą masy wypełniającej – fazy C-S-H (fot. 8a).

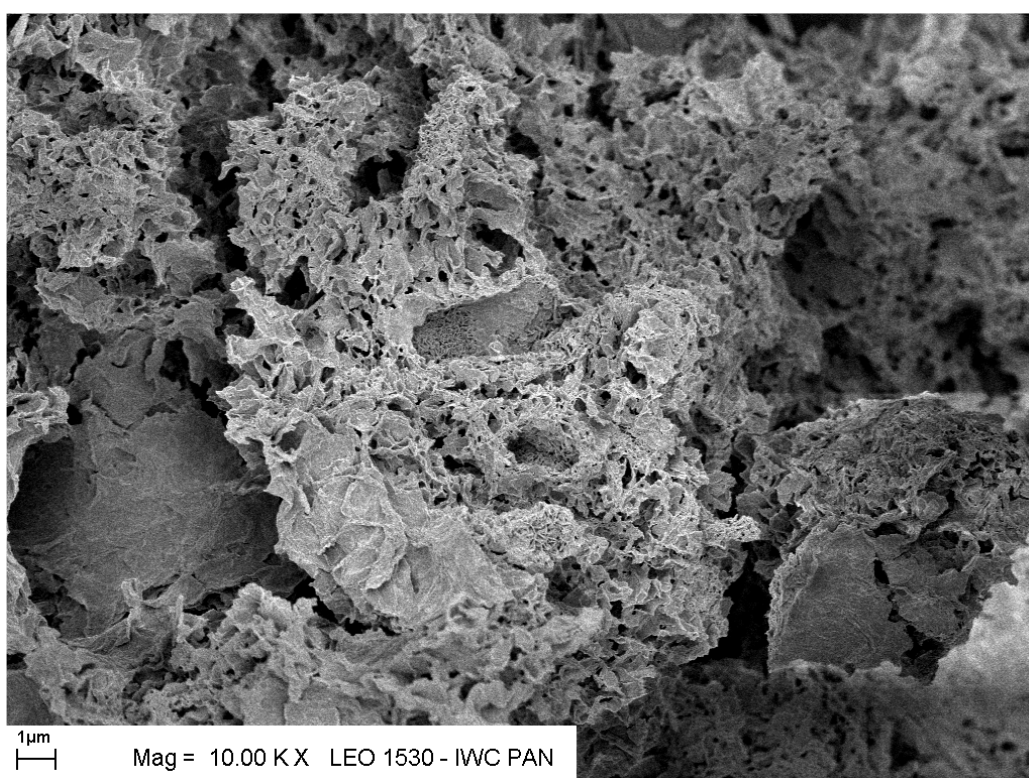
W masie wypełniającej wyróżniono mieszaninę uwodnionych krzemianów wapnia typu C-S-H (fot. 8b) podobną zarówno do fazy C-S-H występującej w próbce 1NA jak i 2NA. W próbce 3NA nie stwierdzono obecności żadnych utworów w postaci promieniście ułożonych względem siebie rurek, ani im podobnych. Znamienne są mikrospekkania powstałe prawdopodobnie w wyniku skurczu próbki.



a) próbka 3NA, powiększenie 10 000x, ziarno żużla w fazie C-S-H



b) próbka 3NA, powiększenie 50 000x, faza C-S-H

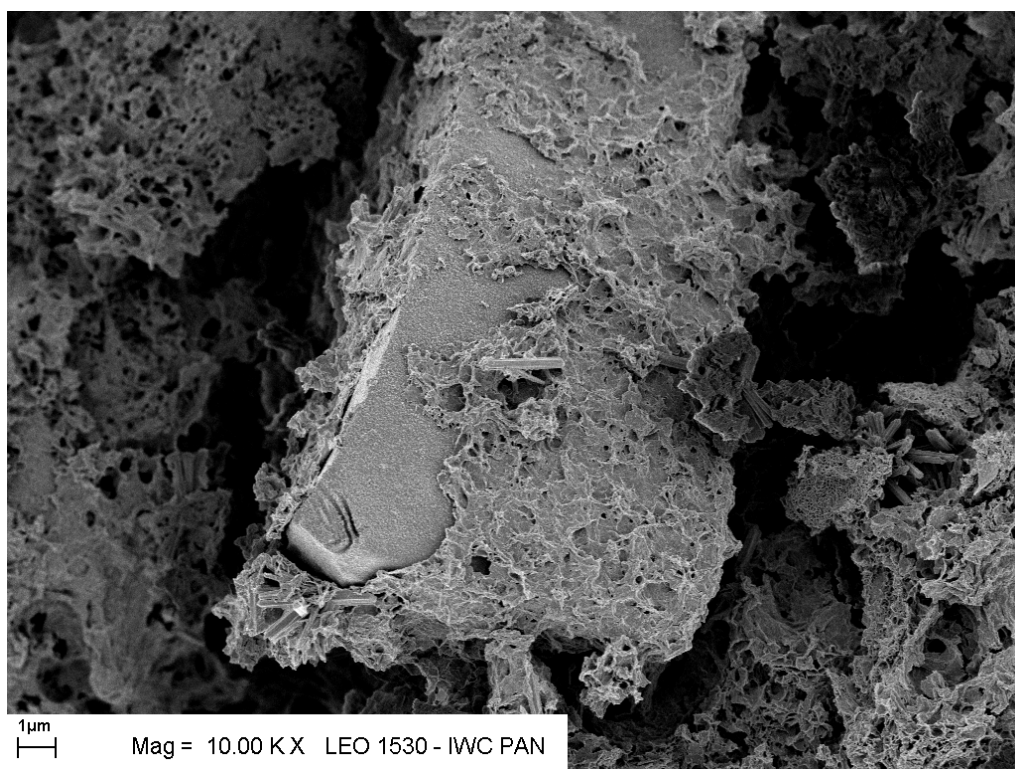


c) próbka 3NA, powiększenie 50 000x, pory występujące w fazie C-S-H

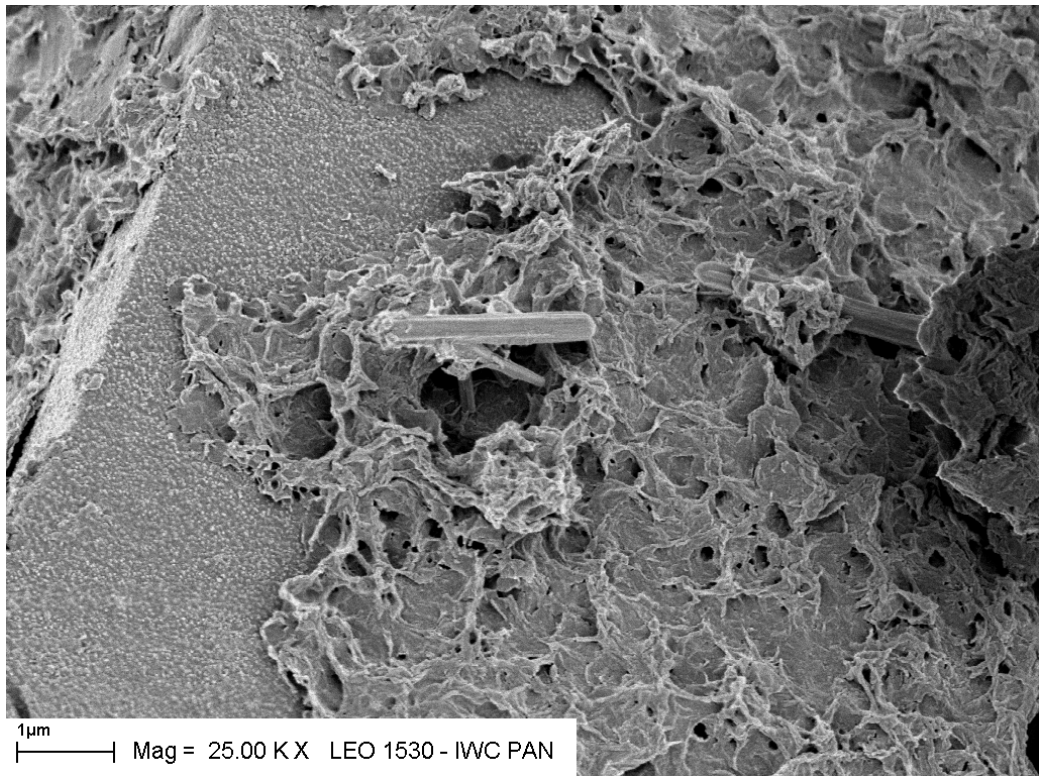
Fot. 8. Mikrostruktura próbki 3NA zawiesiny po 28 dniach twardnienia;
 a) ziarno żużla, b) faza C-S-H, c) pory w mikrostrukturze

W próbce 4NA (fot. 9) wyróżniono nieprzereagowane ziarna żużla otoczone masą wypełniającą w postaci uwodnionych krzemianów wapnia typu C-S-H oraz widoczne pory (fot. 9a). W fazie C-S-H zaobserwowano rozmieszczone pojedyncze

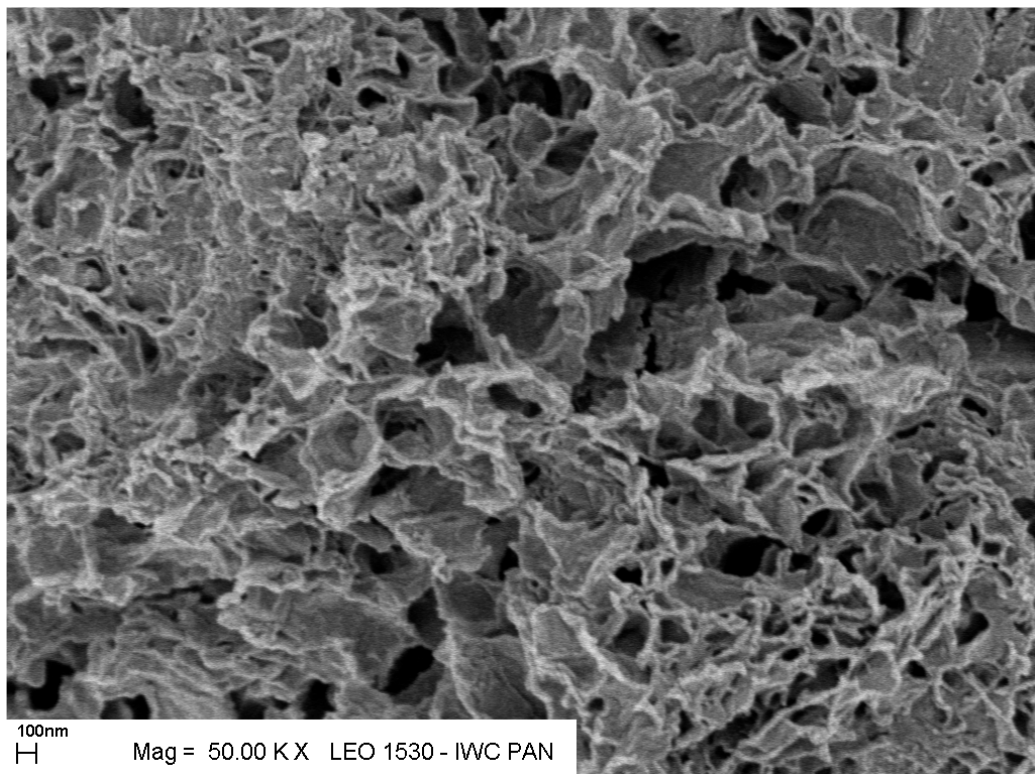
rurki (fot. 9a, 9b). Masa wypełniająca ma strukturę tzw. „zmiętych folii” , morfologicznie najbardziej zbliżoną do próbki 2NA (fot. 9c).



a) próbka 4NA powiększenie 10 000x, ziarno żużla pokryte masą wypełniającą



b) próbka 4NA, powiększenie 25 000x, powierzchnia ziarna pokryta fazą C-S-H z widocznymi pojedynczymi kryształami ettringitu

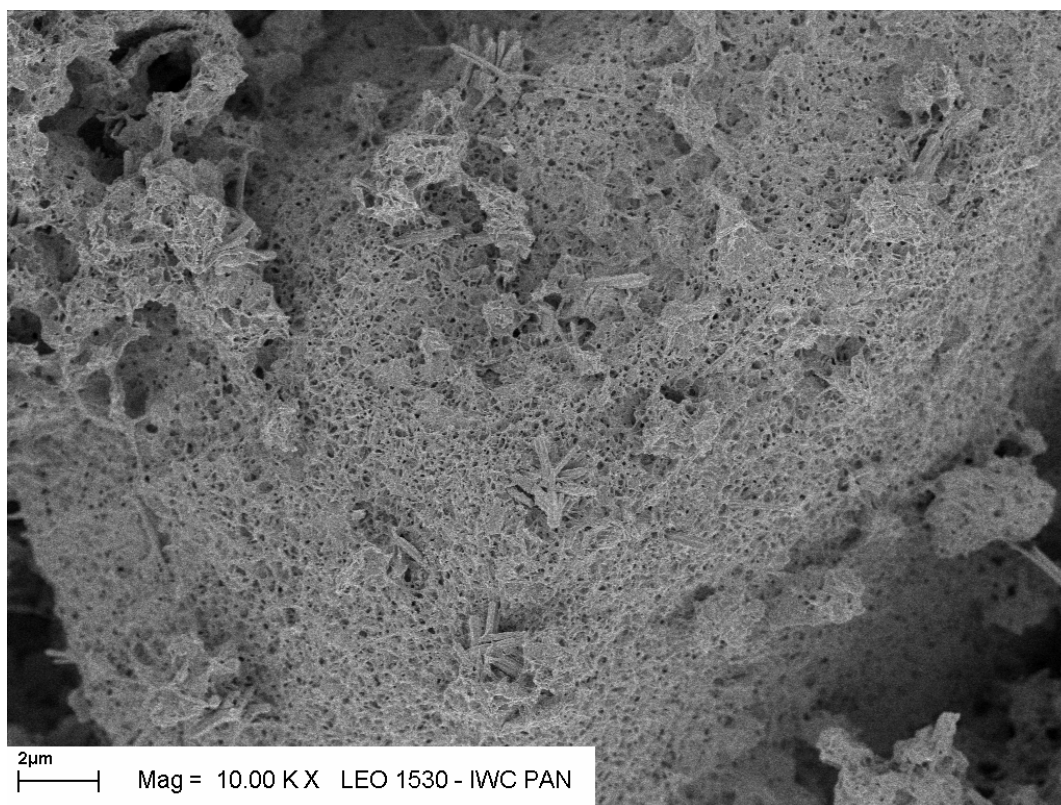


c) próbka 4NA, powiększenie 50 000x, faza C-S-H

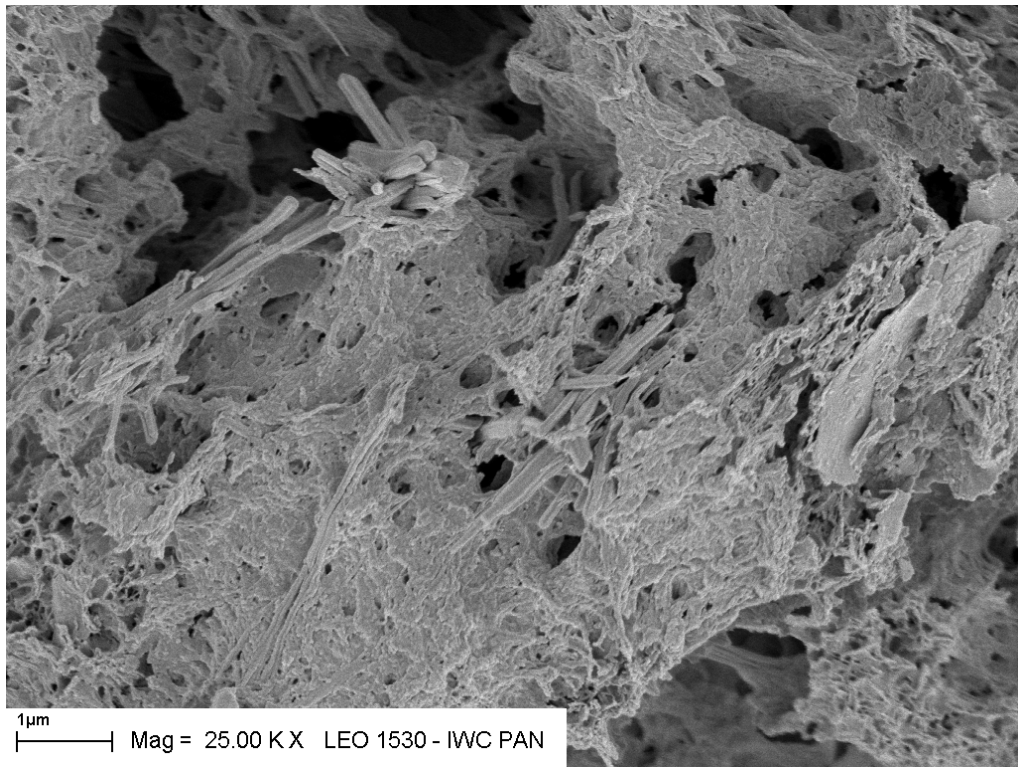
Fot. 9. Mikrostruktura próbki 4NA zawiesiny po 28 dniach twardnienia; a) ziarno żużla, b) kryształy ettringitu wykształcone w masie fazy C-S-H na ziarnie żużla, c) faza C-S-H

Na załączonych fotografiach (fot. 10–13) przedstawiono SEM próbek 1–4 z udziałem nieaktywowanego popiołu fluidalnego z węgla brunatnego wykonane po 90 dniach twardnienia.

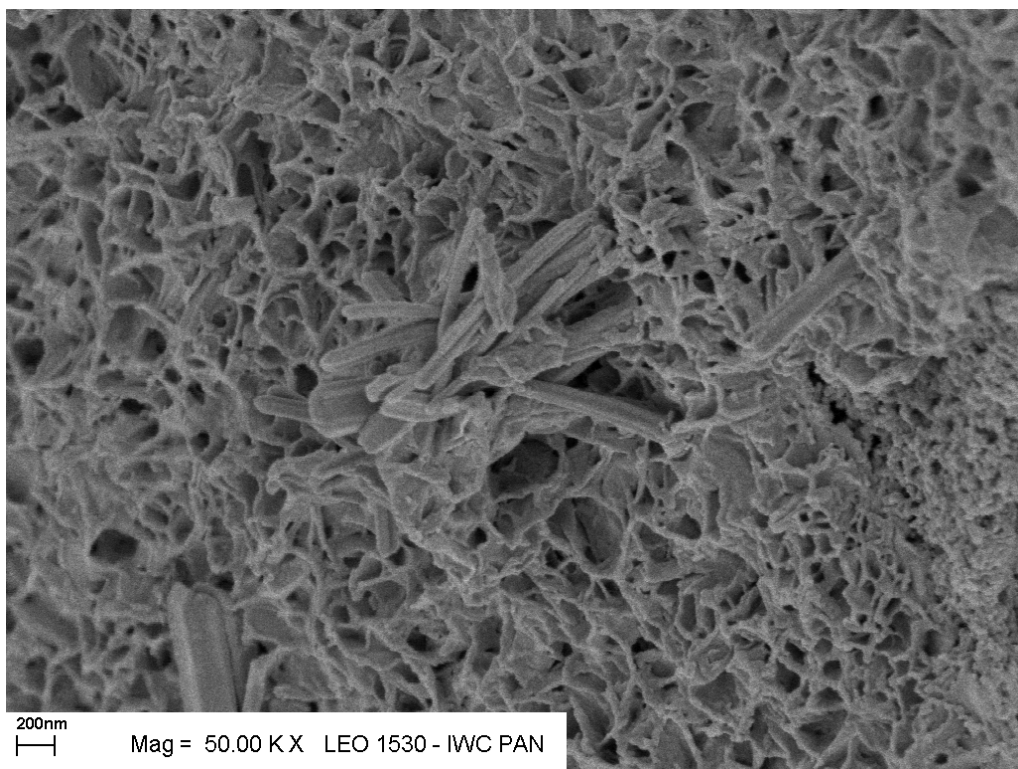
W próbce 1NA zawiesziny po 90 dniach twardnienia (fot. 10) wyróżniono, podobnie jak w przypadku próbki po 28 dniach twardnienia, ziarna żużla pokryte cienką warstwą masy wypełniającej w formie uwodnionych krzemianów wapnia typu C-S-H (fot. 10a), w której znajdują się skupiska kryształów w postaci igieł charakterystycznych dla ettringitu (fot. 10a-c). W masie wypełniającej występują liczne pory (fot. 10b) oraz duże ilości kryształów ettringitu w formie rurek ułożonych promieniście względem siebie (fot. 10b, c).



- a) próbka 1NA, powiększenie 10 000x, powierzchnia ziarna żużla pokryta fazą C-S-H z widocznymi skupiskami ettringitu

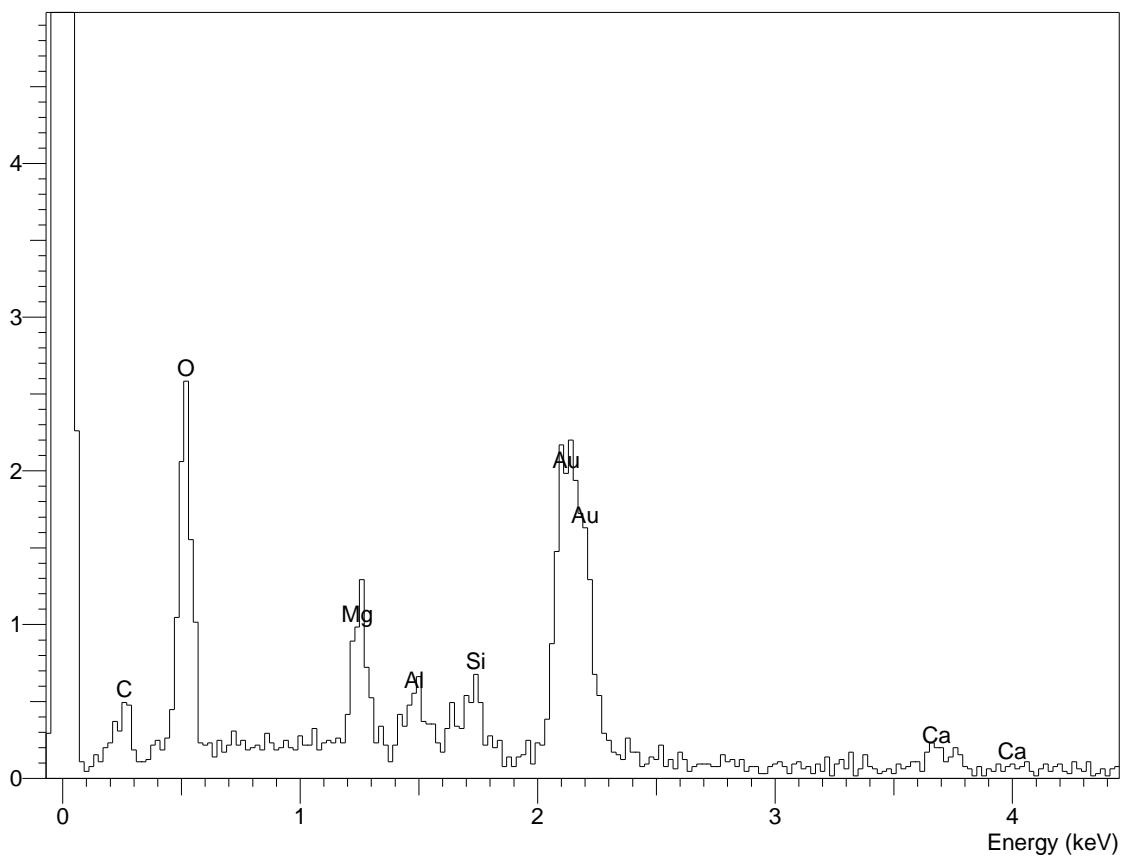
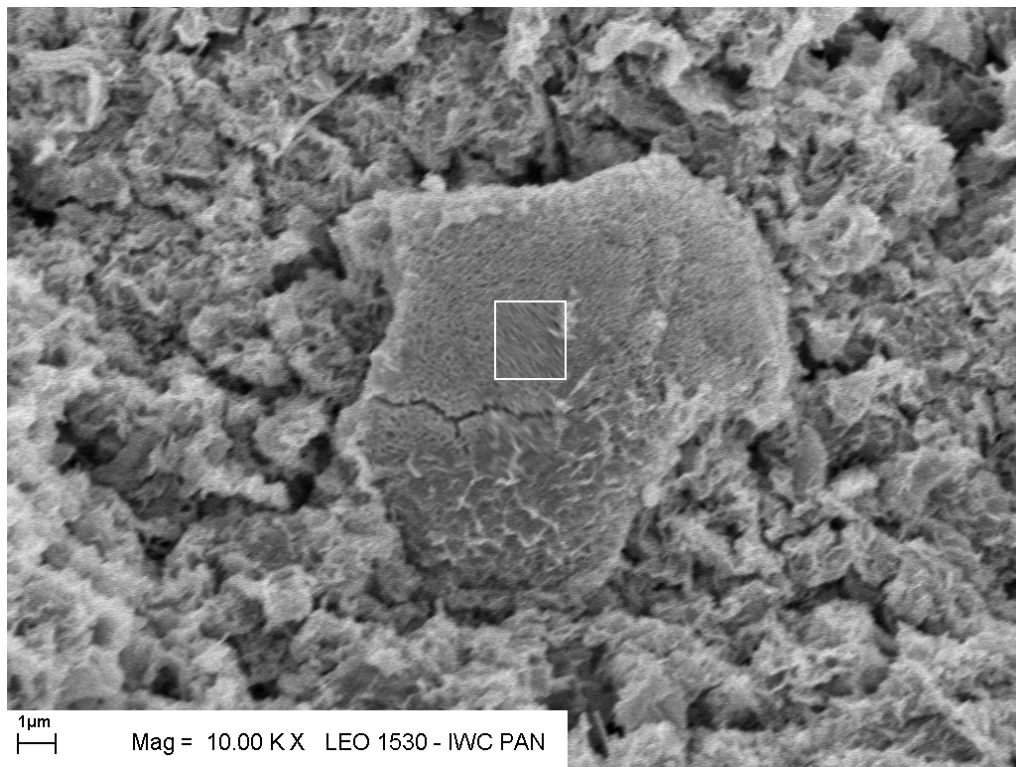


b) próbka 1NA, powiększenie 25 000x, faza C-S-H z widocznymi skupiskami ettringitu

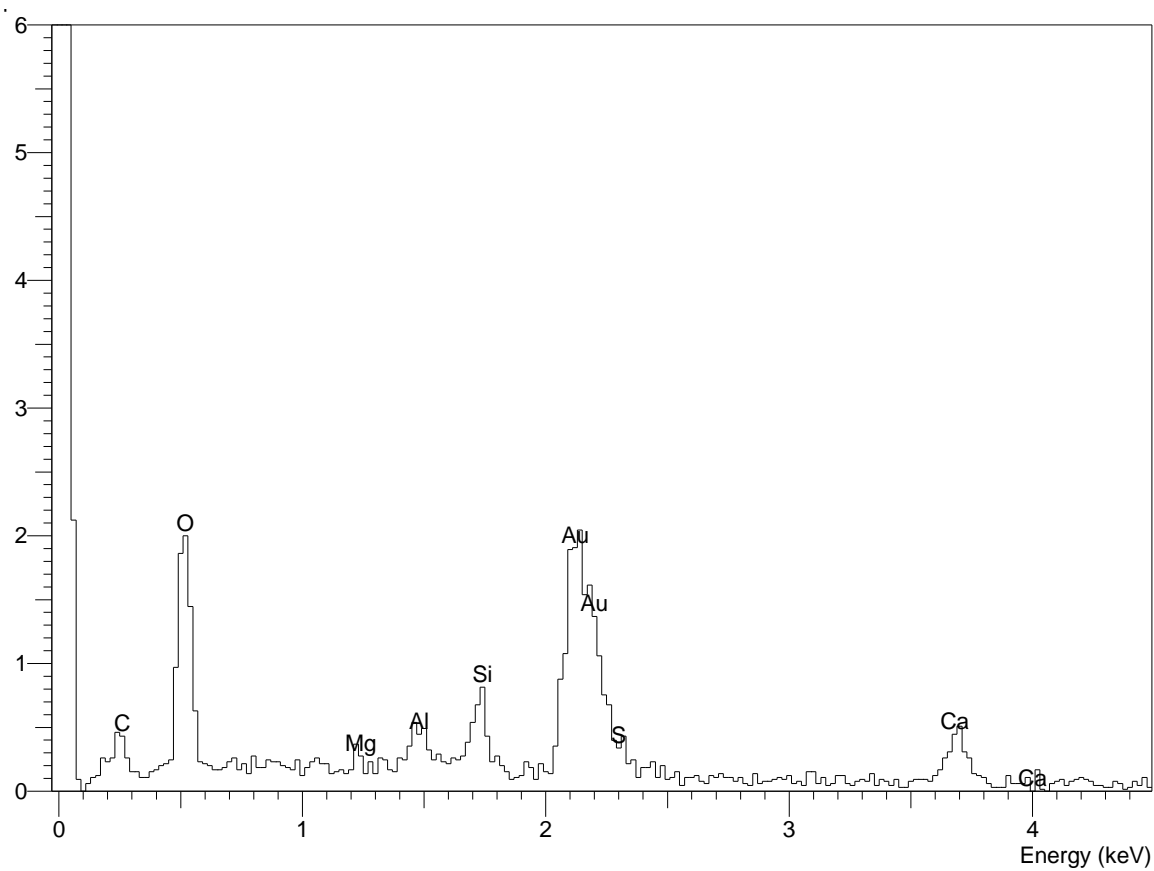
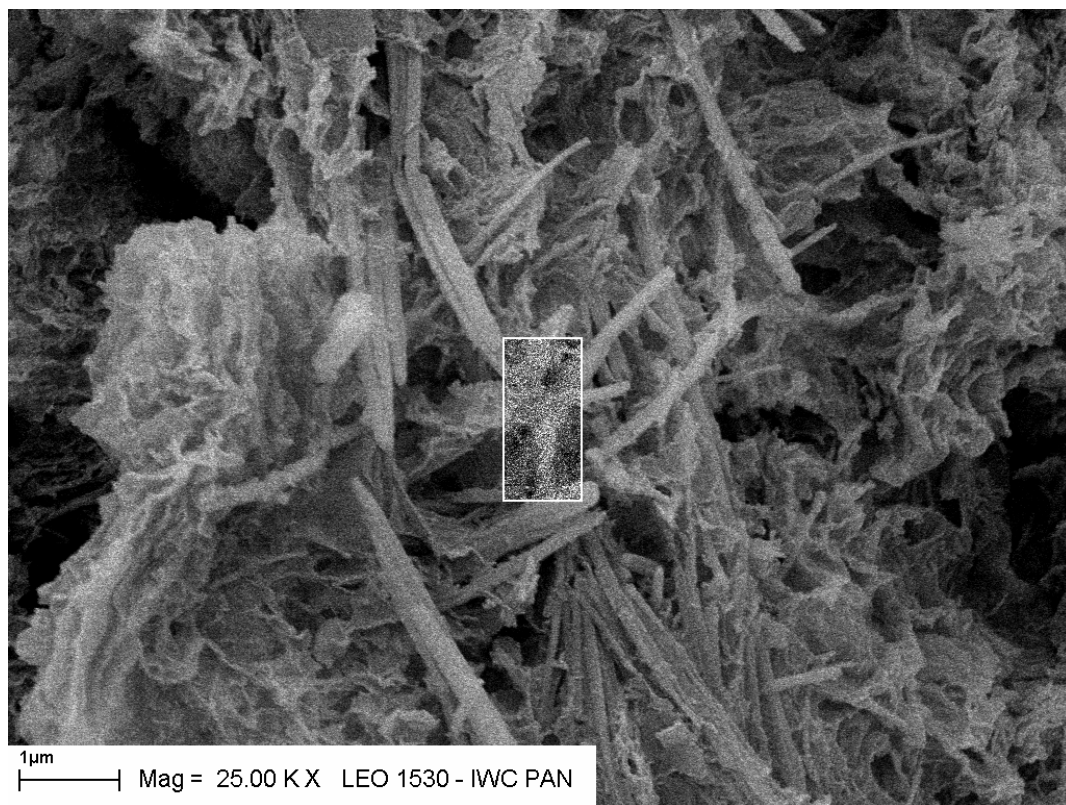


c) próbka 1NA, powiększenie 50 000x, kryształy ettringitu w fazie C-S-H

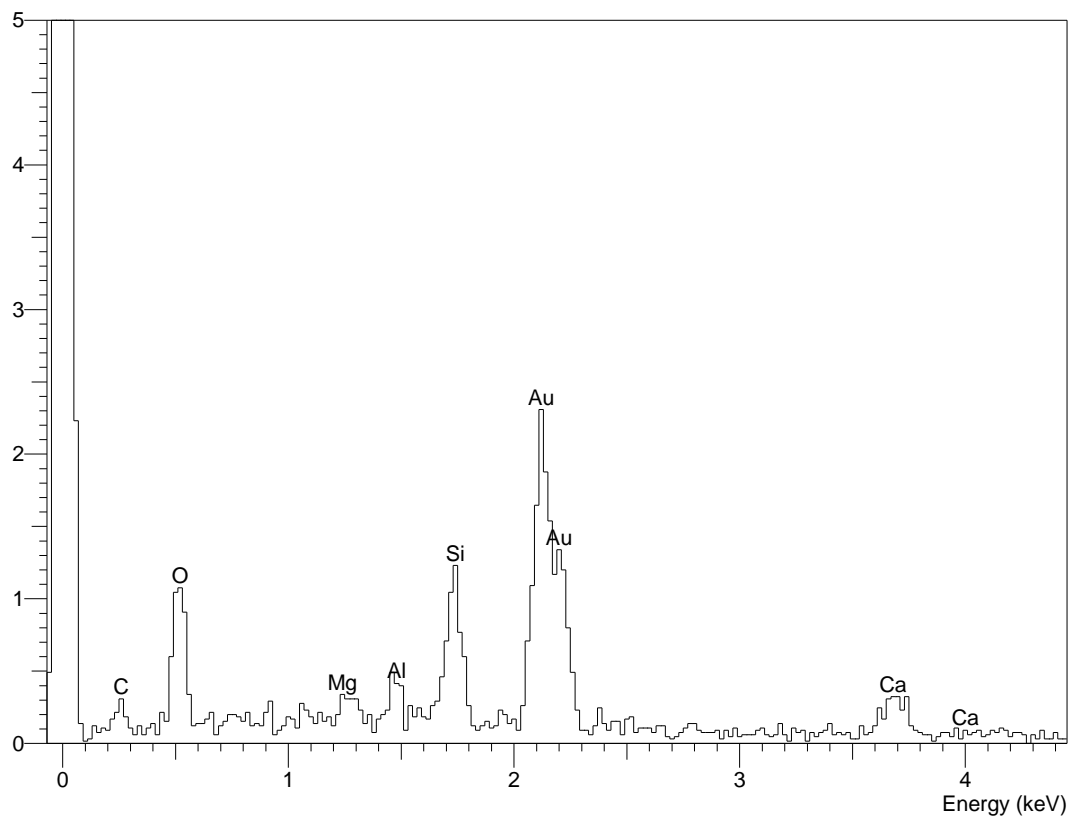
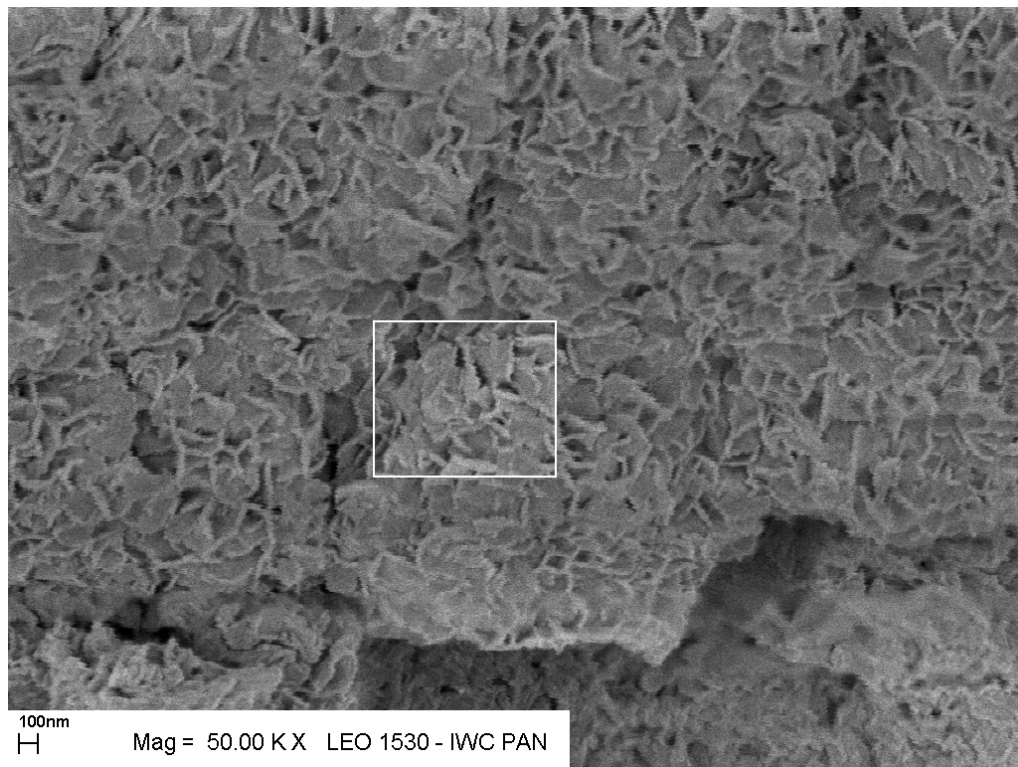
Fot. 10. Mikrostruktura próbki 1NA zawiesiny po 90 dniach twardnienia; a) ziarno żużla pokryte warstwą fazy C-S-H, b) i c) kryształy ettringitu wykształcone w masie fazy C-S-H



a) próbka 2NA, powiększenie 10 000x (ziarno żużla), analiza SEM-EDS



b) próbka 2NA, powiększenie 25 000x (kryształy ettringitu), analiza SEM-EDS

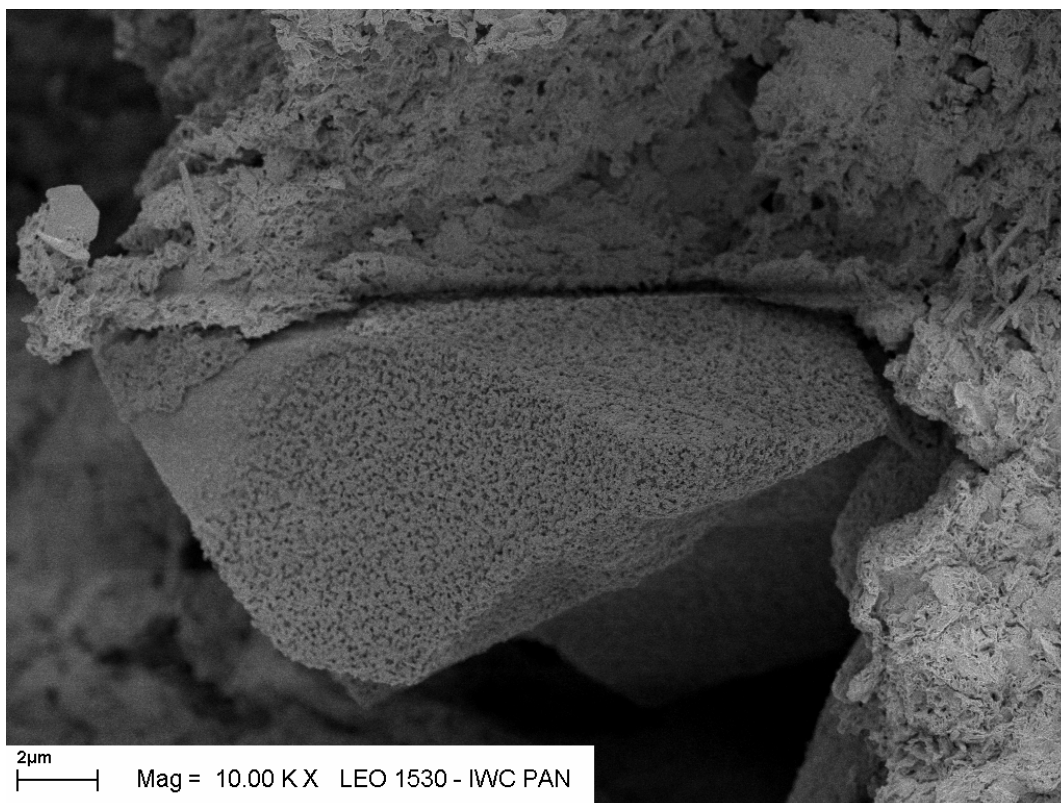


c) próbka 2NA, powiększenie 50 000x, analiza SEM-EDS

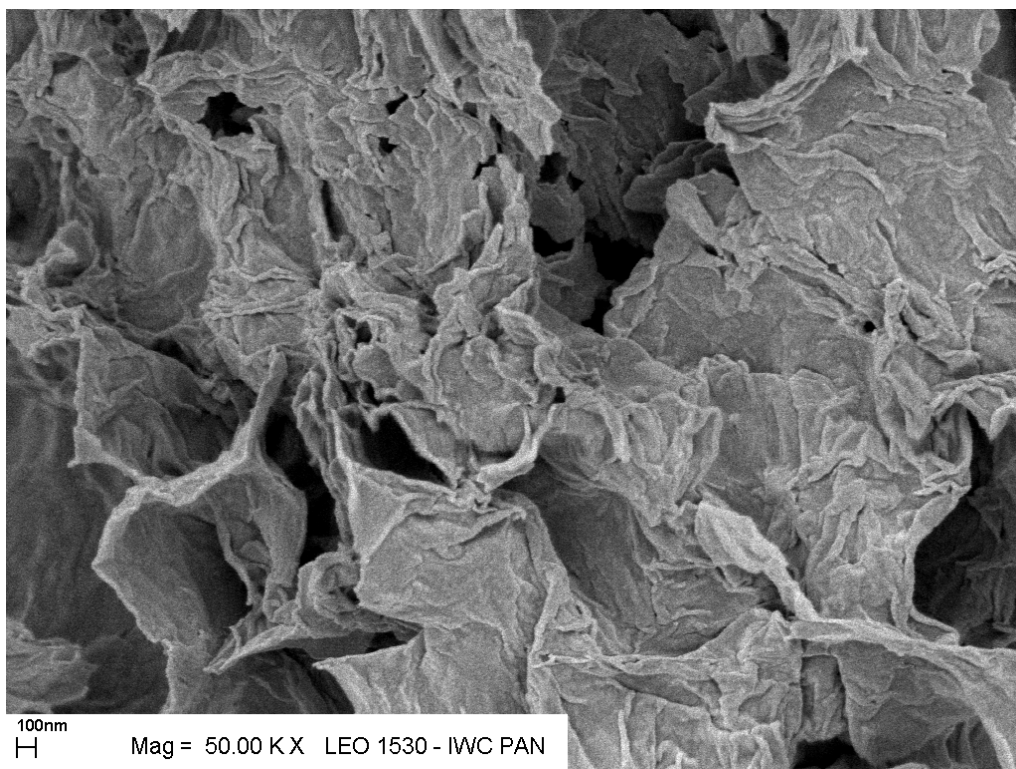
Fot. 11. Mikrostruktura próbki 2NA zawiesiny po 90 dniach twardnienia; analiza SEM-EDS; a) ziarno żuźla, b) kryształy ettringitu, c) faza C-S-H typ II

Na fotografiach 11 wyróżniono w strukturze próbki nieprzereagowane ziarna żużla o czystej, nienaruszonej powierzchni, otoczone masą wypełniającą w formie uwodnionych krzemianów wapnia typu C-S-H (fot. 11a). W masie wypełniającej stwierdzono skupiska rurek o postrzępionych końcach (fot. 11b). Masa wypełniająca ma postać „zmiętych folii”. Ponadto w próbce 2NA po 90 dniach twardnienia zawiesiny (załącznik w formie elektronicznej) zaobserwowano również heksagonalne płytki ułożone względem siebie w sposób krawędź – bok oraz formy naciekowe powstałe w masie wypełniającej. Wykonane analizy SEM-EDS próbki 2NA potwierdzają rozpoznane na zdjęciach SEM utwory w postaci fazy C-S-H i ettringitu.

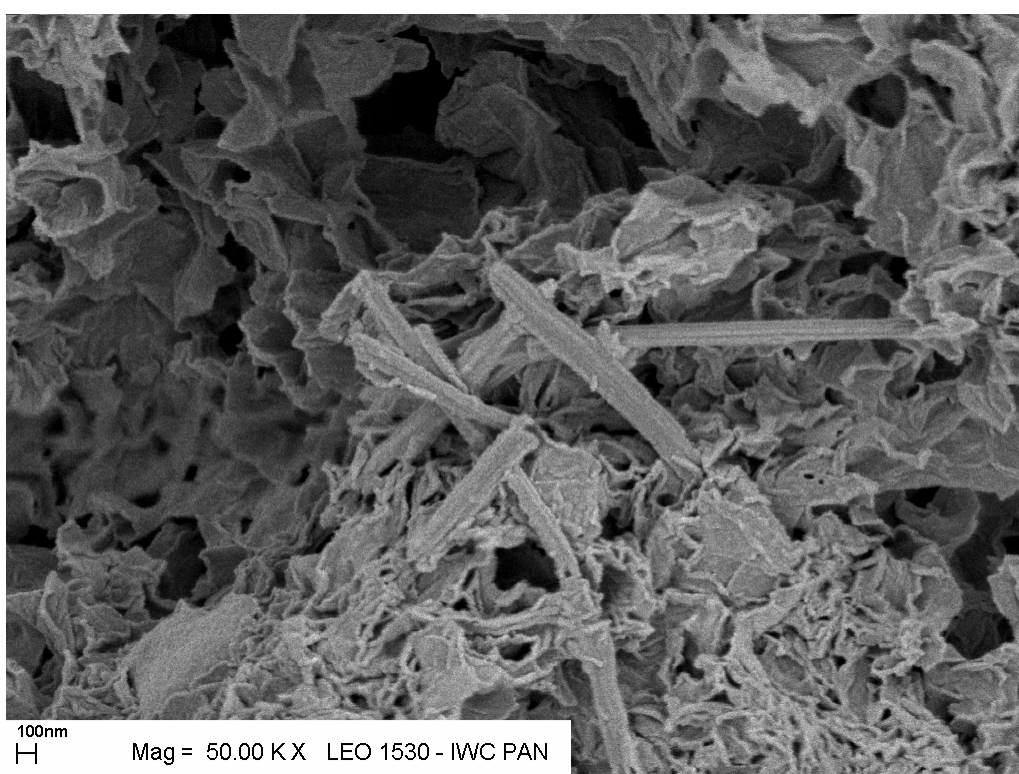
W próbce 3NA zawiesiny po 90 dniach twardnienia (fot. 12) wyróżniono również nieprzereagowane ziarna żużla o wytrawionej powierzchni, osadzone w masie wypełniającej w postaci uwodnionych krzemianów wapnia typu C-S-H (fot. 12a). Masa wypełniająca jest podobna w wyglądzie do „zmiętych folii”, tak jak w przypadku pozostałych próbek. Ponadto w masie wypełniającej występują heksagonalne igły ułożone promieniście względem siebie, a utwór ten nie pojawia się w mikrostrukturze zaczynu po 28 dniach twardnienia (fot. 12c). W próbce pojawiają się również mikrospekania.



a) próbka 3NA, powiększenie 10 000x, ziarno żużla o wytrawionej powierzchni

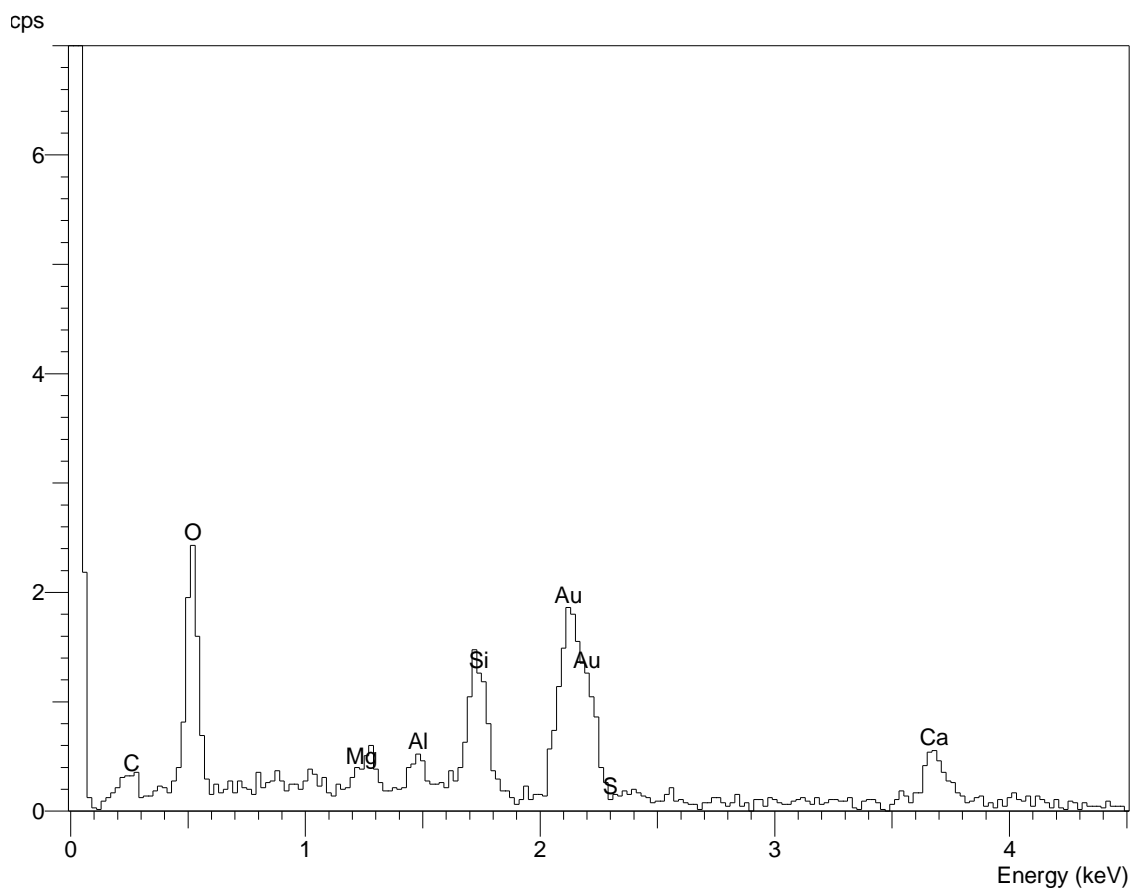
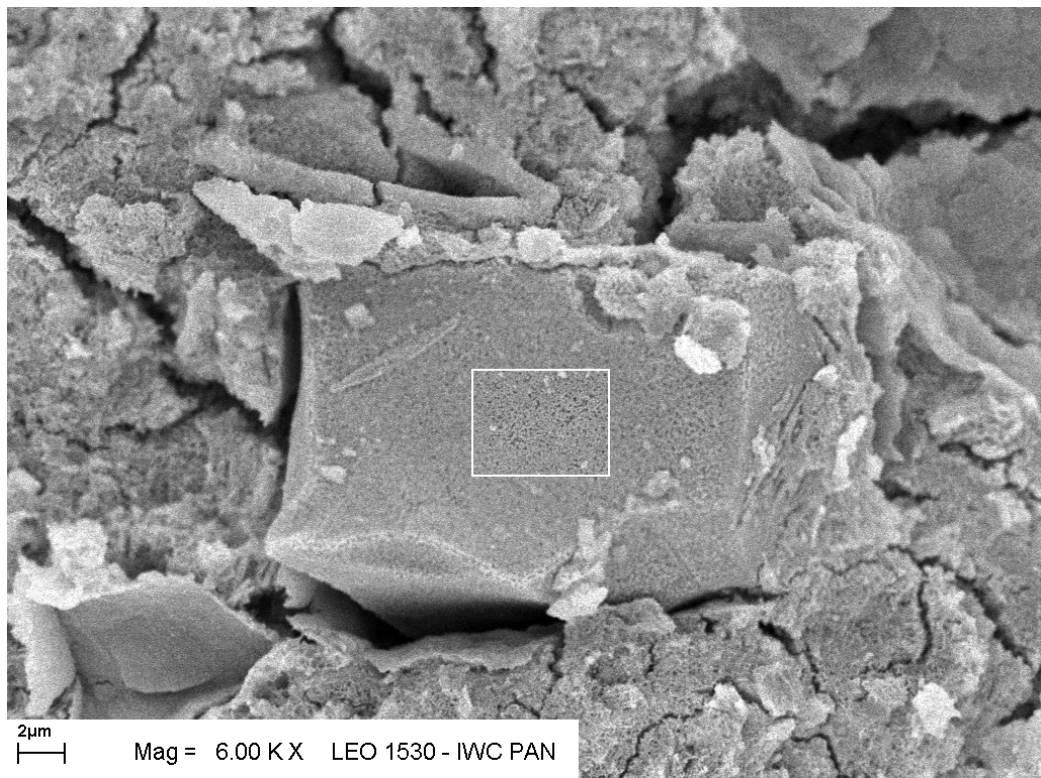


b) próbka 3NA, powiększenie 50 000x, faza C-S-H w formie „zmiętych folii”

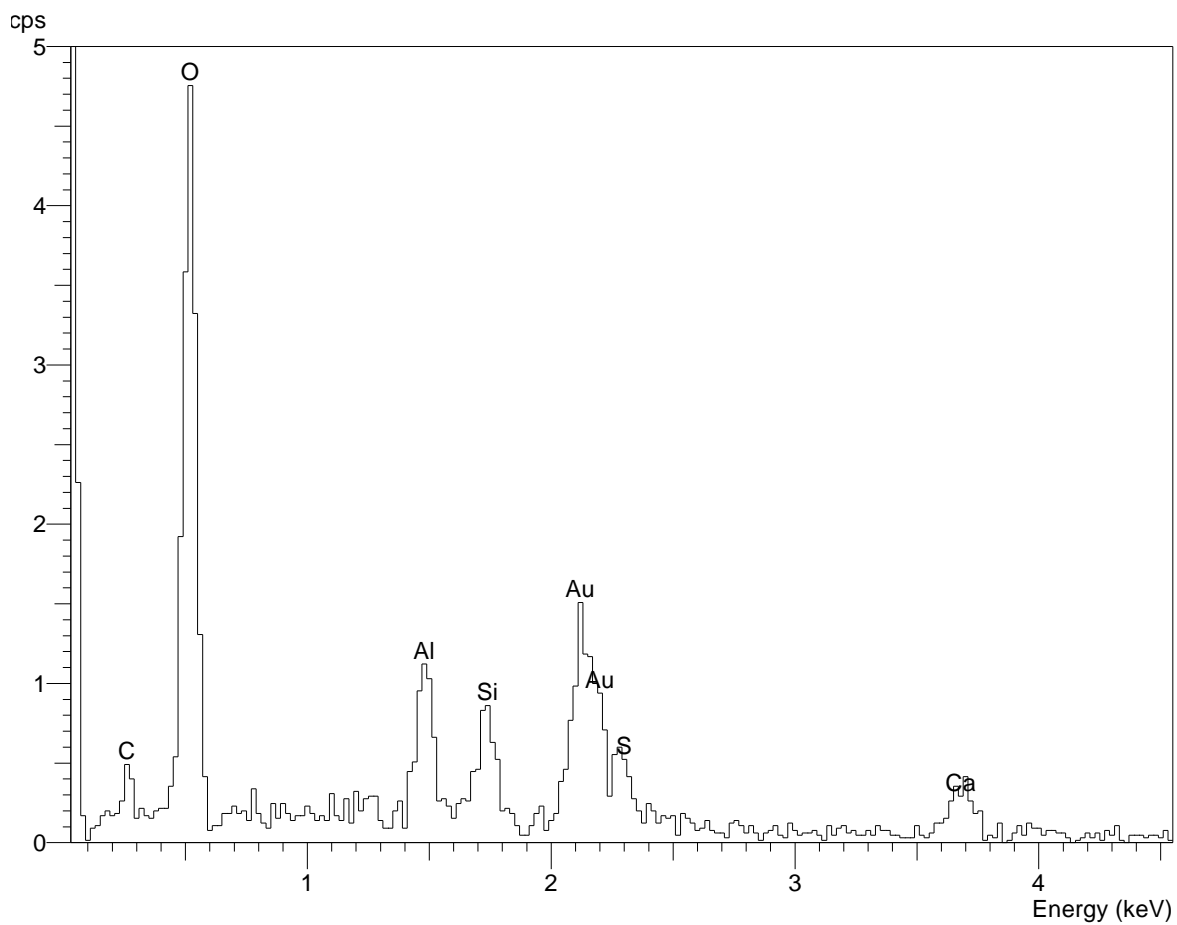
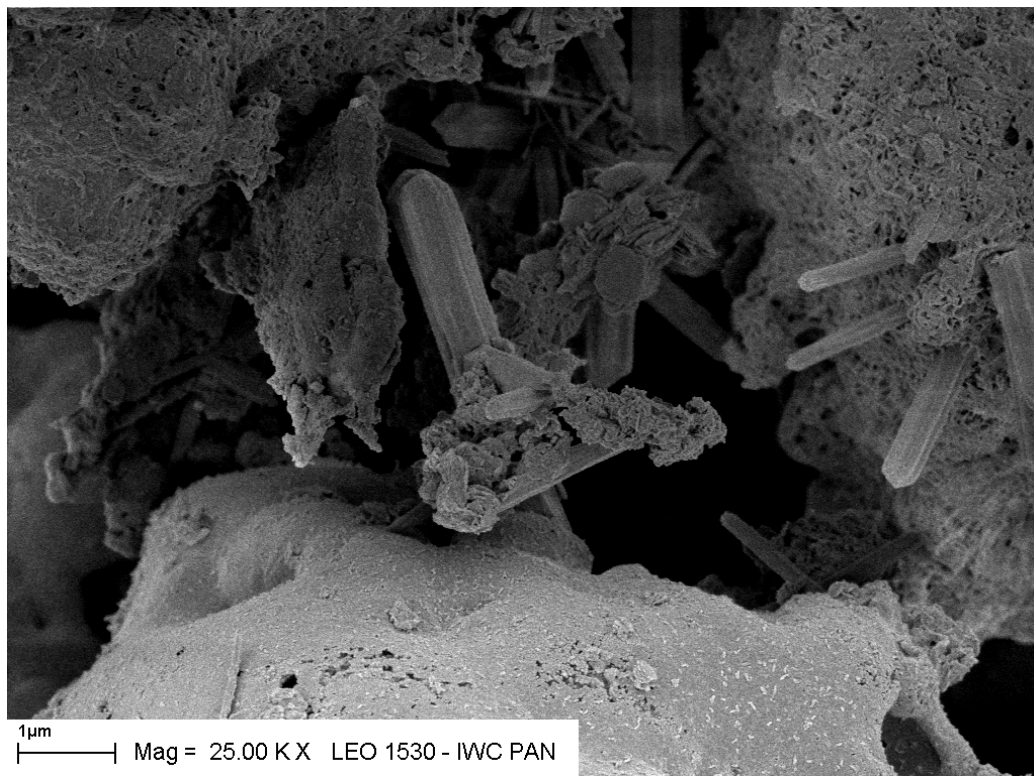


c) próbka 3NA, powiększenie 50 000x, kryształy ettringitu

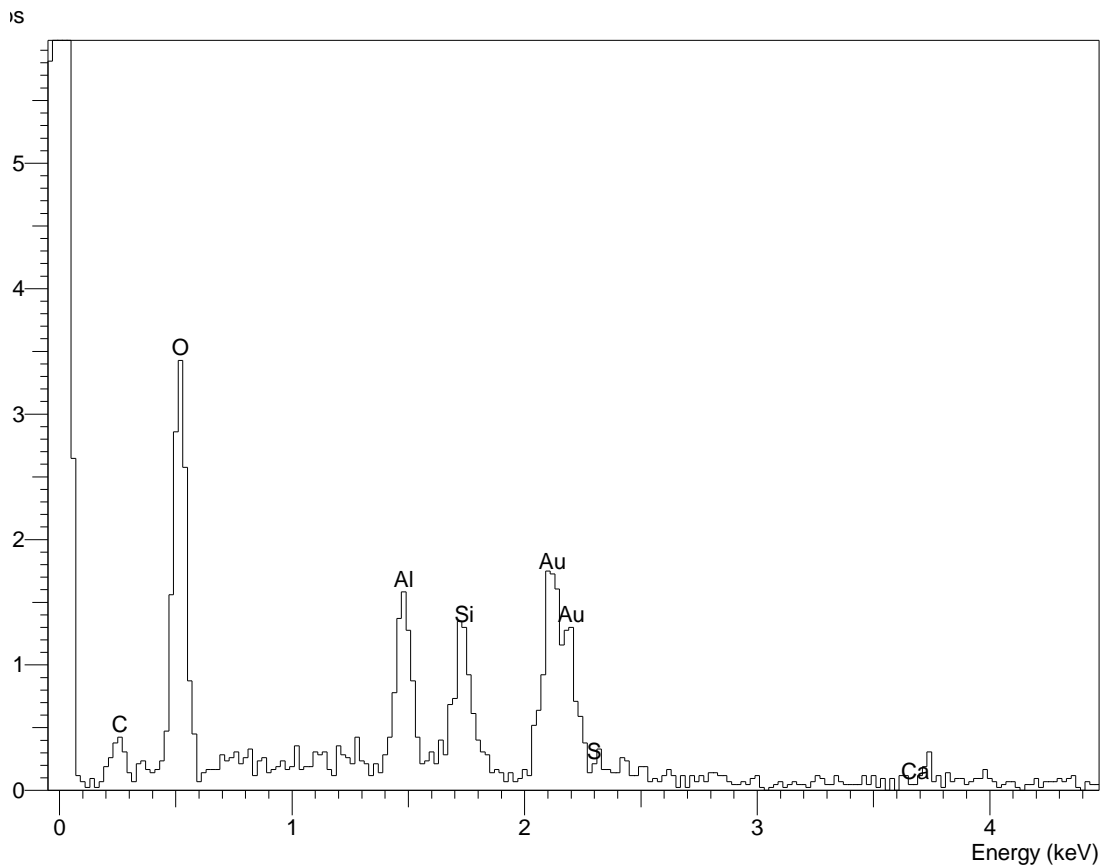
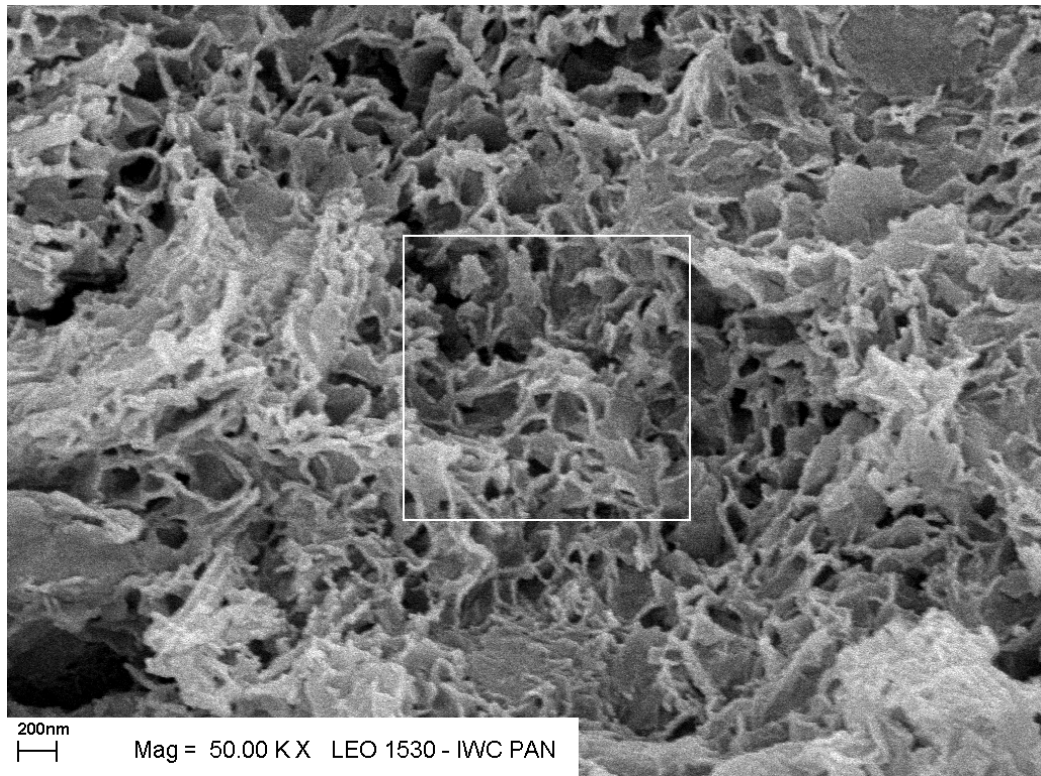
Fot. 12. Mikrostruktura próbki 3NA zawiesiny po 90 dniach twardnienia;
a) ziarno żużla, b) faza C-S-H, c) ettringit



a) próbka 4NA, powiększenie 6 000x (ziarno żuźla), analiza SEM-EDS



b) próbka 4NA, powiększenie 25 000x (kryształy ettringitu), analiza SEM-EDS



c) próbka 4NA, powiększenie 6 000x (faza C-S-H), analiza SEM-EDS

Fot. 13. Mikrostruktura próbki 3NA zawiesiny po 90 dniach twardnienia;

a) ziarno żużla, b) kryształy ettringitu, c) faza C-S-H

W próbce 4NA po 90 dniach twardnienia (fot. 13) występują nieprzereagowane ziarna żużla otoczone masą wypełniającą w formie uwodnionych

krzemianów wapnia typu C-S-H (fot. 13a). Powierzchnia ziarna jest w niektórych miejscach pokryta masą wypełniającą, w której zauważamy rozmieszczone kryształy ettringitu w formie pojedynczych rurek ułożonych promieniście (fot. 13b). Masa wypełniająca (fot. 13c), podobnie jak w przypadku próbki 1, 2 i 3NA, ma strukturę „zmiętych folii”, a w niej występują skupiska kryształów ettringitu (fot. 13b). W porównaniu z próbką wykonaną według tej samej receptury, ale badaną po 28 dniach twardnienia zauważalna jest różnica w postaci cienkich utworów ułożonych na sobie (załącznik w formie elektronicznej).

Analizując wyniki badań próbek zawiesiny stwardniałej metodą SEM w nawiązaniu do pożądanych cech użytkowych zawiesiny według opinii autorki optymalną strukturą byłaby maksymalna zawartość fazy C-S-H, w której równomiernie rozłożone są pozostałości nieprzereagowanego żuźla, ale w połączeniu z fazą C-S-H. Mniej korzystna jest sytuacja, gdy ziarna żuźla są wciśnięte w masę wypełniającą (fot. 12a, 13a), gdyż na granicy ziarno-masa powstają mikrospeknięcia. W materiale tym kryształy ettringitu osadzone fazie C-S-H pełniłyby funkcję pewnego rodzaju mikrobrojenia, podobnie jak w przypadku betonu zbrojonego mikrowłóknami.

Z porównania składu fazowego i mikrostruktury oraz właściwości użytkowych jakim powinny odpowiadać stwardniałe zawiesiny przeznaczone na przesłony przeciwfiltracyjne (wytrzymałość na ścislenie ok. 0,5 MPA i przepuszczalność hydrauliczna rzędu 10^{-9} m/s po 28 dniach dojrzewania) ze wszystkich czterech badanych receptur zawiesin wynika, że najbardziej odpowiednim składem jest receptura zawiesiny 2NA.

7. Wnioski

1. Badania laboratoryjne zawiesin twardniejących wykonanych ze spoiwa w postaci mielonego granulowanego żużla wielkopieczowego aktywowanego popiołem fluidalnym z węgla brunatnego wykazały, że można wykonać pełnowartościowe zawiesiny twardniejące wykorzystując w znaczącym stopniu mineralne materiały odpadowe. Parametry użytkowe tych zawiesin pozostają w zakresach stawianych im najczęściej wymagań (Rafalski, 1995; *Rozporządzenie...*, 2003;).

2. Zróżnicowanie poszczególnych parametrów zawiesin występuje między zawiesinami wykonanymi odpowiednio z: żużlem i popiołem nieaktywowanymi mechanicznie, z żużlem i popiołem aktywowanym mechanicznie oraz z aktywowaną mechanicznie mieszanką żużlowo-popiołową.

3. Zbadane w ramach pracy zawiesiny twardniejące bentonitowo-żużlowo-popiołowo-wodne charakteryzują się następującymi cechami:

- a) niektóre zawiesiny wykazują się stabilnością w stanie płynnym (odpowiednia wytrzymałość strukturalna) i odpornością na odfiltrowanie wody w wyniku działającego na zawiesinę ciśnienia (niewielki przesącz filtracyjny),
- b) charakter krzywych płynięcia zawiesiny w stanie płynnym wykazuje podobieństwo do krzywych właściwych dla cieczy: pseudoplastycznej i dylatancyjnej, tj. analogiczny do krzywych dla zaczynów cementowych,
- c) zawiesiny o składzie najbardziej zbliżonym do receptury nr 2 spełniają formułowane w stosunku do nich oczekiwania odnośnie wytrzymałości na ściskanie i przepuszczalności hydraulicznej po 28 dniach twardnienia,
- d) proces aktywacji mechanicznej popiołu fluidalnego z węgla brunatnego oraz spoiwa żużlowo-popiołowego nie zmienia w istotny sposób, z technologicznego punktu widzenia, parametrów zawiesiny płynnej,
- e) aktywacja mechaniczna popiołu fluidalnego z węgla brunatnego lub spoiwa żużlowo-popiołowego podwyższa w nieznacznym stopniu wytrzymałość na ściskanie niektórych receptur,
- f) proces aktywacji mechanicznej popiołu fluidalnego oraz spoiwa żużlowo-popiołowego w większości zbadanych receptur obniża przepuszczalność hydrauliczną zawiesin w początkowym okresie ich twardnienia (po 14 dniach), później przepuszczalność zwykle wzrasta do poziomu określonego dla zawiesin wykonanych z udziałem nieaktywowanego popiołu fluidalnego.

4. Z przeprowadzonych badań zawiesiny bentonitowo-żużlowo-popiołowo-wodnej w stanie płynnym i po stwardnieniu można wywnioskować, że zawiesina o recepturze nr 2 prezentuje, w znaczącym stopniu, parametry technologiczne, mechaniczne i filtracyjne wymagane przy wykorzystaniu w przesłonach przeciwfiltracyjnych. Wyróżniona zawiesina twardniejąca charakteryzuje się:

- a. gęstością objętościową ($1,17 \text{ g/cm}^3$) na poziomie wystarczającym do zapewnienia stateczności ścian wykopu w przeciętnych warunkach wodno-gruntowych,
- b. odstożem dobowym wody (1,5%) na poziomie gwarantującym jednorodność słupa zawiesiny w wykopie i ekonomiczne wykonanie konstrukcji,
- c. lepkością umowną (40 s), która umożliwia zastosowanie transportu hydraulicznego zawiesiny w miejsce wbudowania,
- d. niewielkim i prawie stałym (ok. 2%) wzrostem ubytku masy spowodowanym odfiltrowaniem wody z zawiesiny w wyniku przyrostu ciśnienia od 0,1 do 0,5 MPa,
- e. przepuszczalnością hydrauliczną rzędu 10^{-9} m/s (po 28 dniach twardnienia) oraz
- f. wytrzymałością na ściskanie ok. 0,5 MPa i odkształcalnością, które spełniają wymagania formułowane wobec materiałów przeznaczonych na ekrany przeciwfiltracyjne.

8. Bibliografia

- Aksielrund G. A., Altszuler M. A., *Ruch masy w ciałach porowatych*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1987.
- Andromalos K., Fisher M. *Design and Control of Slurry Wall Backfill Mixes for Groundwater Containment*; www:geocon.net z marca 2007 r.
- Aprobata Techniczna ITB nr AT-15-5508/2002: *Wyroby bentonitowe do zawiesin stabilizujących DYWONIT S, DYWONIT SX, DYWONIT E*.
- Babu K. G., Kumar V. S. R., *Efficiency of GGBFS in concrete*, Cement and Concrete Research, t. 30 (7) 2000, s. 1031-1036.
- Bastian S., *Betony konstrukcyjne z popiołem lotnym*, Arkady, Warszawa 1980.
- Brylicki W., Lysek N., *Właściwości a wykorzystanie odpadów powstających w procesie odsiarczania gazów w złożu fluidalnym*, Cement-Wapno-Beton nr 3/1996, s. 97-103.
- Brylicki W., Łagosz A., *Odpady z fluidalnego spalania paliw jako surowce hydrauliczno-pucolanowe do produkcji spoiw mineralnych*, Cement-Wapno-Beton nr 1/1999, s.21-23.
- Brzosko Z., *Nowy reologiczny model gruntów*, Biuletyn Geologiczny, t. 11, Warszawa 1969.
- Cement, kruszywa, beton w ofercie Grupy Górażdże. Rodzaje, właściwości, zastosowanie*, Poradnik, praca zbiorowa pod red. Z. Giergicznego, Chorula 2005.
- Chrzanowski M., *Reologia ciał stałych*, Wyd. Politechniki Krakowskiej, Kraków 1995.
- Ciszewski G., *Kotły fluidalne*, www.elektrownie.com.pl z marca 2007 r.
- Czarnecki L., Emmons P.H., *Naprawa i ochrona konstrukcji betonowych*, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2002.
- Demoulian E., Gourdin P., Hawthorn F., Vernet C., *Influence de la composition chimique et de la texture des laitiers sur leur hydraulicité*, 7th Int. Congress on Chemistry of Cement, Paris 1980, s. III-89-94.
- Derdecka A., Malolepszy J., *Aktywacja syntetycznych żużli alkaliarnymi*, Cement-Wapno-Gips nr 8-9/1980.

- Dron R., *Théorie statistique des silicates fondus à forte et moyenne teneur en silice*, 7th Int. Congress on Chemistry of Cement, Paris 1980.
- Evans J., Dawson A., Opdyke S., *Slurry Walls for Groundwater Control: a Comparison of UK and US Practice*, ASCE/PENNDOT Central PA Geotechnical Conference 2002.
- Falaciński P., *Przepuszczalność hydrauliczna zawieszin twardniejących z dodatkiem popiołów fluidalnych*, praca doktorska na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2006.
- Ferguson J., Kembłowski Z., *Reologia stosowana płynów*, Wydawnictwo Marcus, Łódź 1995.
- Garbulewski K., *Dobór i badania gruntowych uszczelnień składowisk odpadów komunalnych*, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2000.
- Garbulewski K., *Studium badań właściwości filtracyjnych zawieszin twardniejących*, Katedra Geoinżynierii SGGW, Warszawa 2003.
- Gawlicki M., Giergiczny Z., *Popiół lotny jako aktywny składnik cementów i dodatek mineralny do betonu*, materiały Konferencji „Dni Betonu”, Polski Cement Sp. z o.o., Wisła 2004.
- Gawlicki M., Paluch E., *Oznaczanie zawartości wolnego tlenku wapnia w klinkierze portlandzkim i popiołach lotnych w Laboratorium materiałów wiążących* praca zbiorowa pod red. W. Nocuń-Wczelik, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003.
- Gawlicki M., Roszczynialski W., *Uboczne produkty spalania z kotłów fluidalnych jako składnik cementów portlandzkich*, Cement-Wapno-Beton nr 5/2003, s. 255-258.
- Giergiczny Z., *Popioły lotne z dużą zawartością związków wapnia*, Cement-Wapno-Beton nr 5/2005, s. 271-282.
- Giergiczny Z., *Rola popiołów lotnych wapniowych i krzemionkowych w kształtowaniu właściwości współczesnych spoin budowlanych i tworzyw cementowych*, Monografia 325, Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, Seria Inżynieria Lądowa, Kraków 2006.
- Giergiczny Z., Małolepszy J., Szwabowski J., Śliwiński J., *Cementy z dodatkami mineralnymi w technologii betonów nowej generacji*, Instytut Śląski, Opole 2002.
- Gorškow W. S., Timašew W. W., *Metody fizyko-chemicznego analiza wjażusiųch mieszczeństw*, Gosudarstwennoje izdatielstwo „Wyższaja szkola”, Moskwa 1963.

- Gorškow W. S., Timašew W. W., Sawieliew W. G., *Metody fizyko-chemiczkiego analiza njażuščich wieszczestw*, Gosudarstwennoje izdatielstwo „Wyższaja szkola”, Moskwa 1981.
- Grim R. E. *Clay Mineralogy*, wyd. 2, McGraw-Hill Book Company 1968.
- Grzeszczyk S., *Reologia zawiesin cementowych*, PAN, Komitet Inżynierii Lądowej i Wodnej, Studia z zakresu Inżynierii, z. 47, Warszawa 1999.
- Hall C., Hoff W. D., *Water transport in brick, stone and concrete*, Spon Press, London and New York 2002.
- Havlica J., Brandštetr J., Odler I., *Possibilities of utilizing solid residues from pressured fluidized bed coal combustion (PSBC) for the production of blended cements*, Cement and Concrete Research, t. 28 (2) 1998, s. 299-307.
- Havlica J., Odler J., Brandštetr R., Mikulíková R. Walther D., *Cementitious materials based on fluidised bed coal combustion ashes*, Advances in Cement Research, t. 16 (2), 2004, s. 61-67.
- Jarema-Suchorowska S., *Możliwości zagospodarowania produktów spalania fluidalnego*, Seminarium Naukowo-Techniczne, Łódź 2002.
- Jefferis S.A., *The Origins of the Slurry Trench Cut-off and a Review of Cement-Bentonite Cut-off Walls in the UK*, Proceedings of the International Containment Technology Conference, Florida, USA 1997, s. 52-70.
- Jones T. E. R., Taylor S., *A mathematical model relating the flow curve of a cement paste to its water/cement ratio*, Magazine of Concrete Research, t. 29, nr 101, 1977, s. 207-212.
- Kabała J., Listkiewicz J., *Wpływ stabilizacji składu chemicznego, fizycznego i ilościowego ubocznych produktów spalania węgla i odsiarczania spalin z kotłów fluidalnych na możliwość ich gospodarczego wykorzystania*, Konferencja „Fluidalne spalanie paliw w Energetyce”, Złotniki Lubańskie 2004.
- Kaczyńska A., *Bentonit w zawiesinach twardniejących*, Materiały Budowlane (nr 343) nr 3/2001.
- Kisiel I., *Reologia w budownictwie*, Arkady, Warszawa 1967.
- Kledyński Z., Falaciński P., Ziarkowska K., *Aktywny dodatek do zawiesin twardniejących na przesłony przecinfiltracyjne w obiektach ochrony środowiska*, Projekt celowy, Warszawa 2004.
- Kledyński Z., Machowska A., *Stan i perspektywy wykorzystania materiałów mineralnych w konstrukcji przesłon przecinfiltracyjnych*, Materiały Budowlane nr 2/2005.

- Kledyński Z., *Materiały na iniekcyjne przesłony przecinfiltracyjne. Przegląd aktualnych zastosowań w Polsce*, materiały III Konferencji Naukowej nt. „Współczesne problemy inżynierii wodnej”, Wisła 1997.
- Kledyński Z., *Odporność korozyjna zawieszin twardniejących w obiektach ochrony środowiska*, Prace Naukowe PW, Inżynieria Środowiska, z. 33, Warszawa 2000.
- Król A., Więcek W., Giergiczny Z., *Spoiva mineralne przeznaczone do immobilizacji metali ciężkich w popiołach ze spalania odpadów medycznych*, Cement-Wapno-Beton nr 3/2005, s. 154-162.
- Krzywobłocka-Laurow R., Jarmonotowicz A., *Analiza termiczna w Metodyka kompleksowych badań laboratoryjnych betonów lekkich*, praca zbiorowa pod red. A. Jarmontowicz, Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 1983.
- Krzywobłocka-Laurow R., Jarmonotowicz A., *Mikroskopia elektronowa w Metodyka kompleksowych badań laboratoryjnych betonów lekkich*, praca zbiorowa pod red. A. Jarmontowicz, Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 1983.
- Kurdowski W., *Chemia cementu*, Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa 1991.
- Kurdowski W., Garbacik A., *Wykminy na betonie*, Budownictwo-Technologie-Architektura, numer specjalny 2005, s. 45-47.
- Legrand C., *Les comportements rhéologiques du mortier frais*, Cement and Concrete Research, t. 2 1972, s. 17-31.
- Liber-Madziarz E., Teisseyre B., *Mineralogia i petrografia*, Oficyna Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2000.
- Locher F. W., *Cement principles of production and use*, monografia, Verlag Ban+Technik GmbH, Dusseldorf 2006.
- Lowuszkina L. N., *Analiza rentgenofazowa w Metodyka kompleksowych badań laboratoryjnych betonów lekkich*, praca zbiorowa pod red. A. Jarmontowicz, Prace Naukowe Instytutu Techniki Budowlanej, Warszawa 1983.
- Małolepszy J., Golek Ł., *Wpływ mielonego granulowanego żużla wielkopiecowego na właściwości mieszanki betonu komórkowego*, materiały Konferencji „Dni Betonu”, Polski Cement Sp. z o.o., Wisła 2004.
- Małolepszy J., *Zastosowanie spoiwa żużlowego aktywowanego alkaliami do betonów wysokowartościowych*, Cement-Wapno-Beton nr 6/2003, s. 310-316.

- Mehta P. K., Monteiro P. J. M., *Concrete. Microstructure, properties and materials*, McGraw Hill, Third Edition, 2006.
- Mehta P. K., *Pozzolan and cementitious by-products in concrete – Another look*, Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete, Proc. of the 3rd Int. Conf., t. 1, Trondheim 1989, s. 1-44.
- Mitosek M., *Mechanika płynów w Inżynierii Środowiska*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1997.
- Neville A. M., *Właściwości betonu*, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2000.
- Nocuń-Wczelik W., *Badanie mikrostruktury zaczynów cementowych i betonów za pomocą elektronowego mikroskopu skaningowego z mikroanalizatorem rentgenowskim w Laboratorium materiałów wiążących* praca zbiorowa pod red. W. Nocuń-Wczelik, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003.
- Nowak W., Bis Z., Szymanek A., Radecki M.: *Opracowanie koncepcji domielania sorbentu drobnego w Elektrowni Turów*, Częstochowa 2000.
- Obwieszczenie Ministra Środowiska z dn. 4 października 2007 r. w sprawie wysokości stawek opłat za korzystanie ze środowiska na rok 2007.*
- Opdyke S. M., Evans J. C., *Slag-cement-bentonite slurry walls*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, t. 131, nr 6, 2005, s. 673-681.
- Pal S.C., Mukherjee A., Pathak S.R., *Investigation of hydraulic activity of ground granulated blast furnace slag in concrete*, Cement and Concrete Research, t. 33 (9) 2003, s. 1481-1486.
- Papo A., *Rheological models for cement pastes*, Materials and Structures, t. 21, 1988, s. 41-46.
- Patent nr 180380 na wynalazek pt.: *Sposób i urządzenie do otrzymywania materiałów wiążących z popiołów kotłowni energetycznych, zwłaszcza z paleniskiem fluidalnym.*
- Peukert S., *Cementy powszechnego użytku i specjalne*, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2000.
- Piaskowski A., *Wytyczne projektowania i wykonywania fundamentów szczelinowych*, Instrukcja ITB nr 230, Warszawa 1980.
- Piaskowski A., *Wytyczne projektowania i wykonywania przeston przecinfiltracyjnych i pionowych ścian w podłożu przy zastosowaniu zawiesin tiksotropowych*, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa 1971.

- Pisarczyk S., *Gruntoznawstwo inżynierskie*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
- Pisarczyk S., *Mechanika gruntów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- Polański Z., *Planowanie doświadczeń w technice*, PWN, Warszawa 1984.
- Polskie Centrum Badań i Certyfikacji, *Akredytacja laboratoriów badawczych – systemy zapewniania jakości w laboratoriach badawczych wg EN 45001*, Materiały szkoleniowe British Standards Institution, 1995.
- Powers T. C., *Structure and physical properties of hardened Portland cement paste*, Journal of American Ceramic Society, nr 41/1958, s. 1-6.
- Rafalski L., *Właściwości i zastosowanie zawieszin twardniejących*, IBDiM, z. 43, Warszawa 1995.
- Rajczyk K., Giergiczny E., Glinicki M. A., *Use of DTA In the investigation of fly ashes from fluidized bed boilers*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, t. 77, 2004, s. 165-170.
- Ramachandran V. S., *Concrete Admixtures Handbook – Properties, Science and Technology (2nd Edition)*, William Andrew Publishing/Noyes 1995.
- Regourd M., Mortureux B., Gautier E., Hornain H., Volant J., *Caractérisation et activation thermique des ciment au laitier*, 7th Int. Congress on Chemistry of Cement, Paris 1980, s. III-105-111.
- Roper H., *Composition, morphology, hydration and bond characteristics of some granulated slags*, 7th Int. Congress on Chemistry of Cement, Paris 1980, s. III-13-18.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dn. 24 marca 2003 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących lokalizacji, budowy, eksploatacji i zamknięcia, jakim powinny odpowiadać poszczególne typy składowisk odpadów.*
- Rusin Z., *Technologia betonów mrozoodpornych*, Polski Cement Sp. z o.o., Kraków 2002.
- Schultze D., *Termiczna analiza różnicowa*, PAN, Warszawa 1974.
- Sersale R., Marchese B., Frigione G., *Microstructure and properties of hydrated cements with different slags*, 7th Int. Congress on Chemistry of Cement, Paris 1980, s. III-63-68.
- Skalmowski W., *Chemia materiałów budowlanych*, Arkady, Warszawa 1971.
- Smolczyk H. G., *Slag structure and identification of slags*, 7th Int. Congress on Chemistry of Cement, Paris 1980, s. III-1/3-1/15.

- Sobczyński P., *Żużle hutnicze – ich natura oraz przydatność gospodarcza*, Konferencja Naukowo-Techniczna „Odpady przemysłowe i komunalne. Powstawanie oraz możliwości ich wykorzystania”, Kraków 1999.
- Song S., Sohn D., Jennings H. M., Mason T. O., *Hydration of alkali-activated ground granulated blast furnace slag*, Journal of Materials and Science, t. 35 (1), 2000, s. 249-257.
- Stryczek S., Gonet A., Brylicki W., Mirosławska A., *Zastosowane spoiwa żużlowo-alkaliczne*, Gospodarka Wodna, nr 5/2005, s. 202-208.
- Szuster A., Utrysko B., *Hydraulika i podstawy hydromechaniki*, Wyd. 2 poprawione, Wydawnictwa Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1992.
- Szwabowski J., *Reologia mieszanek na spoiwach cementowych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1999.
- Taylor H. F. W., *Cement chemistry. 2nd Edition*, Thomas Telford Ltd. 1997.
- Trauger R. J., *The use of sodium bentonite in landfill liners*, Water Technology International, Century Press, London 1992.
- Trietley A.C., *The Effects of Slag Addition on the Permeability of Cement-Bentonite*, Honors thesis, Bucknell University, Department of Civil Engineering, 1996.
- Veracco T. and Smith B., *The Effects of Slag Addition and Curing on the Permeability of Cement-Bentonite*, research report, Bucknell University, Department of Civil Engineering, 1997.
- Wilun Z., *Zarys geotechniki*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1982.
- Zarzycki J., *Le verre et l'état vitreux*, Masson, Paris 1982.
- Zurawski J., *Ekologia OZE*, www.cieplej.pl z maja 2007 r.

Wykorzystane normy:

- BN-90/1785-01: *Pluczka wiertnicza. Metody badań własności w warunkach polowych.*
- PN-88/B-04481: *Grunty budowlane. Badania próbek gruntów.*
- PN-EN 12390-3: 2002: *Badania betonu – Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badania.*
- PN-EN 12390-6: 2001/AC2004: *Badania betonu – Część 6: Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu próbek do badania.*

PN-EN 15167-1:2006 (U): *Mielony granulowany żużel wielkopiecony stosowany do betonu, zaprawy i zaczynu -- Część 1: Definicje, wymagania i kryteria zgodności.*

PN-EN 15167-2:2006 (U): *Mielony granulowany żużel wielkopiecony stosowany do betonu, zaprawy i zaczynu -- Część 2: Ocena zgodności.*

PN-EN 196-1:2006: *Metody badania cementu -- Część 1: Oznaczanie wytrzymałości.*

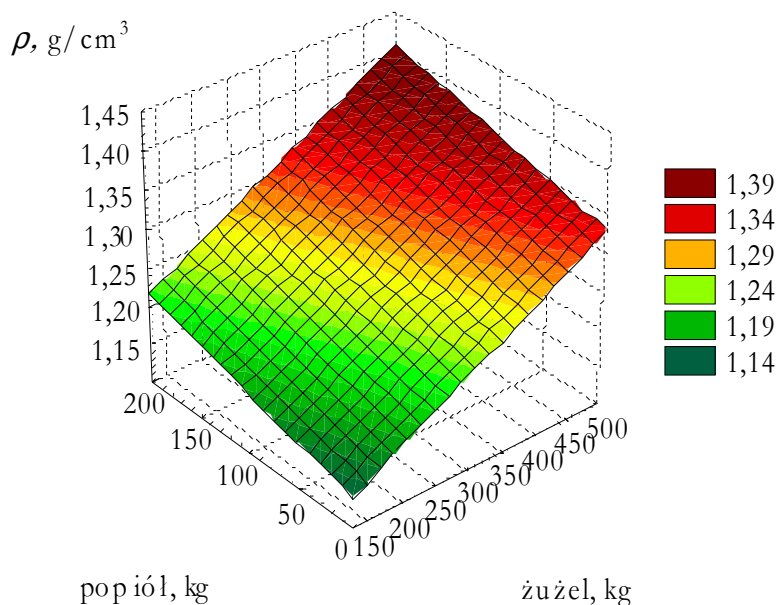
PN-EN 197-1:2002: *Cement – Część 1: Skład, wymagania i kryteria zgodności dotyczące cementów powszechnego użytku.*

Załącznik 1

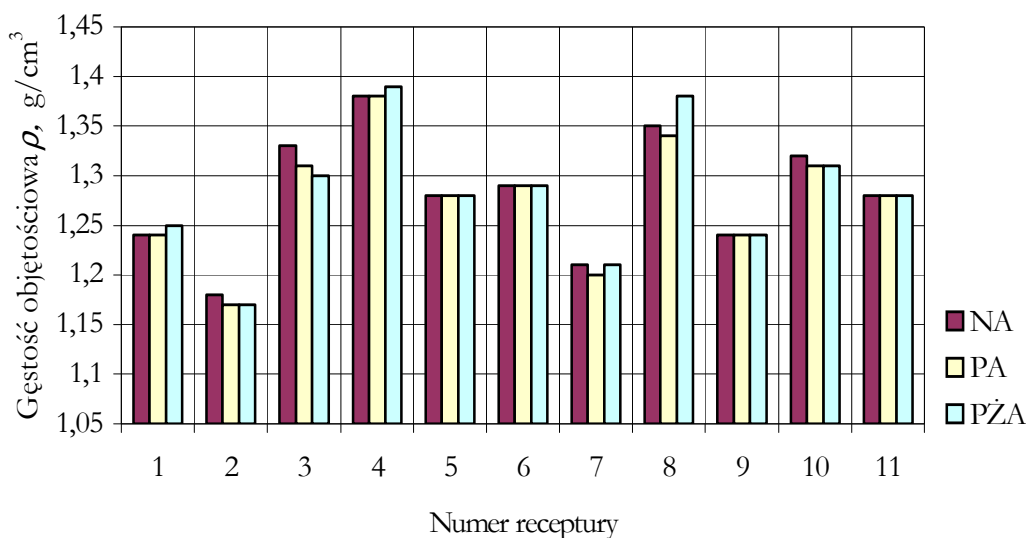
Wyniki badań zawiesiny płynnej

Tabela 4.1. Gęstość objętościowa receptur zawiesiny płynnej wykonanych według wybranego planu eksperymentu, w trzech formach aktywacji mechanicznej

Nr receptury/ stan aktywacji mechanicznej	Gęstość objętościowa zawiesiny, g/cm ³										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NA	1,24	1,18	1,33	1,38	1,28	1,29	1,21	1,35	1,24	1,32	1,28
PA	1,24	1,17	1,31	1,38	1,28	1,29	1,20	1,34	1,24	1,31	1,28
PZA	1,25	1,17	1,30	1,39	1,28	1,29	1,21	1,38	1,24	1,31	1,28



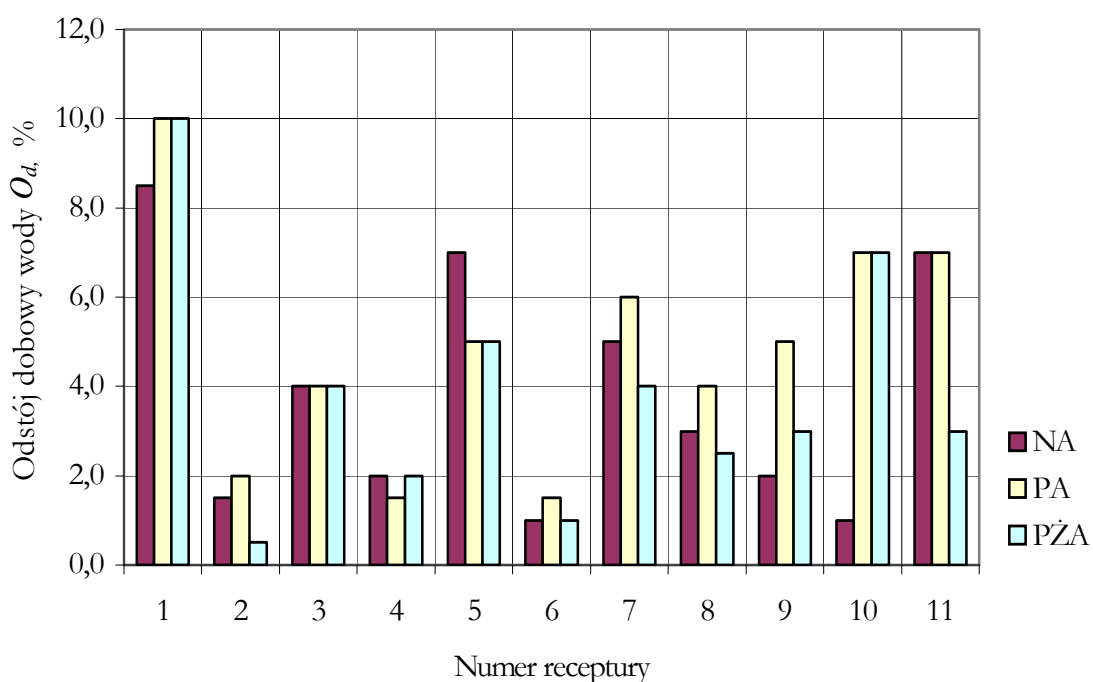
Rys. 4.1. Wpływ dozowania popiołu fluidalnego i żużla wielkopieczowego na gęstość zawiesiny płynnej



Rys. 4.2. Gęstość objętościowa zawiesiny w stanie płynnym; receptury 1-11 w trzech stanach aktywacji mechanicznej; próbka z nieaktywowanym mechanicznie popiołem fluidalnym z węgla brunatnego (ozn. NA), próbka z aktywowanym mechanicznie popiołem fluidalnym (ozn. PA), próbka z aktywowanym mechanicznie spoiwem popiołowo-żużlowym (ozn. PZA)

Tabela 4.2. Odstój dobowy wody zawiesiny płynnej w trzech formach aktywacji mechanicznej spoiwa

Nr receptury/ stan aktywacji mechanicznej	Odstój dobowy wody, %										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>	<i>9</i>	<i>10</i>	<i>11</i>	<i>12</i>
NA	8,5	1,5	4,0	2,0	7,0	1,0	5,0	3,0	2,0	1,0	7,0
PA	10,0	2,0	4,0	1,5	5,0	1,5	6,0	4,0	5,0	7,0	7,0
PZA	10,0	0,5	4,0	2,0	5,0	1,0	4,0	2,5	3,0	7,0	3,0

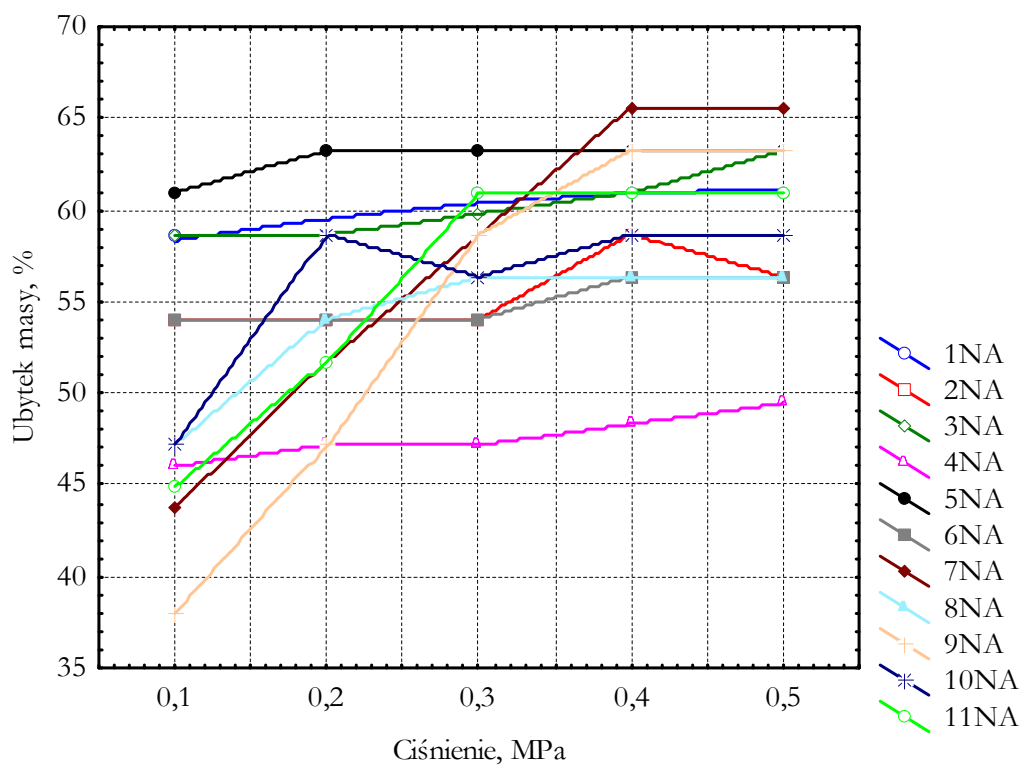


Rys. 4.3. Odstój dobowy wody receptur 1-11 w trzech stanach aktywacji mechanicznej; próbka z nieaktywowanym mechanicznie popiołem fluidalnym z węgla brunatnego (ozn. NA), próbka z aktywowanym mechanicznie popiołem fluidalnym (ozn. PA), próbka z aktywowanym mechanicznie spoiwem popiołowo-żużlowym (ozn. PZA)

Tabela 4.3. Ubytek zawiesiny płynnej (w %) oznaczony metodą przesączu filtracyjnego. Zawiesina z nieaktywowanym mechanicznie popiołem fluidalnym z węgla brunatnego (ozn. NA)

Nr receptury	Zadane ciśnienie p , MPa	Objętość przesączu v , ml	Czas wypływu t , s	Grubość plastra h , cm	Masa plastra m , g	Gęstość plastra ρ_{pl} , g/cm ³	Przepływ przesączu q_{pl} , m ³ /s	Ubytek zawiesiny, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1NA ($\rho=1,24$ g/cm ³)	0,1	102	600	1,8	135,2	1,65	$1,7 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,2	128	520	1,8	113,2	1,38	$2,5 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,3	128	400	1,7	107,4	1,39	$3,2 \cdot 10^{-7}$	60,9
	0,4	128	315	1,7	106,9	1,38	$4,1 \cdot 10^{-7}$	60,9
	0,5	128	275	1,7	104,3	1,35	$4,7 \cdot 10^{-7}$	60,9
2NA ($\rho=1,18$ g/cm ³)	0,1	65	600	2	164,5	1,80	$1,1 \cdot 10^{-7}$	54,1
	0,2	70	600	2	160,1	1,76	$1,2 \cdot 10^{-7}$	54,1
	0,3	75	600	2	153,7	1,69	$1,3 \cdot 10^{-7}$	54,1
	0,4	78	600	1,8	138,4	1,69	$1,3 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,5	80	600	1,9	134,5	1,55	$1,3 \cdot 10^{-7}$	56,3
3NA ($\rho=1,33$ g/cm ³)	0,1	115	590	1,8	138,1	1,68	$1,9 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,2	120	548	1,8	135,3	1,65	$2,2 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,3	125	456	1,75	128,4	1,61	$2,7 \cdot 10^{-7}$	59,8
	0,4	128	346	1,7	129,5	1,67	$3,7 \cdot 10^{-7}$	60,9
	0,5	128	324	1,6	126,1	1,73	$3,9 \cdot 10^{-7}$	63,2
4NA ($\rho=1,38$ g/cm ³)	0,1	78	600	2,35	183,9	1,72	$1,3 \cdot 10^{-7}$	46,0
	0,2	100	537	2,3	163,9	1,56	$1,9 \cdot 10^{-7}$	47,2
	0,3	100	397	2,3	163,4	1,56	$2,5 \cdot 10^{-7}$	47,2
	0,4	100	315	2,25	162,8	1,59	$3,2 \cdot 10^{-7}$	48,3
	0,5	100	292	2,2	157,4	1,57	$3,4 \cdot 10^{-7}$	49,5
5NA ($\rho=1,28$ g/cm ³)	0,1	122	540	1,7	118,4	1,53	$2,3 \cdot 10^{-7}$	60,9
	0,2	128	387	1,6	115,7	1,59	$3,3 \cdot 10^{-7}$	63,2
	0,3	130	320	1,6	115,0	1,58	$4,1 \cdot 10^{-7}$	63,2
	0,4	137	330	1,6	114,6	1,57	$4,2 \cdot 10^{-7}$	63,2
	0,5	135	315	1,6	114,7	1,57	$4,3 \cdot 10^{-7}$	63,2
6NA ($\rho=1,29$ g/cm ³)	0,1	82	600	2	150,0	1,64	$1,4 \cdot 10^{-7}$	54,1
	0,2	92	600	2	147,2	1,61	$1,5 \cdot 10^{-7}$	54,1
	0,3	103	600	2	145,2	1,59	$1,7 \cdot 10^{-7}$	54,1
	0,4	105	600	1,9	145,0	1,67	$1,8 \cdot 10^{-7}$	56,3
	0,5	105	600	1,9	145,1	1,67	$1,8 \cdot 10^{-7}$	56,3
7NA ($\rho=1,21$ g/cm ³)	0,1	83	600	2,45	143,2	1,28	$1,4 \cdot 10^{-7}$	43,7
	0,2	98	600	2,1	125,8	1,31	$1,6 \cdot 10^{-7}$	51,8
	0,3	107	600	1,8	117,2	1,43	$1,8 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,4	122	600	1,5	101,8	1,49	$2,0 \cdot 10^{-7}$	65,5
	0,5	127	600	1,5	100,8	1,47	$2,1 \cdot 10^{-7}$	65,5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8NA ($\rho=1,35$ g/cm ³)	0,1	90	600	2,3	159,2	1,52	$1,5 \cdot 10^{-7}$	47,2
	0,2	110	538	2	145,5	1,60	$2,0 \cdot 10^{-7}$	54,1
	0,3	112	435	1,9	144,6	1,67	$2,6 \cdot 10^{-7}$	56,3
	0,4	115	368	1,9	142,9	1,65	$3,1 \cdot 10^{-7}$	56,3
	0,5	118	352	1,9	140,8	1,63	$3,4 \cdot 10^{-7}$	56,3
9NA ($\rho=1,24$ g/cm ³)	0,1	75	600	2,7	159,9	1,30	$1,3 \cdot 10^{-7}$	38,0
	0,2	92	600	2,3	142,9	1,36	$1,5 \cdot 10^{-7}$	47,2
	0,3	108	600	1,8	115,3	1,40	$1,8 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,4	120	600	1,6	110,3	1,51	$2,0 \cdot 10^{-7}$	63,2
	0,5	132	547	1,6	106,1	1,45	$2,4 \cdot 10^{-7}$	63,2
10NA ($\rho=1,32$ g/cm ³)	0,1	79	600	2,3	160,5	1,53	$1,3 \cdot 10^{-7}$	47,2
	0,2	107	564	1,8	133,2	1,62	$1,9 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,3	107	485	1,9	136,6	1,58	$2,2 \cdot 10^{-7}$	56,3
	0,4	108	432	1,8	135,3	1,65	$2,5 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,5	108	353	1,8	133,8	1,63	$3,6 \cdot 10^{-7}$	58,6
11NA ($\rho=1,28$ g/cm ³)	0,1	81	600	2,4	153,8	1,41	$1,4 \cdot 10^{-7}$	44,9
	0,2	100	600	2,1	134,2	1,40	$1,7 \cdot 10^{-7}$	51,8
	0,3	112	600	1,7	123,7	1,60	$1,9 \cdot 10^{-7}$	60,9
	0,4	117	561	1,7	117,4	1,51	$2,1 \cdot 10^{-7}$	60,9
	0,5	119	526	1,7	119,4	1,54	$2,3 \cdot 10^{-7}$	60,9

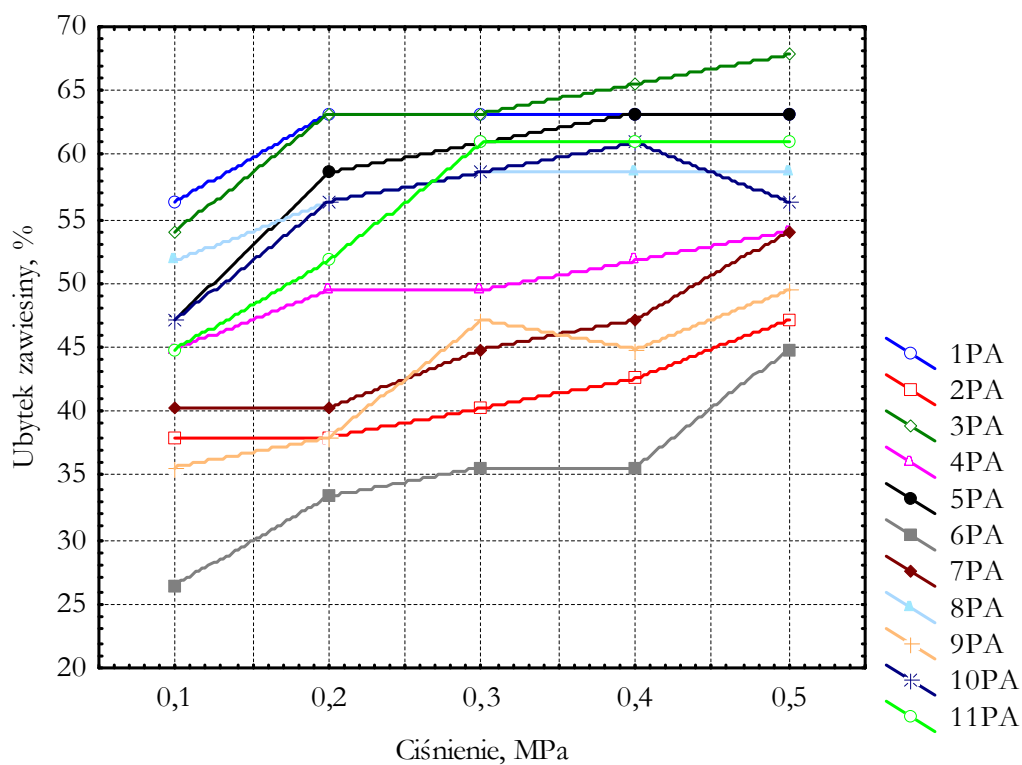


Rys. 4.4. Ubytek masy zawiesiny (w %) wykonanej z udziałem nieaktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (ozn. NA) w funkcji wywieranego ciśnienia

Tabela 4.4. Ubytek zawiesiny płynnej (w %) oznaczony metodą przesączu filtracyjnego. Zawiesina z aktywowanym mechanicznie popiołem fluidalnym z węgla brunatnego (ozn. PA)

Nr receptury	Zadane ciśnienie p , MPa	Objętość przesączu v , ml	Czas wypływu t , s	Grubość plastra h , cm	Masa plastra m , g	Gęstość plastra ρ_{pls} , g/cm ³	Przepływ przesączu q_{pls} , m ³ /s	Ubytek zawiesiny, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1PA ($\rho=1,24$ g/cm ³)	0,1	110	600	1,9	120,9	1,40	$1,8 \cdot 10^{-7}$	56,3
	0,2	128	487	1,6	115,3	1,58	$2,7 \cdot 10^{-7}$	63,2
	0,3	128	385	1,6	109,1	1,50	$3,3 \cdot 10^{-7}$	63,2
	0,4	128	330	1,6	111,0	1,52	$3,9 \cdot 10^{-7}$	63,2
	0,5	128	297	1,6	105,3	1,44	$4,3 \cdot 10^{-7}$	63,2
2PA ($\rho=1,18$ g/cm ³)	0,1	60	600	2,7	158,4	1,29	$1,0 \cdot 10^{-7}$	38,0
	0,2	69	600	2,7	146,5	1,19	$1,2 \cdot 10^{-7}$	38,0
	0,3	73	600	2,6	140,3	1,18	$1,2 \cdot 10^{-7}$	40,3
	0,4	78	600	2,5	133,5	1,17	$1,3 \cdot 10^{-7}$	42,6
	0,5	87	600	2,3	127,5	1,22	$1,5 \cdot 10^{-7}$	47,2
3PA ($\rho=1,31$ g/cm ³)	0,1	108	600	2	131,7	1,44	$1,8 \cdot 10^{-7}$	54,1
	0,2	124	512	1,6	127,1	1,74	$2,4 \cdot 10^{-7}$	63,2
	0,3	124	425	1,6	124,7	1,71	$2,9 \cdot 10^{-7}$	63,2
	0,4	124	391	1,5	121,2	1,77	$3,2 \cdot 10^{-7}$	65,5
	0,5	124	280	1,4	117,4	1,84	$4,4 \cdot 10^{-7}$	67,8
4PA ($\rho=1,38$ g/cm ³)	0,1	81	600	2,4	167,6	1,53	$1,4 \cdot 10^{-7}$	44,9
	0,2	100	590	2,2	164,2	1,64	$1,7 \cdot 10^{-7}$	49,5
	0,3	100	471	2,2	166,6	1,66	$2,1 \cdot 10^{-7}$	49,5
	0,4	100	401	2,1	164,7	1,72	$2,5 \cdot 10^{-7}$	51,8
	0,5	100	322	2	157,7	1,73	$3,1 \cdot 10^{-7}$	54,1
5PA ($\rho=1,28$ g/cm ³)	0,1	89	600	2,3	142,6	1,36	$1,5 \cdot 10^{-7}$	47,2
	0,2	117	600	1,8	119,4	1,45	$1,9 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,3	124	575	1,7	117,3	1,51	$2,2 \cdot 10^{-7}$	60,9
	0,4	124	483	1,6	113,9	1,56	$2,6 \cdot 10^{-7}$	63,2
	0,5	124	439	1,6	112,8	1,55	$2,8 \cdot 10^{-7}$	63,2
6PA ($\rho=1,29$ g/cm ³)	0,1	46	600	3,2	185,9	1,27	$7,7 \cdot 10^{-8}$	26,5
	0,2	59	600	2,9	175,3	1,33	$9,8 \cdot 10^{-8}$	33,4
	0,3	70	600	2,8	169,1	1,32	$1,2 \cdot 10^{-7}$	35,7
	0,4	75	600	2,8	166,1	1,30	$1,3 \cdot 10^{-7}$	35,7
	0,5	78	600	2,4	153,0	1,40	$1,3 \cdot 10^{-7}$	44,9
7PA ($\rho=1,20$ g/cm ³)	0,1	65	600	2,6	152,9	1,29	$1,1 \cdot 10^{-7}$	40,3
	0,2	80	600	2,6	146,4	1,24	$1,3 \cdot 10^{-7}$	40,3
	0,3	96	600	2,4	133,3	1,22	$1,6 \cdot 10^{-7}$	44,9
	0,4	101	600	2,3	123,2	1,17	$1,7 \cdot 10^{-7}$	47,2
	0,5	104	600	2	119,0	1,31	$1,7 \cdot 10^{-7}$	54,1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
8PA ($\rho=1,34$ g/cm ³)	0,1	99	600	2,1	150,1	1,57	$1,7 \cdot 10^{-7}$	51,8
	0,2	108	522	1,9	138,5	1,60	$2,1 \cdot 10^{-7}$	56,3
	0,3	109	444	1,8	138,4	1,69	$2,5 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,4	109	391	1,8	137,3	1,67	$2,8 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,5	109	344	1,8	137,9	1,68	$3,2 \cdot 10^{-7}$	58,6
9PA ($\rho=1,24$ g/cm ³)	0,1	67	600	2,8	160,0	1,25	$1,1 \cdot 10^{-7}$	35,7
	0,2	75	600	2,7	152,5	1,24	$1,3 \cdot 10^{-7}$	38,0
	0,3	89	600	2,3	131,1	1,25	$1,5 \cdot 10^{-7}$	47,2
	0,4	92	600	2,4	140,7	1,29	$1,5 \cdot 10^{-7}$	44,9
	0,5	92	600	2,2	127,1	1,27	$1,5 \cdot 10^{-7}$	49,5
10PA ($\rho=1,31$ g/cm ³)	0,1	94	600	2,3	152,5	1,45	$1,6 \cdot 10^{-7}$	47,2
	0,2	108	575	1,9	136,5	1,58	$1,9 \cdot 10^{-7}$	56,3
	0,3	109	483	1,8	134,3	1,64	$2,3 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,4	109	427	1,7	131,6	1,70	$2,6 \cdot 10^{-7}$	60,9
	0,5	110	385	1,9	131,2	1,51	$2,9 \cdot 10^{-7}$	56,3
11PA ($\rho=1,28$ g/cm ³)	0,1	82	600	2,4	153,0	1,40	$1,4 \cdot 10^{-7}$	44,9
	0,2	99	600	2,1	139,7	1,46	$1,7 \cdot 10^{-7}$	51,8
	0,3	117	600	1,7	120,3	1,55	$1,9 \cdot 10^{-7}$	60,9
	0,4	119	600	1,7	119,8	1,55	$2,0 \cdot 10^{-7}$	60,9
	0,5	119	557	1,7	119,7	1,54	$2,1 \cdot 10^{-7}$	60,9

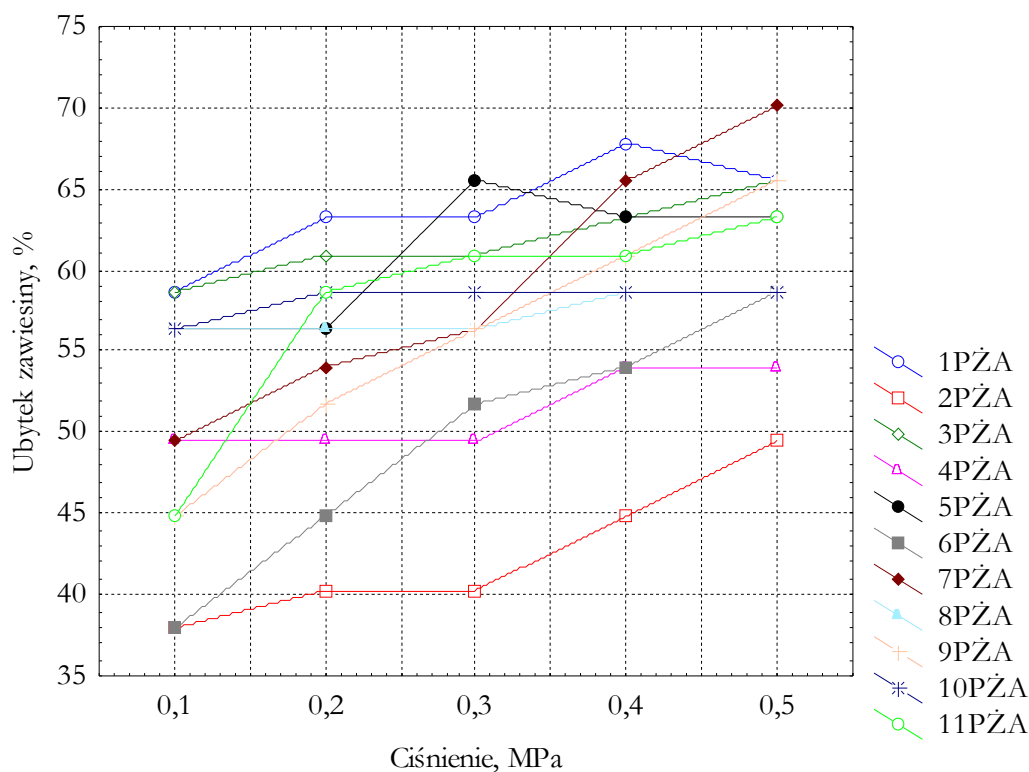


Rys. 4.5. Ubytek masy zawiesiny (w %) wykonanej z udziałem aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (ozn. PA) w funkcji wywieranego ciśnienia

Tabela 4.5. Ubytek zawiesiny płynnej (w %) oznaczony metodą przesączu filtracyjnego. Zawiesina z aktywowanym mechanicznie spoiwem żużlowo-popiołowym (ozn. PŻA)

Nr receptury	Zadane ciśnienie p , MPa	Objętość przesączu v , ml	Czas wypływu t , s	Grubość plastra h , cm	Masa plastra m , g	Gęstość plastra ρ_{pl} , g/cm ³	Przepływ przesączu q_{pl} , m ³ /s	Ubytek zawiesiny, %
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1PŻA ($\rho=1,25$ g/cm ³)	0,1	122	600	1,8	119,0	1,45	$2,0 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,2	125	507	1,6	107,3	1,47	$2,5 \cdot 10^{-7}$	63,2
	0,3	126	394	1,6	107,9	1,48	$3,2 \cdot 10^{-7}$	63,2
	0,4	129	379	1,4	102,5	1,61	$3,4 \cdot 10^{-7}$	67,8
	0,5	125	283	1,5	108,9	1,59	$4,4 \cdot 10^{-7}$	65,5
2PŻA ($\rho=1,17$ g/cm ³)	0,1	56	600	2,7	150,6	1,22	$9,3 \cdot 10^{-8}$	38,0
	0,2	68	600	2,6	144,7	1,22	$1,1 \cdot 10^{-7}$	40,3
	0,3	75	600	2,6	146,7	1,24	$1,3 \cdot 10^{-7}$	40,3
	0,4	85	600	2,4	133,0	1,22	$1,4 \cdot 10^{-7}$	44,9
	0,5	95	600	2,2	129,2	1,29	$1,6 \cdot 10^{-7}$	49,5
3PŻA ($\rho=1,30$ g/cm ³)	0,1	100	600	1,8	133,0	1,62	$1,7 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,2	120	552	1,7	127,3	1,64	$2,2 \cdot 10^{-7}$	60,9
	0,3	122	462	1,7	125,8	1,62	$2,6 \cdot 10^{-7}$	60,9
	0,4	120	363	1,6	123,5	1,69	$3,3 \cdot 10^{-7}$	63,2
	0,5	125	343	1,5	121,1	1,77	$3,6 \cdot 10^{-7}$	65,5
4PŻA ($\rho=1,38$ g/cm ³)	0,1	81	600	2,2	169,3	1,69	$1,4 \cdot 10^{-7}$	49,5
	0,2	98	547	2,2	164,0	1,64	$1,8 \cdot 10^{-7}$	49,5
	0,3	102	467	2,2	165,7	1,65	$2,2 \cdot 10^{-7}$	49,5
	0,4	102	387	2	163,2	1,79	$2,6 \cdot 10^{-7}$	54,1
	0,5	102	324	2	157,0	1,72	$3,2 \cdot 10^{-7}$	54,1
5PŻA ($\rho=1,28$ g/cm ³)	0,1	104	600	1,9	129,1	1,49	$1,7 \cdot 10^{-7}$	56,3
	0,2	110	600	1,9	125,9	1,45	$1,8 \cdot 10^{-7}$	56,3
	0,3	125	431	1,5	110,6	1,62	$2,9 \cdot 10^{-7}$	65,5
	0,4	125	394	1,6	114,5	1,57	$3,2 \cdot 10^{-7}$	63,2
	0,5	126	350	1,6	118,4	1,62	$3,6 \cdot 10^{-7}$	63,2
6PŻA ($\rho=1,29$ g/cm ³)	0,1	71	600	2,7	165,6	1,35	$1,2 \cdot 10^{-7}$	38,0
	0,2	86	600	2,4	150,0	1,37	$1,4 \cdot 10^{-7}$	44,9
	0,3	90	600	2,1	135,5	1,42	$1,5 \cdot 10^{-7}$	51,8
	0,4	95	600	2	133,3	1,46	$1,6 \cdot 10^{-7}$	54,1
	0,5	114	600	1,8	120,1	1,46	$1,9 \cdot 10^{-7}$	58,6
7PŻA ($\rho=1,21$ g/cm ³)	0,1	93	600	2,2	128,2	1,28	$1,6 \cdot 10^{-7}$	49,5
	0,2	99	600	2	116,8	1,28	$1,7 \cdot 10^{-7}$	54,1
	0,3	110	600	1,9	109,6	1,27	$1,8 \cdot 10^{-7}$	56,3
	0,4	119	600	1,5	98,9	1,45	$2,0 \cdot 10^{-7}$	65,5
	0,5	126	600	1,3	90,4	1,52	$2,1 \cdot 10^{-7}$	70,1

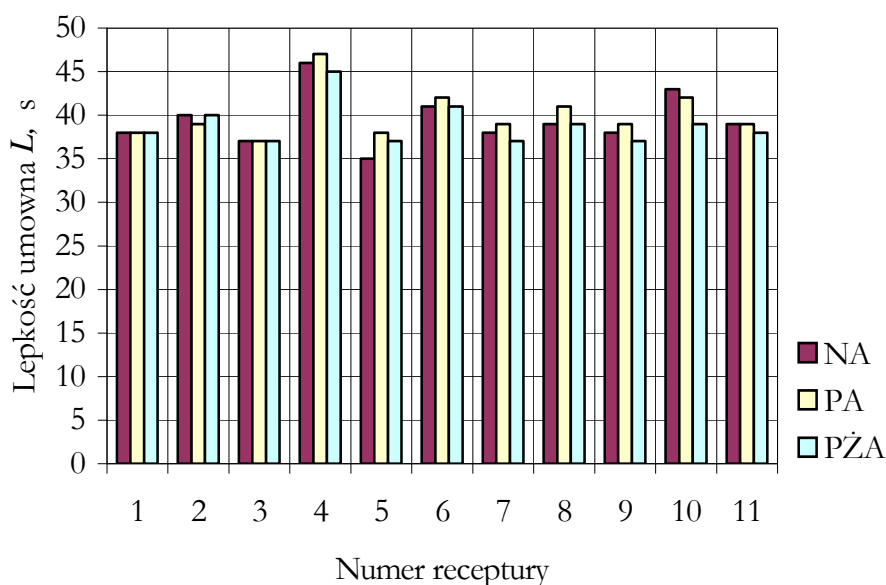
1	2	3	4	5	6	7	8	9
8PŻA ($\rho=1,38$ g/cm ³)	0,1	100	600	1,9	141,7	1,64	$1,7 \cdot 10^{-7}$	56,3
	0,2	117	506	1,9	142,6	1,65	$2,3 \cdot 10^{-7}$	56,3
	0,3	117	412	1,9	139,9	1,61	$2,8 \cdot 10^{-7}$	56,3
	0,4	119	341	1,8	140,8	1,72	$3,5 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,5	119	280	1,8	136,7	1,67	$4,3 \cdot 10^{-7}$	58,6
9PŻA ($\rho=1,24$ g/cm ³)	0,1	84	600	2,4	148,3	1,36	$1,4 \cdot 10^{-7}$	44,9
	0,2	95	600	2,1	129,0	1,35	$1,6 \cdot 10^{-7}$	51,8
	0,3	107	600	1,9	122,1	1,41	$1,8 \cdot 10^{-7}$	56,3
	0,4	116	600	1,7	114,8	1,48	$1,9 \cdot 10^{-7}$	60,9
	0,5	129	600	1,5	108,4	1,58	$2,2 \cdot 10^{-7}$	65,5
10PŻA ($\rho=1,31$ g/cm ³)	0,1	111	503	1,9	139,7	1,61	$2,2 \cdot 10^{-7}$	56,3
	0,2	112	371	1,8	132,1	1,61	$3,0 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,3	112	323	1,8	133,5	1,63	$3,5 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,4	115	252	1,8	133,5	1,63	$4,6 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,5	115	203	1,8	130,9	1,59	$5,7 \cdot 10^{-7}$	58,6
11PŻA ($\rho=1,28$ g/cm ³)	0,1	91	600	2,4	151,7	1,39	$1,5 \cdot 10^{-7}$	44,9
	0,2	106	600	1,8	126,1	1,54	$1,8 \cdot 10^{-7}$	58,6
	0,3	119	530	1,7	120,4	1,55	$2,3 \cdot 10^{-7}$	60,9
	0,4	124	472	1,7	119,0	1,54	$2,6 \cdot 10^{-7}$	60,9
	0,5	120	433	1,6	123,6	1,69	$2,8 \cdot 10^{-7}$	63,2



Rys. 4.6. Ubytek masy zawiesiny (w %) wykonanej z udziałem aktywowanego mechanicznie spoiwa żużlowo-popiołowego (ozn. PŻA) w funkcji wywieranego ciśnienia

Tabela 4.6. Lepkość umowna zawiesiny płynnej w trzech formach aktywacji mechanicznej spoiwa

Nr receptury/ stan aktywacji mechanicznej	Lepkość umowna, s										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>1</i>	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
NA	38	40	37	46	35	41	38	39	38	43	39
PA	38	39	37	47	38	42	39	41	39	42	39
PZA	38	40	37	45	37	41	37	39	37	39	38



Rys. 4.7. Lepkość umowna zawiesiny w stanie płynnym; receptury 1-11 w trzech stanach aktywacji mechanicznej; próbka z nieaktywowanym mechanicznie popiołem fluidalnym z węgla brunatnego (ozn. NA), próbka z aktywowanym mechanicznie popiołem fluidalnym (ozn. PA), próbka z aktywowanym mechanicznie spoiwem popiołowo-żużlowym (ozn. PZA)

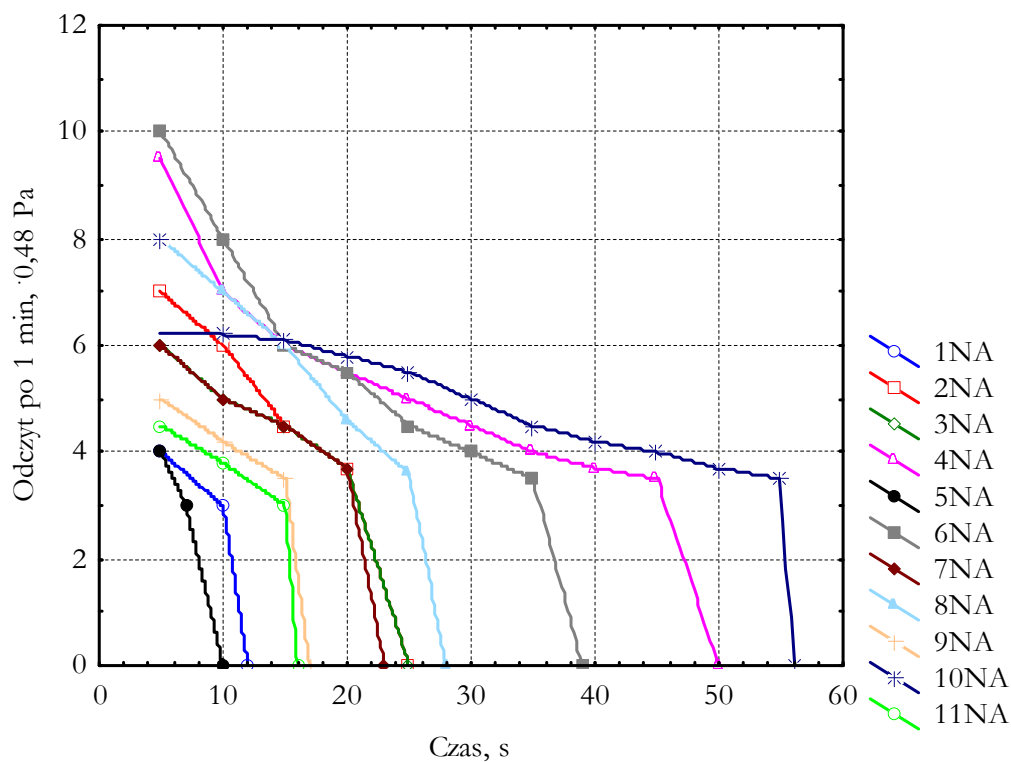
Tabela 4.7. Wyniki badania wytrzymałości strukturalnej τ_s zawiesiny twardniejącej z udziałem nieaktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (ozn. NA); badanie odpowiednio po 1 min i 10 min od pozostawienia zawiesiny w spoczynku

Receptura	Badanie po 1 min		Badanie po 10 min	
	Czas opadania tulejki t_0, s	Wskaźnik szirometru, $\cdot 0,48 Pa$	Czas opadania tulejki t_0, s	Wskaźnik szirometru, $\cdot 0,48 Pa$
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
1NA	5	4,0	5	3,0
	10	3,0	6	2,5
	12	0,0	7	0,0
2NA	5	7,0	5	8,0
	10	6,0	10	7,0
	15	4,5	15	6,0
	20	3,7	20	5,0
	25	0,0	25	4,0
	-	-	30	3,3
	-	-	32	0,0
3NA	5	6,0	5	3,8
	10	5,0	10	3,1
	15	4,5	13	0,0
	20	3,7	-	-
	25	0,0	-	-
4NA	5	9,5	5	40,0
	10	7,0	10	40,0
	15	6,0	15	20,0
	20	5,5	20	15,0
	25	5,0	25	10,0
	30	4,5	30	7,0
	35	4,0	35	6,0
	40	3,7	40	4,8
	45	3,5	45	4,5
	50	0,0	50	4,0
	-	-	55	3,8
	-	-	60	3,5
	-	-	65	3,2
	-	-	70*	0,0
5NA	5	4,0	1	4,0
	7	3,5	2	3,0
	10	0,0	3	0,0

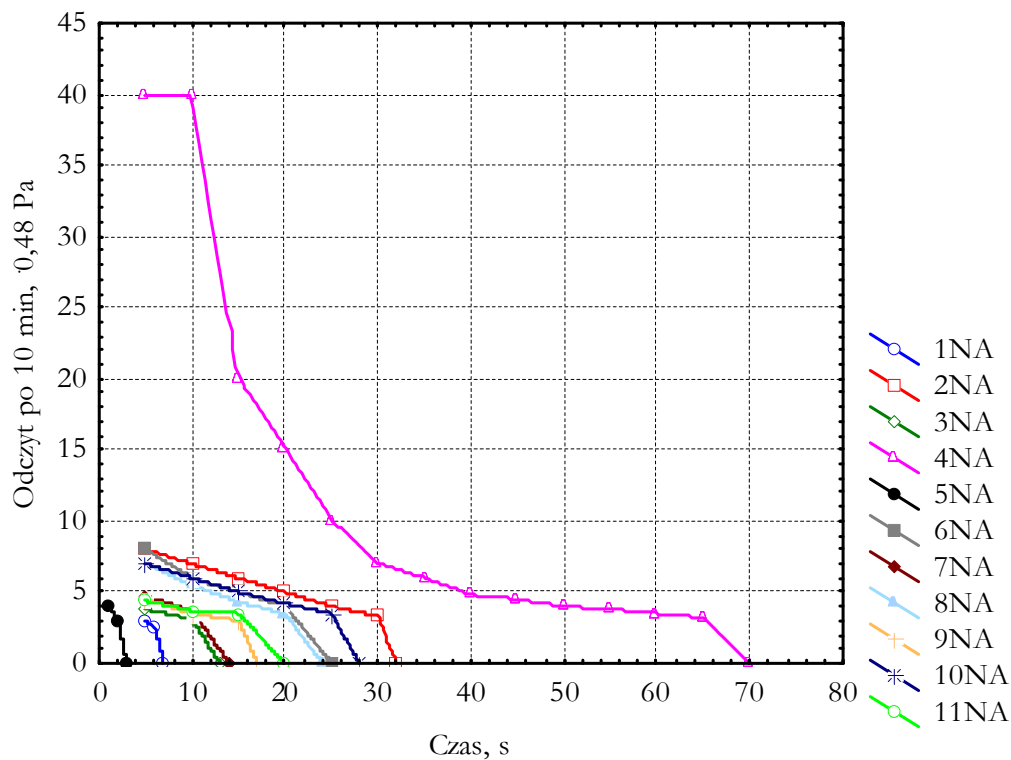
1	2	3	4	5
6NA	5	10,0	5	8,0
	10	8,0	10	6,0
	15	6,0	15	5,0
	20	5,5	20	4,0
	25	4,5	25	0,0
	30	4,0	-	-
	35	3,5	-	-
	39	0,0	-	-
7NA	5	6,0	5	4,7
	10	5,0	10	3,7
	15	4,5	14	0,0
	20	3,7	-	-
	23	0,0	-	-
8NA	5	8,0	5	7,0
	10	7,0	10	5,5
	15	6,0	15	4,3
	20	4,6	20	3,5
	25	3,6	24	0,0
	28	0,0	-	-
9NA	5	5,0	5	4,5
	10	4,2	10	3,5
	15	3,5	15	3,0
	17	0,0	16	0,0
10NA	5	8,0	5	7,0
	10	6,2	10	6,0
	15	6,1	15	5,0
	20	5,8	20	4,2
	25	5,5	25	3,5
	30	5,0	28	0,0
	35	4,5	-	-
	40	4,2	-	-
	45	4,0	-	-
	50	3,7	-	-
	55	3,5	-	-
	56	0,0	-	-
11NA	5	4,5	5	4,4
	10	3,8	10	3,7
	15	3,0	15	3,5
	16	0,0	20	0,0

Wyniki podano w jednostkach podziałki szirometru. Aby otrzymać dane w jednostce SI (Pa) należy wynik podany w tabeli pomnożyć przez wartość 0,48.

* zgodnie z opisem w rozdziale 4.5 wynik badania powinien być przedstawiony w jednostkach podziałki szirometru, jednak ze względu na jego wyjątkowość i fakt, że czas 1 min opadania tulejki został przekroczony o jedynie 10 s, za wynik badania wytrzymałości strukturalnej przyjęto czas



Rys. 4.8. Wytrzymałość strukturalna τ_s zawiesiny płynnej wykonanej z udziałem nieaktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (ozn. NA); badanie po 1 minucie pozostawienia zawiesiny w spoczynku



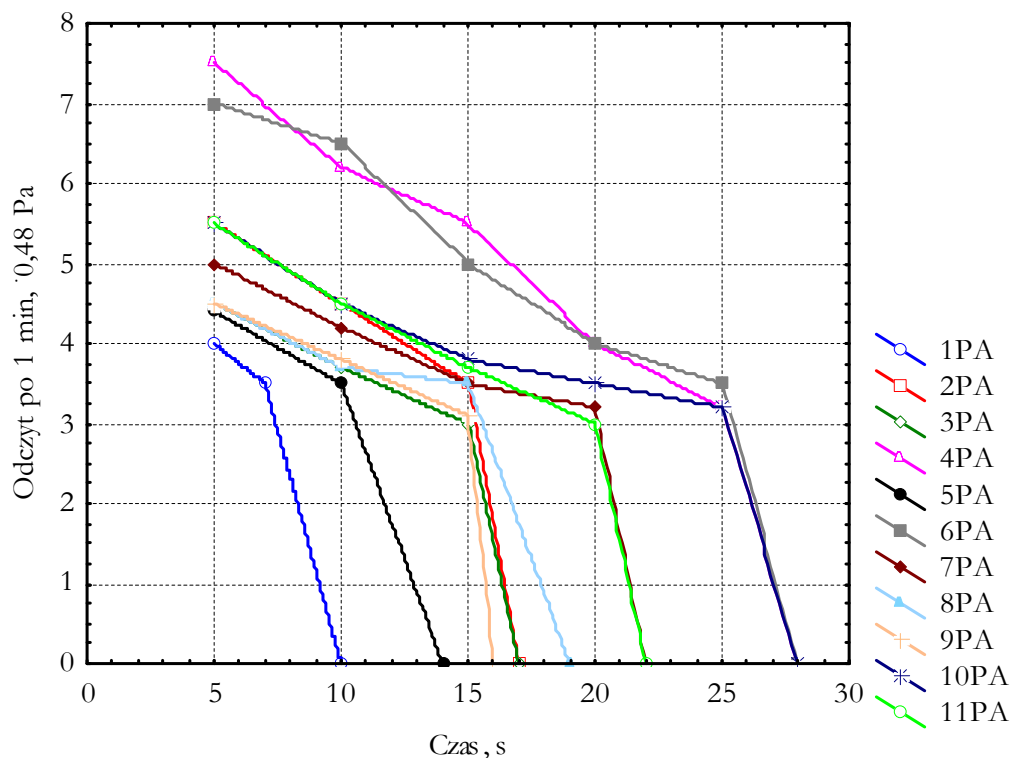
Rys. 4.9. Wytrzymałość strukturalna τ_s zawiesiny płynnej wykonanej z udziałem nieaktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (ozn. NA); badanie po 10 minutach pozostawienia zawiesiny w spoczynku

Tabela 4.8. Wyniki badania wytrzymałości strukturalnej τ_s zawiesiny twardniejącej z udziałem aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (ozn. PA); badanie odpowiednio po 1 min i 10 min od pozostawienia zawiesiny w spoczynku

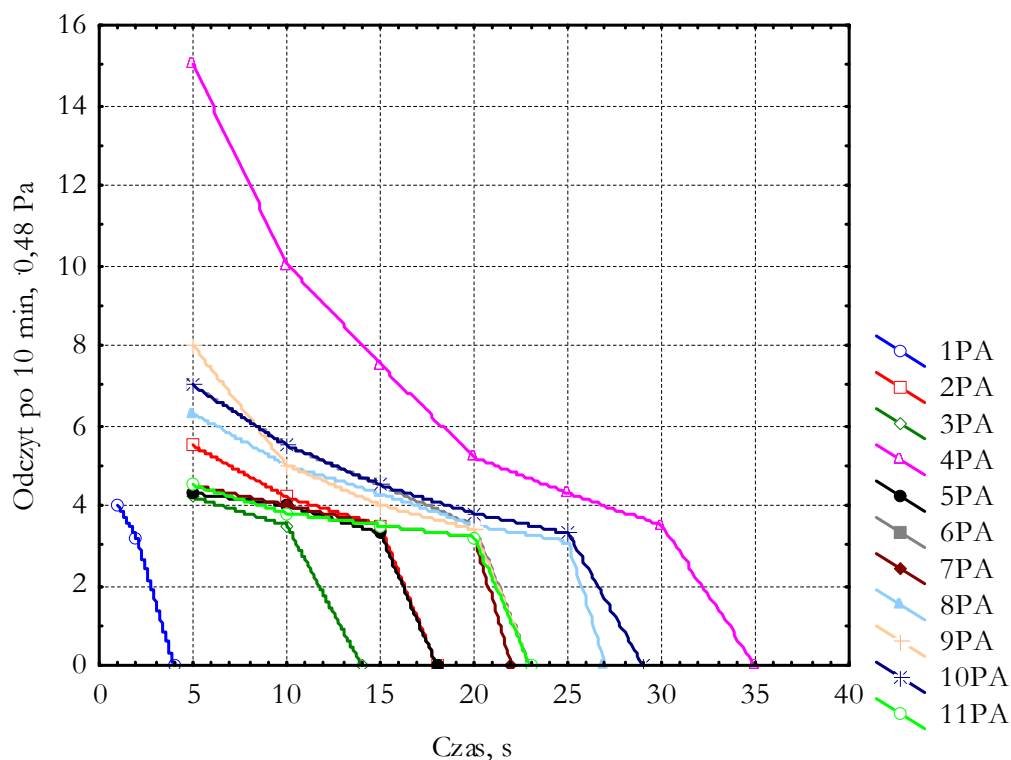
Receptura	Badanie po 1 min		Badanie po 10 min	
	Czas opadania tulejki t_o, s	Wskazanie szirometru, $\cdot 0,48 Pa$	Czas opadania tulejki t_o, s	Wskazanie szirometru, $\cdot 0,48 Pa$
1	2	3	4	5
1PA	5	4,0	1	4,0
	10	0,0	4	0,0
2PA	5	5,5	5	5,5
	10	4,5	10	4,2
	15	3,5	15	3,5
	17	0,0	18	0,0
3PA	5	4,5	5	4,2
	10	3,7	10	3,5
	15	3,0	14	0,0
	17	0,0	-	-
4PA	5	7,5	5	15,0
	10	6,2	10	10,0
	15	5,5	15	7,5
	20	4,0	20	5,2
	25	3,2	25	4,3
	28	0,0	30	3,5
	-	-	35	0,0
5PA	5	4,4	5	5,3
	10	3,5	10	4,0
	14	0,0	15	3,3
	-	-	18	0,0
6PA	5	7,0	5	7,0
	10	6,5	10	5,5
	15	5,0	15	4,5
	20	4,0	20	3,5
	25	3,5	23	0,0
	28	0,0	-	-
7PA	5	5,0	5	4,5
	10	4,2	10	4,0
	15	3,5	15	3,5
	20	3,2	20	3,2
	22	0,0	22	0,0

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
8PA	5	4,5	5	6,3
	10	3,7	10	5,0
	15	3,5	15	4,3
	19	0,0	20	3,5
	-	-	25	3,1
	-	-	27	0,0
9PA	5	4,5	5	8,0
	10	3,8	10	5,0
	15	3,1	15	4,0
	16	0,0	20	3,4
	-	-	23	0,0
10PA	5	5,5	5	7,0
	10	4,5	10	5,5
	15	3,8	15	4,5
	20	3,5	20	3,8
	25	3,2	25	3,3
	28	0,0	29	0,0
11PA	5	5,5	5	4,5
	10	4,5	10	3,8
	15	3,7	15	3,5
	20	3,0	20	3,2
	22	0,0	23	0,0

Wyniki podano w jednostkach podziałki szirometru. Aby otrzymać dane w jednostce SI (Pa) należy wynik podany w tabeli pomnożyć przez wartość 0,48.



Rys. 4.10. Wytrzymałość strukturalna τ_s zawiesiny płynnej wykonanej z udziałem aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (ozn. PA); badanie po 1 minucie pozostawienia zawiesiny w spoczynku



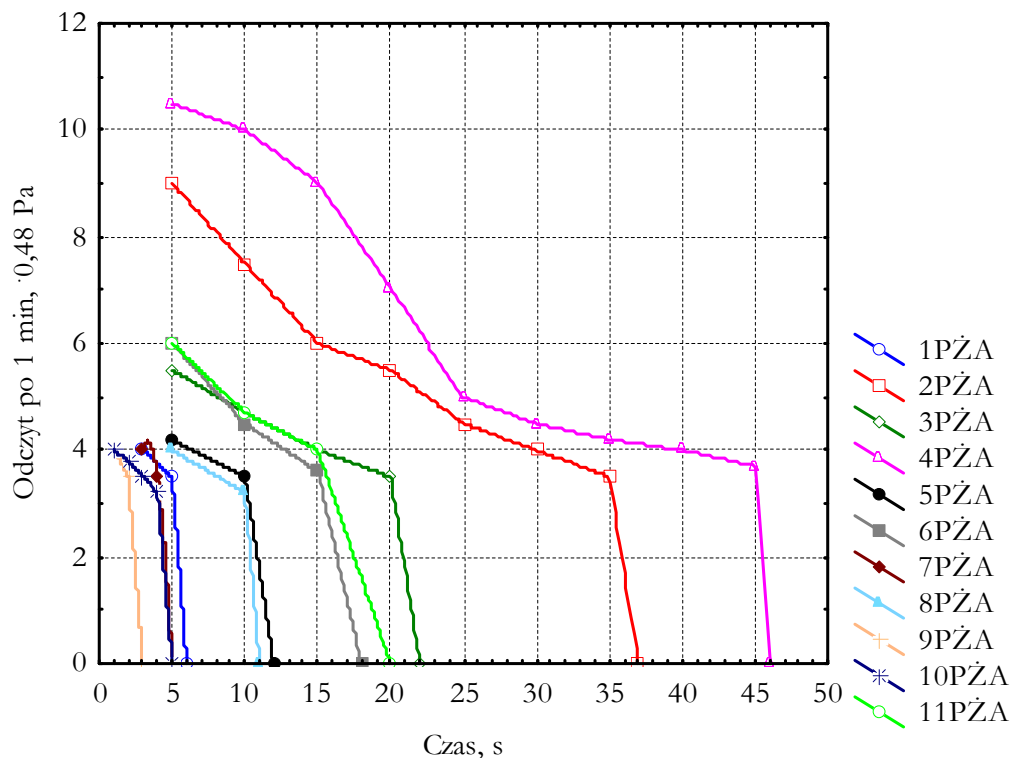
Rys. 4.11. Wytrzymałość strukturalna τ_s zawiesiny płynnej wykonanej z udziałem aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (ozn. PA); badanie po 10 minutach pozostawienia zawiesiny w spoczynku

Tabela 4.9. Wyniki badania wytrzymałości strukturalnej τ_s zawiesiny twardniejącej z udziałem aktywowanego mechanicznie spoiwa żużlowo-popiołowego (ozn. PŻA); badanie odpowiednio po 1 min i 10 min od pozostawienia zawiesiny w spoczynku

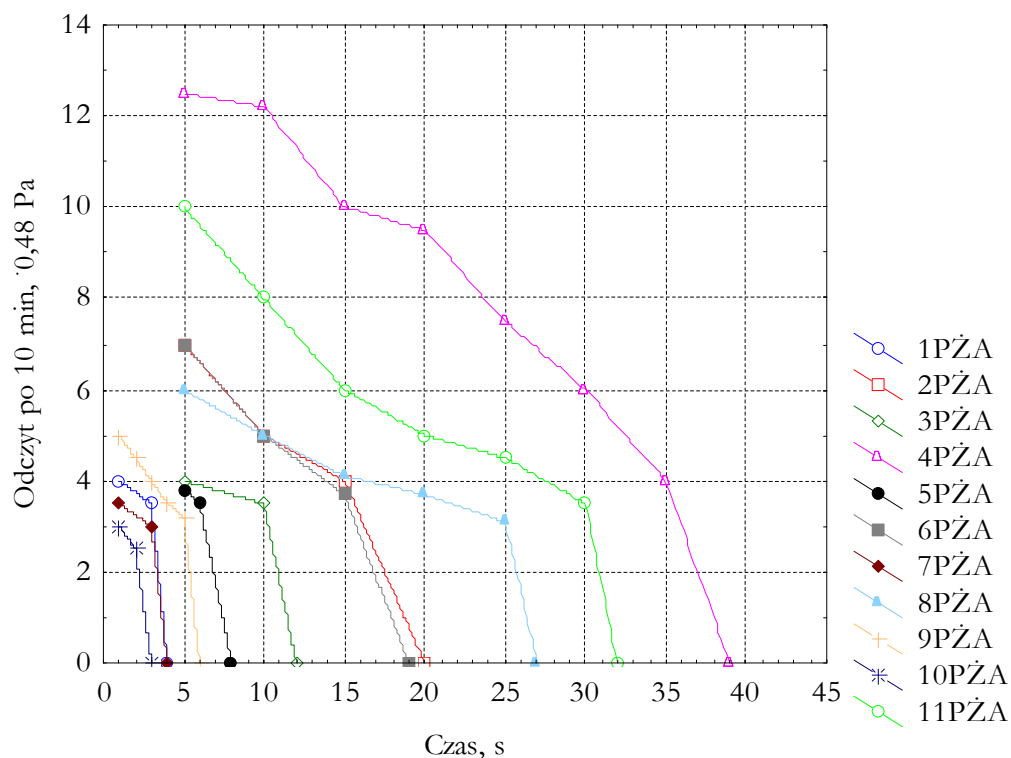
Receptura	Badanie po 1 min		Badanie po 10 min	
	Czas opadania tulejki t_o , s	Wskazanie szirometru, ·0,48 Pa	Czas opadania tulejki t_o , s	Wskazanie szirometru, ·0,48 Pa
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
1PŻA	3	4,0	1	4,0
	5	3,5	3	3,5
	6	0,0	4	0,0
2PŻA	5	9,0	5	7,0
	10	7,5	10	5,0
	15	6,0	15	4,0
	20	5,5	20	0,0
	25	4,5	-	-
	30	4,0	-	-
	35	3,5	-	-
	37	0,0	-	-
3PŻA	5	5,5	5	4,0
	10	4,7	10	3,5
	15	4,0	12	0,0
	20	3,5	-	-
	22	0,0	-	-
4PŻA	5	10,5	5	12,5
	10	10,0	10	12,2
	15	9,0	15	10,0
	20	7,0	20	9,5
	25	5,0	25	7,5
	30	4,5	30	6,0
	35	4,2	35	4,0
	40	4,0	39	0,0
	45	3,7	-	-
	46	0,0	-	-
5PŻA	5	4,2	5	3,8
	10	3,5	6	3,5
	12	0,0	8	0,0
6PŻA	5	6,0	5	7,0
	10	4,5	10	5,0
	15	3,6	15	3,7
	18	0,0	19	0,0

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>
7PZA	3	4,0	1	3,5
	4	3,5	3	3,0
	5	0,0	4	0,0
8PZA	5	4,0	5	6,0
	10	3,2	10	5,0
	11	0,0	15	4,1
	-	-	20	3,7
	-	-	25	3,1
	-	-	27	0,0
9PZA	1	4,0	1	5,0
	2	3,5	2	4,5
	3	0,0	3	4,0
	-	-	4	3,5
	-	-	5	3,2
	-	-	6	0,0
10PZA	1	4,0	1	3,0
	2	3,8	2	2,5
	3	3,5	3	0,0
	4	3,2	-	-
	5	0,0	-	-
11PZA	5	6,0	5	10,0
	10	4,7	10	8,0
	15	4,0	15	6,0
	20	0,0	20	5,0
	-	-	25	4,5
	-	-	30	3,5
	-	-	32	0,0

Wyniki podano w jednostkach podziałki szirometru. Aby otrzymać dane w jednostce SI (Pa) należy wynik podany w tabeli pomnożyć przez wartość 0,48.



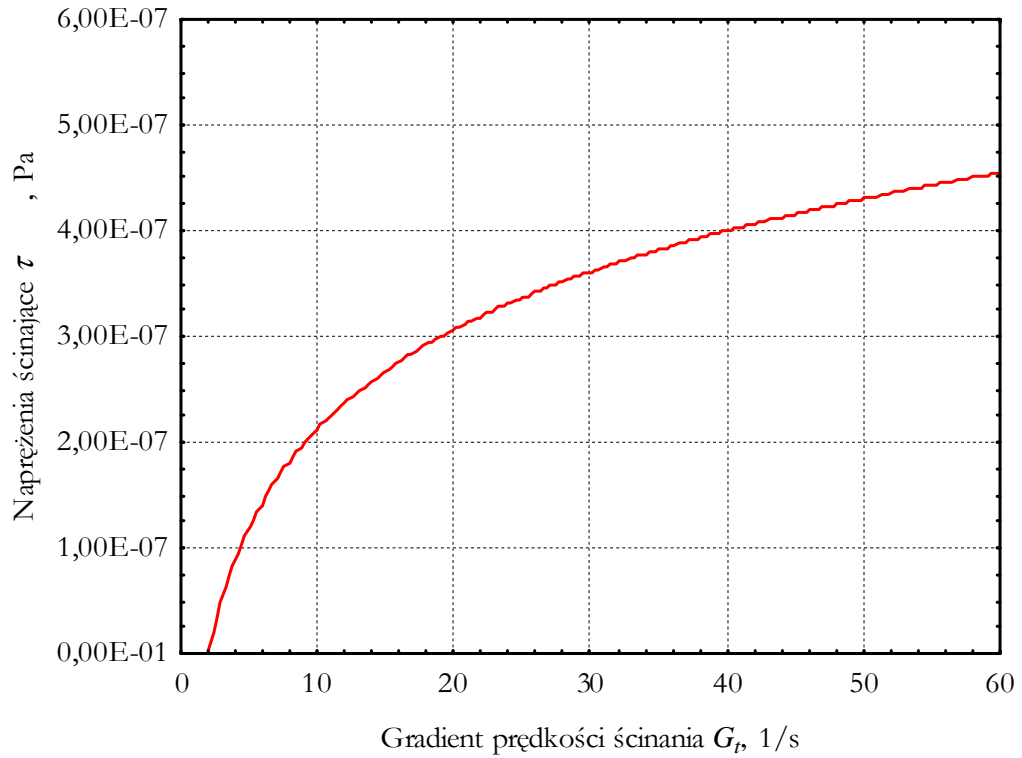
Rys. 4.12. Wytrzymałość strukturalna τ_s zawiesiny płynnej wykonanej z udziałem aktywowanego mechanicznie spoiwa żuźlowo-popiołowego (ozn. PŻA); badanie po 1 minucie pozostawienia zawiesiny w spoczynku



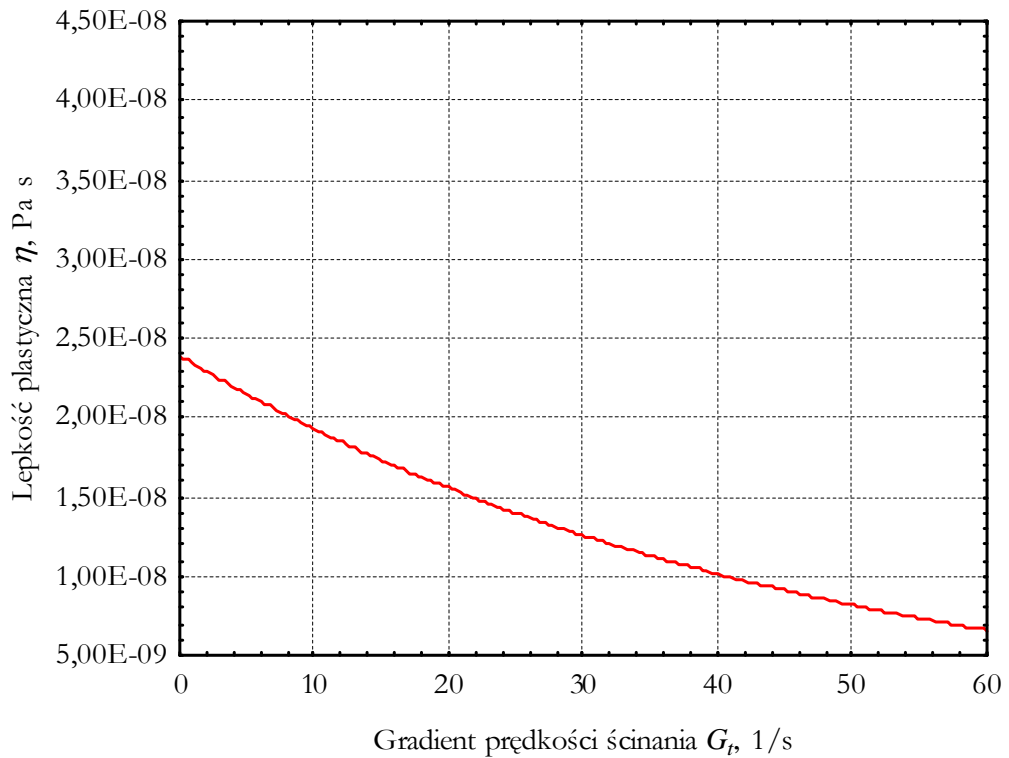
Rys. 4.13. Wytrzymałość strukturalna τ_s zawiesiny płynnej wykonanej z udziałem aktywowanego mechanicznie spoiwa żuźlowo-popiołowego (ozn. PŻA); badanie po 10 minutach pozostawienia zawiesiny w spoczynku

Tabela 4.10. Wyniki badań reologicznych w wiskozymetrze obrotowym receptury 1 zawiesiny płynnej wykonanej z nieaktywowanym popiołem lotnym z węgla brunatnego

Zadana prędkość obrotowa RPM , obr./min	Procent momentu skręcającego %M , -	Moment skręcający M , N·m	Prędkość kątowna ω , 1/s	Gradient techniczny G_t , 1/s	Napężenia ścinające τ , Pa	Lepkość plastyczna η , Pa·s
1	2	3	4	5	6	7
10	10,90	$7,34 \cdot 10^{-6}$	1,05	2,10	$8,25 \cdot 10^{-8}$	$3,93 \cdot 10^{-8}$
20	19,70	$1,30 \cdot 10^{-5}$	2,09	4,20	$1,49 \cdot 10^{-7}$	$3,55 \cdot 10^{-8}$
30	20,00	$1,35 \cdot 10^{-5}$	3,14	6,30	$1,51 \cdot 10^{-7}$	$2,40 \cdot 10^{-8}$
40	20,95	$1,41 \cdot 10^{-5}$	4,19	8,40	$1,59 \cdot 10^{-7}$	$1,89 \cdot 10^{-8}$
50	20,85	$1,42 \cdot 10^{-5}$	5,23	10,50	$1,60 \cdot 10^{-7}$	$1,52 \cdot 10^{-8}$
60	24,00	$1,63 \cdot 10^{-5}$	6,28	12,60	$1,83 \cdot 10^{-7}$	$1,45 \cdot 10^{-8}$
70	28,05	$1,91 \cdot 10^{-5}$	7,33	14,70	$2,15 \cdot 10^{-7}$	$1,46 \cdot 10^{-8}$
80	34,20	$2,34 \cdot 10^{-5}$	8,37	16,80	$2,63 \cdot 10^{-7}$	$1,56 \cdot 10^{-8}$
90	40,35	$2,70 \cdot 10^{-5}$	9,42	18,90	$3,04 \cdot 10^{-7}$	$1,61 \cdot 10^{-8}$
100	41,90	$2,84 \cdot 10^{-5}$	10,47	21,00	$3,19 \cdot 10^{-7}$	$1,52 \cdot 10^{-8}$
110	44,55	$3,00 \cdot 10^{-5}$	11,51	23,10	$3,38 \cdot 10^{-7}$	$1,46 \cdot 10^{-8}$
120	45,55	$3,08 \cdot 10^{-5}$	12,56	25,20	$3,46 \cdot 10^{-7}$	$1,37 \cdot 10^{-8}$
130	46,65	$3,15 \cdot 10^{-5}$	13,61	27,30	$3,54 \cdot 10^{-7}$	$1,30 \cdot 10^{-8}$
140	47,85	$3,23 \cdot 10^{-5}$	14,65	29,40	$3,63 \cdot 10^{-7}$	$1,23 \cdot 10^{-8}$
150	49,00	$3,31 \cdot 10^{-5}$	15,70	31,50	$3,72 \cdot 10^{-7}$	$1,18 \cdot 10^{-8}$
160	50,50	$3,40 \cdot 10^{-5}$	16,75	33,60	$3,82 \cdot 10^{-7}$	$1,14 \cdot 10^{-8}$
170	52,50	$3,54 \cdot 10^{-5}$	17,79	35,70	$3,97 \cdot 10^{-7}$	$1,11 \cdot 10^{-8}$
200	57,70	$3,89 \cdot 10^{-5}$	20,93	42,00	$4,37 \cdot 10^{-7}$	$1,04 \cdot 10^{-8}$
250	68,50	$4,62 \cdot 10^{-5}$	26,17	52,50	$5,19 \cdot 10^{-7}$	$9,88 \cdot 10^{-9}$
200	56,50	$3,81 \cdot 10^{-5}$	20,93	42,00	$4,28 \cdot 10^{-7}$	$1,02 \cdot 10^{-8}$
170	51,20	$3,45 \cdot 10^{-5}$	17,79	35,70	$3,88 \cdot 10^{-7}$	$1,09 \cdot 10^{-8}$
150	48,90	$3,29 \cdot 10^{-5}$	15,70	31,50	$3,70 \cdot 10^{-7}$	$1,18 \cdot 10^{-8}$
130	46,50	$3,13 \cdot 10^{-5}$	13,61	27,30	$3,52 \cdot 10^{-7}$	$1,29 \cdot 10^{-8}$
110	44,40	$2,99 \cdot 10^{-5}$	11,51	23,10	$3,36 \cdot 10^{-7}$	$1,46 \cdot 10^{-8}$
90	40,20	$2,71 \cdot 10^{-5}$	9,42	18,90	$3,04 \cdot 10^{-7}$	$1,61 \cdot 10^{-8}$
70	27,70	$1,89 \cdot 10^{-5}$	7,33	14,70	$2,10 \cdot 10^{-7}$	$1,43 \cdot 10^{-8}$
50	20,60	$1,39 \cdot 10^{-5}$	5,23	10,50	$1,56 \cdot 10^{-7}$	$1,49 \cdot 10^{-8}$
40	18,50	$1,25 \cdot 10^{-5}$	4,19	8,40	$1,40 \cdot 10^{-7}$	$1,67 \cdot 10^{-8}$
30	16,70	$1,13 \cdot 10^{-5}$	3,14	6,30	$1,26 \cdot 10^{-7}$	$2,01 \cdot 10^{-8}$
20	14,90	$1,00 \cdot 10^{-5}$	2,09	4,20	$1,13 \cdot 10^{-7}$	$2,69 \cdot 10^{-8}$
10	5,50	$3,71 \cdot 10^{-6}$	1,05	2,10	$4,16 \cdot 10^{-8}$	$1,98 \cdot 10^{-8}$



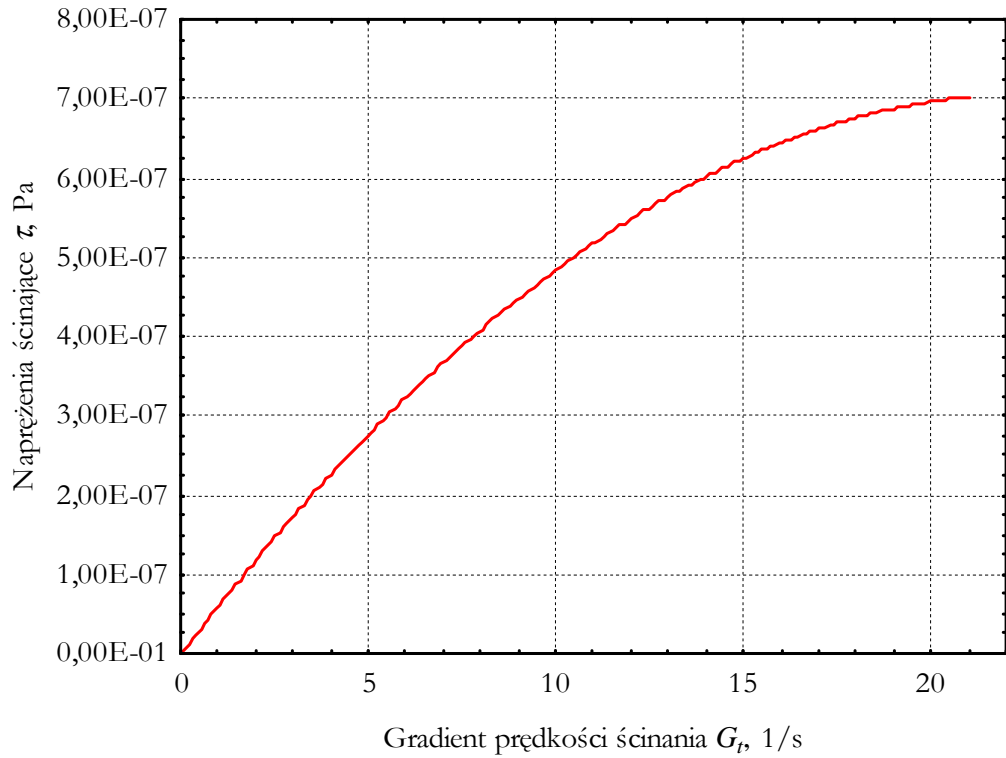
Rys. 4.14. Wykres naprężeń ścinających τ w funkcji gradientu prędkości ścinania G_t receptury 1NA zawiesiny płynnej



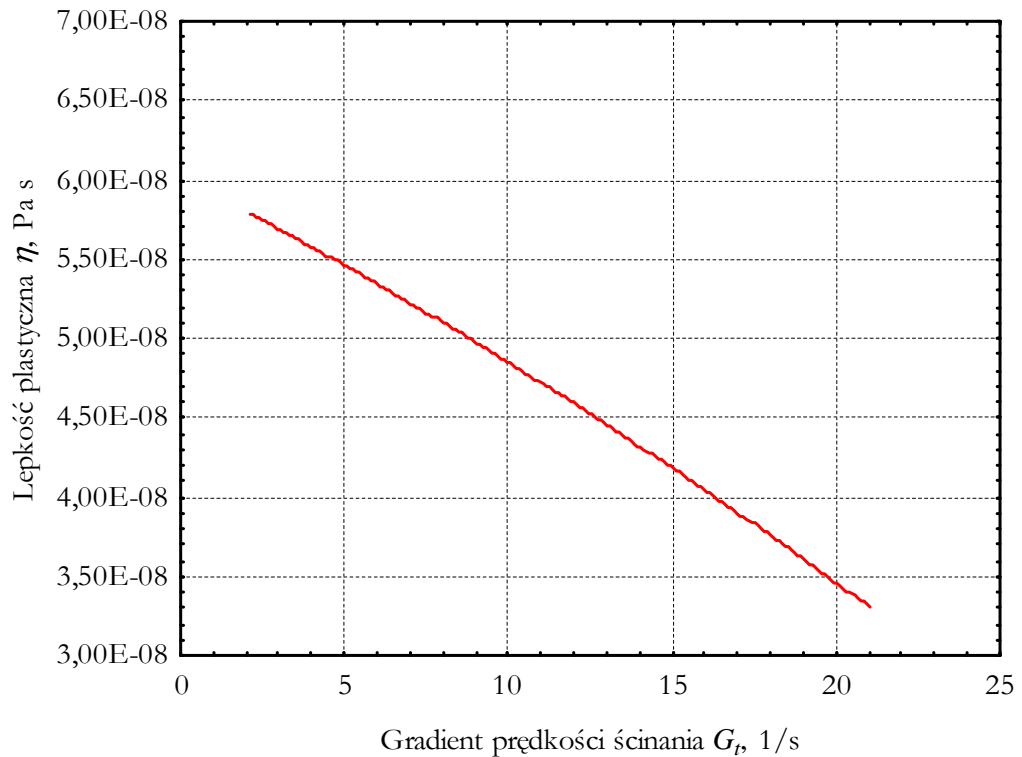
Rys. 4.15. Lepkość plastyczna η w funkcji gradientu prędkości ścinania G_t receptury 1NA zawiesiny płynnej

Tabela 4.11. Wyniki badań reologicznych w wiskozymetrze obrotowym receptury 2 zawiesiny płynnej wykonanej z nieaktywowanym popiołem lotnym z węgla brunatnego

Zadana prędkość obrotowa RPM , obr./min	Procent momentu skręcającego %M , -	Moment skręcający M , N·m	Prędkość kątowna ω , 1/s	Gradient techniczny G_t , 1/s	Napężenia ścinające τ , Pa	Lepkość plastyczna η , Pa·s
1	2	3	4	5	6	7
10	18,10	$1,22 \cdot 10^{-5}$	1,05	2,10	$1,37 \cdot 10^{-8}$	$6,52 \cdot 10^{-8}$
20	31,20	$2,10 \cdot 10^{-5}$	2,09	4,20	$2,36 \cdot 10^{-7}$	$5,62 \cdot 10^{-8}$
30	47,20	$3,18 \cdot 10^{-5}$	3,14	6,30	$3,57 \cdot 10^{-7}$	$5,67 \cdot 10^{-8}$
40	57,10	$3,85 \cdot 10^{-5}$	4,19	8,40	$4,32 \cdot 10^{-7}$	$5,15 \cdot 10^{-8}$
50	68,00	$4,58 \cdot 10^{-5}$	5,23	10,50	$5,15 \cdot 10^{-7}$	$4,90 \cdot 10^{-8}$
60	76,70	$5,17 \cdot 10^{-5}$	6,28	12,60	$5,81 \cdot 10^{-7}$	$4,61 \cdot 10^{-8}$
70	83,00	$5,59 \cdot 10^{-5}$	7,33	14,70	$6,28 \cdot 10^{-7}$	$4,27 \cdot 10^{-8}$
80	84,20	$5,67 \cdot 10^{-5}$	8,37	16,80	$6,37 \cdot 10^{-7}$	$3,79 \cdot 10^{-8}$
90	92,20	$6,21 \cdot 10^{-5}$	9,42	18,90	$6,98 \cdot 10^{-7}$	$3,69 \cdot 10^{-8}$
100	93,30	$6,29 \cdot 10^{-5}$	10,47	21,00	$7,06 \cdot 10^{-7}$	$3,36 \cdot 10^{-8}$
90	91,70	$6,18 \cdot 10^{-5}$	9,42	18,90	$6,94 \cdot 10^{-7}$	$3,67 \cdot 10^{-8}$
80	83,60	$5,63 \cdot 10^{-5}$	8,37	16,80	$6,33 \cdot 10^{-7}$	$3,77 \cdot 10^{-8}$
70	81,20	$5,47 \cdot 10^{-5}$	7,33	14,70	$6,15 \cdot 10^{-7}$	$4,18 \cdot 10^{-8}$
60	74,10	$4,99 \cdot 10^{-5}$	6,28	12,60	$5,61 \cdot 10^{-7}$	$4,45 \cdot 10^{-8}$
50	66,00	$4,45 \cdot 10^{-5}$	5,23	10,50	$5,00 \cdot 10^{-7}$	$4,76 \cdot 10^{-8}$
40	53,20	$3,58 \cdot 10^{-5}$	4,19	8,40	$4,03 \cdot 10^{-7}$	$4,79 \cdot 10^{-8}$
30	44,40	$2,99 \cdot 10^{-5}$	3,14	6,30	$3,36 \cdot 10^{-7}$	$5,34 \cdot 10^{-8}$
20	28,90	$1,95 \cdot 10^{-5}$	2,09	4,20	$2,19 \cdot 10^{-7}$	$5,21 \cdot 10^{-8}$
10	14,10	$9,50 \cdot 10^{-6}$	1,05	2,10	$1,07 \cdot 10^{-7}$	$5,08 \cdot 10^{-8}$



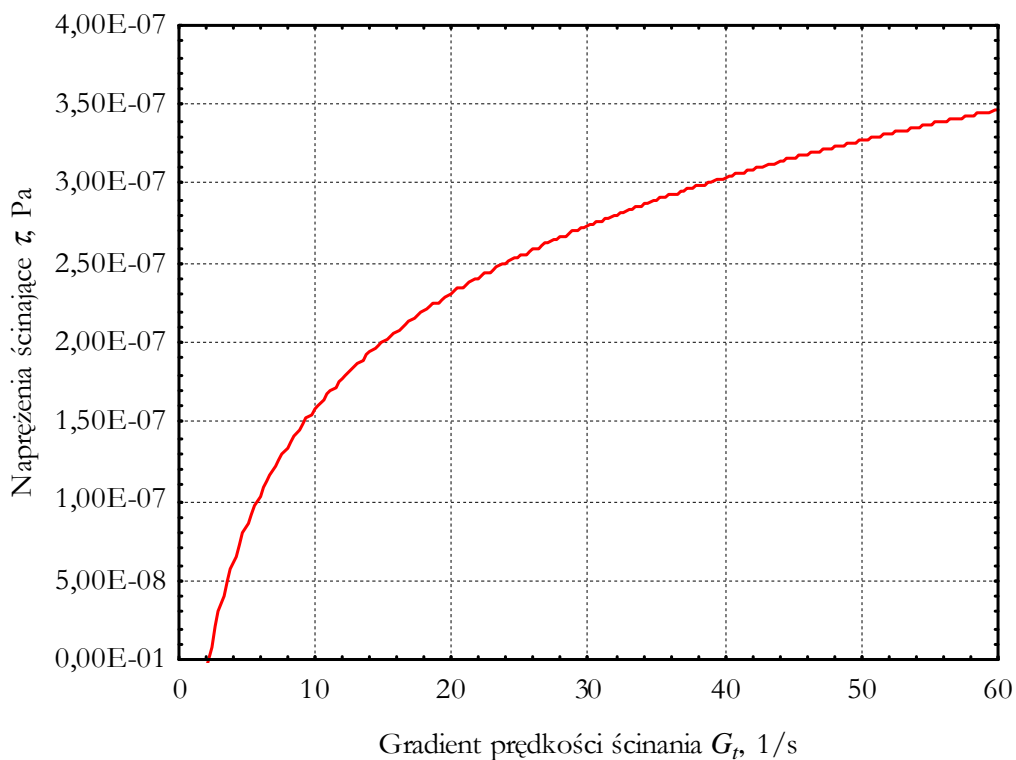
Rys. 4.16. Wykres naprężeń ścinających τ w funkcji gradientu prędkości ścinania G_t receptury 2NA zawiesiny płynnej



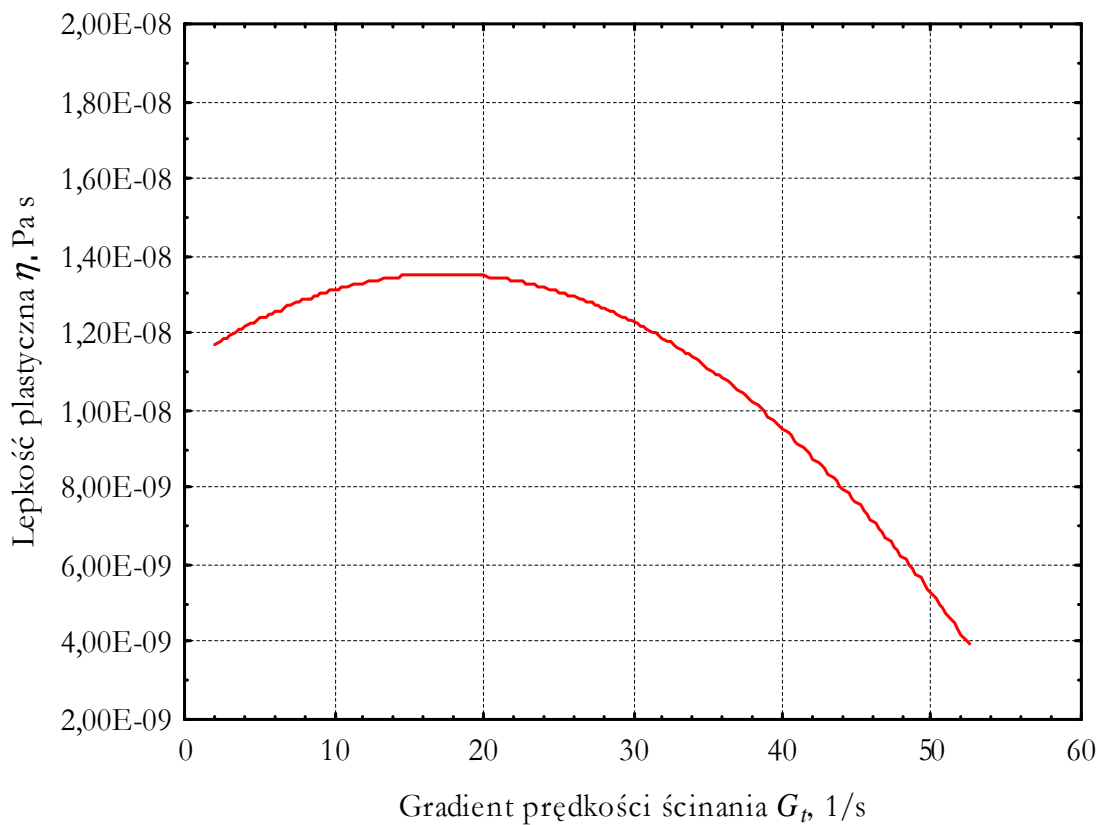
Rys. 4.17. Lepkość plastyczna η w funkcji gradientu prędkości ścinania G_t receptury 2NA zawiesiny płynnej

Tabela 4.12. Wyniki badań reologicznych w wiskozymetrze obrotowym receptury 3 zawiesiny płynnej wykonanej z nieaktywowanym popiołem lotnym z węgla brunatnego

Zadana prędkość obrotowa RPM , obr./min	Procent momentu skręcającego %M , -	Moment skręcający M , N·m	Prędkość kątowna ω , 1/s	Gradient techniczny G_t , 1/s	Napężenia ścinające τ , Pa	Lepkość plastyczna η , Pa·s
1	2	3	4	5	6	7
10	2,70	$1,82 \cdot 10^{-6}$	1,05	2,10	$2,04 \cdot 10^{-8}$	$9,73 \cdot 10^{-9}$
20	6,20	$4,18 \cdot 10^{-6}$	2,09	4,20	$4,69 \cdot 10^{-8}$	$1,12 \cdot 10^{-8}$
30	11,70	$7,88 \cdot 10^{-6}$	3,14	6,30	$8,86 \cdot 10^{-8}$	$1,41 \cdot 10^{-8}$
40	17,70	$1,19 \cdot 10^{-5}$	4,19	8,40	$1,34 \cdot 10^{-7}$	$1,60 \cdot 10^{-8}$
50	23,40	$1,58 \cdot 10^{-5}$	5,23	10,50	$1,77 \cdot 10^{-7}$	$1,69 \cdot 10^{-8}$
60	30,50	$2,05 \cdot 10^{-5}$	6,28	12,60	$2,31 \cdot 10^{-7}$	$1,83 \cdot 10^{-8}$
70	32,40	$2,18 \cdot 10^{-5}$	7,33	14,70	$2,45 \cdot 10^{-7}$	$1,67 \cdot 10^{-8}$
80	31,50	$2,12 \cdot 10^{-5}$	8,37	16,80	$2,38 \cdot 10^{-7}$	$1,42 \cdot 10^{-8}$
90	29,70	$2,00 \cdot 10^{-5}$	9,42	18,90	$2,25 \cdot 10^{-7}$	$1,19 \cdot 10^{-8}$
100	29,80	$2,01 \cdot 10^{-5}$	10,47	21,00	$2,26 \cdot 10^{-7}$	$1,07 \cdot 10^{-8}$
200	39,50	$2,66 \cdot 10^{-5}$	20,93	42,00	$2,99 \cdot 10^{-7}$	$7,12 \cdot 10^{-9}$
250	46,90	$3,16 \cdot 10^{-5}$	26,17	52,50	$3,55 \cdot 10^{-7}$	$6,76 \cdot 10^{-9}$
200	38,90	$2,62 \cdot 10^{-5}$	20,93	42,00	$2,94 \cdot 10^{-7}$	$7,01 \cdot 10^{-9}$
100	27,60	$1,86 \cdot 10^{-5}$	10,47	21,00	$2,09 \cdot 10^{-7}$	$9,95 \cdot 10^{-9}$
90	27,00	$1,82 \cdot 10^{-5}$	9,42	18,90	$2,04 \cdot 10^{-7}$	$1,08 \cdot 10^{-8}$
80	26,90	$1,81 \cdot 10^{-5}$	8,37	16,80	$2,04 \cdot 10^{-7}$	$1,21 \cdot 10^{-8}$
70	26,50	$1,79 \cdot 10^{-5}$	7,33	14,70	$2,01 \cdot 10^{-7}$	$1,36 \cdot 10^{-8}$
60	25,50	$1,72 \cdot 10^{-5}$	6,28	12,60	$1,93 \cdot 10^{-7}$	$1,53 \cdot 10^{-8}$
50	22,70	$1,53 \cdot 10^{-5}$	5,23	10,50	$1,72 \cdot 10^{-7}$	$1,64 \cdot 10^{-8}$
40	15,10	$1,02 \cdot 10^{-5}$	4,19	8,40	$1,14 \cdot 10^{-7}$	$1,36 \cdot 10^{-8}$
30	10,30	$6,94 \cdot 10^{-6}$	3,14	6,30	$7,80 \cdot 10^{-8}$	$1,24 \cdot 10^{-8}$
20	5,80	$3,91 \cdot 10^{-6}$	2,09	4,20	$4,39 \cdot 10^{-8}$	$1,05 \cdot 10^{-8}$
10	1,70	$1,15 \cdot 10^{-6}$	1,05	2,10	$1,29 \cdot 10^{-8}$	$6,13 \cdot 10^{-9}$



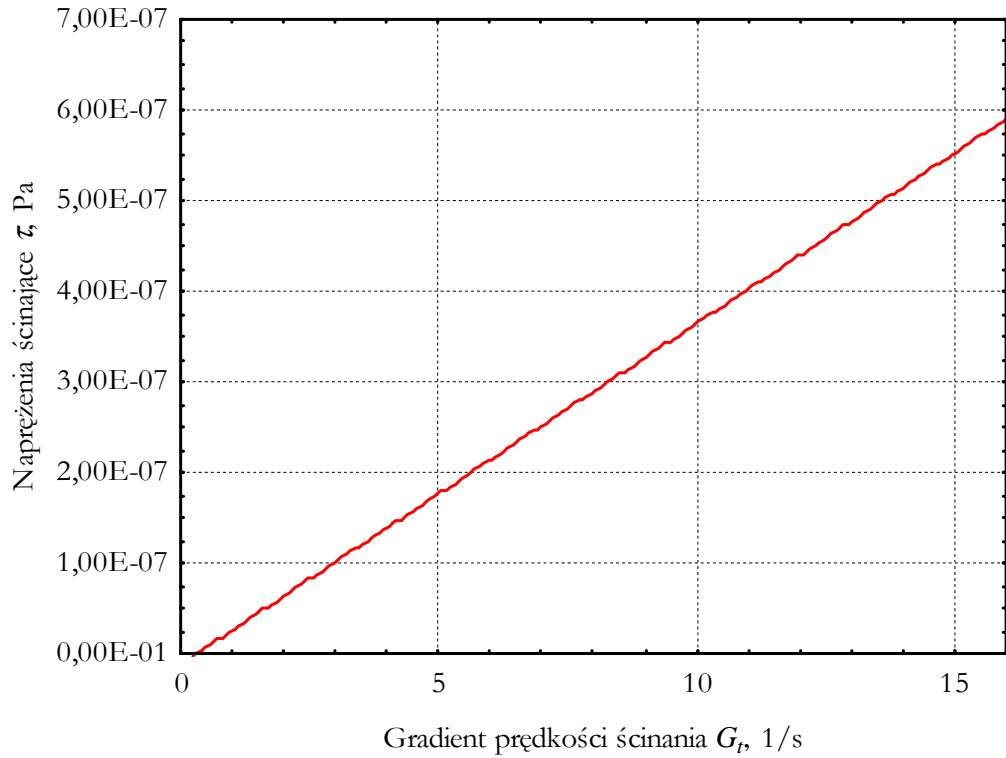
Rys. 4.18. Wykres naprężeń ścinających τ w funkcji gradientu prędkości ścinania G_t receptury 3NA zawiesiny płynnej



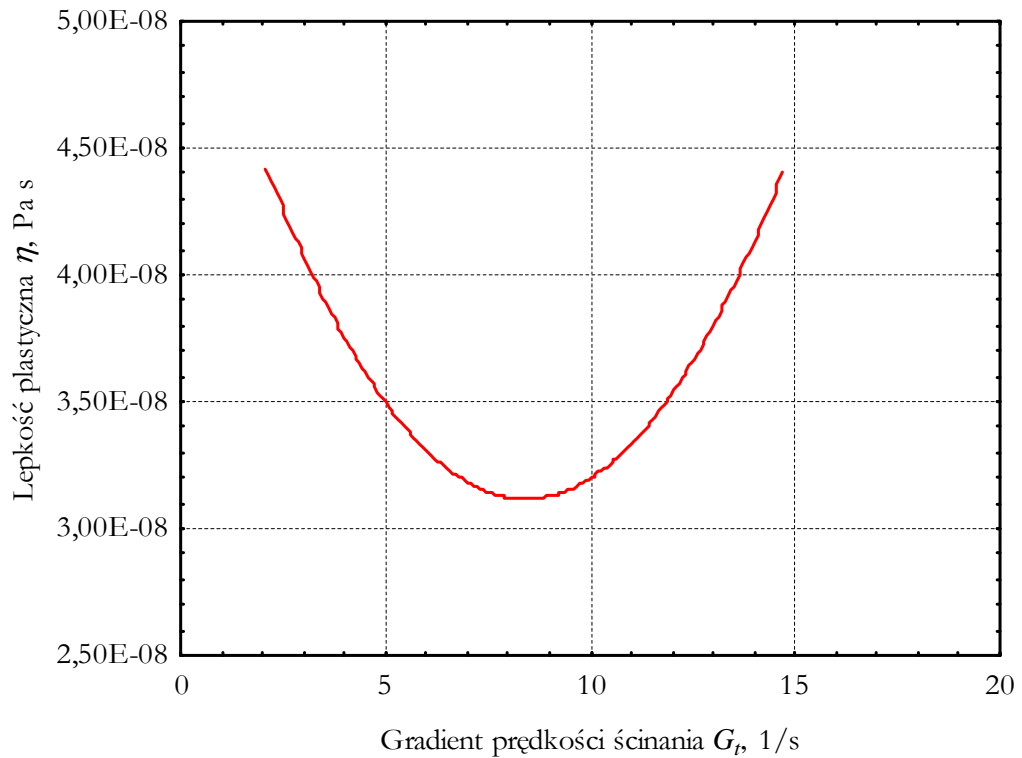
Rys. 4.19. Lepkość plastyczna η w funkcji gradientu prędkości ścinania G_t receptury 3NA zawiesiny płynnej

Tabela 4.13. Wyniki badań reologicznych w wiskozymetrze obrotowym receptury 4 zawiesiny płynnej wykonanej z nieaktywowanym popiołem lotnym z węgla brunatnego

Zadana prędkość obrotowa RPM , obr./min	Procent momentu skręcającego %M , -	Moment skręcający M , N·m	Prędkość kątowna ω , 1/s	Gradient techniczny G_t , 1/s	Napężenia ścinające τ , Pa	Lepkość plastyczna η , Pa·s
1	2	3	4	5	6	7
10	13,50	$9,09 \cdot 10^{-6}$	1,05	2,10	$1,02 \cdot 10^{-7}$	$4,87 \cdot 10^{-8}$
20	21,20	$1,43 \cdot 10^{-5}$	2,09	4,20	$1,60 \cdot 10^{-7}$	$3,82 \cdot 10^{-8}$
30	27,50	$1,85 \cdot 10^{-5}$	3,14	6,30	$2,08 \cdot 10^{-7}$	$3,30 \cdot 10^{-8}$
40	34,70	$2,34 \cdot 10^{-5}$	4,19	8,40	$2,63 \cdot 10^{-7}$	$3,13 \cdot 10^{-8}$
50	45,50	$3,07 \cdot 10^{-5}$	5,23	10,50	$3,44 \cdot 10^{-7}$	$3,28 \cdot 10^{-8}$
60	68,00	$4,58 \cdot 10^{-5}$	6,28	12,60	$5,15 \cdot 10^{-7}$	$4,09 \cdot 10^{-8}$
70	84,70	$5,71 \cdot 10^{-5}$	7,33	14,70	$6,41 \cdot 10^{-7}$	$4,36 \cdot 10^{-8}$
60	57,00	$3,84 \cdot 10^{-5}$	6,28	12,60	$4,32 \cdot 10^{-7}$	$3,42 \cdot 10^{-8}$
50	44,00	$2,96 \cdot 10^{-5}$	5,23	10,50	$3,33 \cdot 10^{-7}$	$3,17 \cdot 10^{-8}$
40	33,20	$2,24 \cdot 10^{-5}$	4,19	8,40	$2,51 \cdot 10^{-7}$	$2,99 \cdot 10^{-8}$
30	26,90	$1,81 \cdot 10^{-5}$	3,14	6,30	$2,04 \cdot 10^{-7}$	$3,23 \cdot 10^{-8}$
20	20,70	$1,39 \cdot 10^{-5}$	2,09	4,20	$1,57 \cdot 10^{-7}$	$3,73 \cdot 10^{-8}$
10	10,80	$7,28 \cdot 10^{-6}$	1,05	2,10	$8,18 \cdot 10^{-8}$	$3,89 \cdot 10^{-9}$



Rys. 4.20. Wykres naprężeń ścinających τ w funkcji gradientu prędkości ścinania G_t receptury 4NA zawiesiny płynnej



Rys. 4.21. Lepkość plastyczna η w funkcji gradientu prędkości ścinania G_t receptury 4NA zawiesiny płynnej

Załącznik 2

Wyniki badań zawiesiny stwardniałej

Tabela 5.1. Właściwości mechaniczne i filtracyjne zawiesiny stwardniałej wykonanej z udziałem nieaktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (ozn. NA)

Receptura	Ilość dni twardnienia	Gęstość objętościowa ρ_{st} , g/cm ³		Wytrzymałość na ściskanie f_c , MPa		Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu f_t , MPa		Przewodność hydrauliczna k_{10} , m/s	
1	2	3		4		5		6	
1NA	14	1,26	1,29 (0,04)	0,26	0,25 (0,01)	0,04	0,04 (0,01)	1,89·10 ⁻⁷	1,56·10 ⁻⁷ (2,86·10 ⁻⁸)
		1,33		0,25		0,04		1,43·10 ⁻⁷	
		1,27		0,24		0,03		1,37·10 ⁻⁷	
	28	1,23	1,26 (0,03)	0,34	0,37 (0,03)	0,10	0,09 (0,03)	2,02·10 ⁻⁷	1,56·10 ⁻⁷ (4,04·10 ⁻⁸)
		1,29		0,39		0,11		1,26·10 ⁻⁷	
		1,26		0,38		0,05		1,39·10 ⁻⁷	
	60	1,25	1,26 (0,01)	0,40	0,40 (0,00)	0,10	0,08 (0,02)	1,40·10 ⁻⁷	1,34·10 ⁻⁷ (2,52·10 ⁻⁸)
		1,26		0,40		0,09		1,55·10 ⁻⁷	
		-		-		0,05		1,06·10 ⁻⁷	
	120	1,25	1,24 (0,05)	0,43	0,48 (0,12)	0,11	0,14 (0,04)	1,07·10 ⁻⁷	1,09·10 ⁻⁷ (1,87·10 ⁻⁸)
		1,18		0,39		0,12		9,20·10 ⁻⁸	
		1,28		0,61		0,19		1,29·10 ⁻⁷	
2NA	14	1,16	1,17 (0,01)	0,37	0,34 (0,03)	0,06	0,05 (0,01)	4,60·10 ⁻⁸	7,48·10 ⁻⁸ (5,40·10 ⁻⁸)
		1,17		0,35		0,04		1,37·10 ⁻⁷	
		1,17		0,31		0,06		4,13·10 ⁻⁸	
	28	1,24	1,18 (0,06)	0,56	0,52 (0,05)	0,10	0,12 (0,02)	9,08·10 ⁻¹⁰	1,07·10 ⁻⁹ (2,34·10 ⁻¹⁰)
		1,12		0,47		0,11		1,24·10 ⁻⁹	
		1,19		0,53		0,13		-	
	60	1,18	1,17 (0,01)	0,73	0,57 (0,14)	0,16	0,15 (0,02)	3,83·10 ⁻⁹	1,98·10 ⁻⁹ (1,61·10 ⁻⁹)
		1,17		0,49		0,12		8,75·10 ⁻¹⁰	
		1,17		0,49		0,16		1,23·10 ⁻⁹	
	120	1,24	1,24 (0,00)	0,73	0,75 (0,02)	0,21	0,17 (0,03)	2,43·10 ⁻¹⁰	4,99·10 ⁻¹⁰ (3,61·10 ⁻¹⁰)
		1,24		0,77		0,16		7,54·10 ⁻¹⁰	
		1,24		0,75		0,15		-	
3NA	14	1,34	1,33 (0,01)	0,66	0,66 (0,08)	0,06	0,11 (0,04)	5,04·10 ⁻⁹	4,23·10 ⁻⁹ (8,47·10 ⁻¹⁰)
		1,32		0,58		0,13		3,35·10 ⁻⁹	
		1,34		0,74		0,14		4,29·10 ⁻⁹	
	28	1,37	1,35 (0,03)	1,61	1,62 (0,02)	0,23	0,22 (0,01)	6,32·10 ⁻¹⁰	6,35·10 ⁻¹⁰ (8,57·10 ⁻¹²)
		1,32		1,65		0,20		6,28·10 ⁻¹⁰	
		1,35		1,61		0,22		6,45·10 ⁻¹⁰	
	60	1,29	1,31 (0,02)	1,57	2,14 (0,49)	0,32	0,31 (0,09)	7,09·10 ⁻¹⁰	6,19·10 ⁻¹⁰ (7,82·10 ⁻¹¹)
		1,33		2,35		0,39		5,75·10 ⁻¹⁰	
		1,31		2,49		0,21		5,73·10 ⁻¹⁰	
	120	1,37	1,33 (0,03)	2,64	2,64 (0,44)	0,44	0,28 (0,14)	3,30·10 ⁻¹⁰	9,00·10 ⁻¹⁰ (4,98·10 ⁻¹⁰)
		1,32		2,21		0,20		1,25·10 ⁻⁹	
		1,31		3,08		0,19		1,12·10 ⁻⁹	

1	2	3		4		5		6	
4NA	14	1,38	1,39 (0,03)	1,79	1,77 (0,02)	0,30	0,24 (0,05)	$4,19 \cdot 10^{-9}$	$2,98 \cdot 10^{-9}$ ($1,78 \cdot 10^{-9}$)
		1,37		1,75		0,21		$3,82 \cdot 10^{-9}$	
		1,42		1,77		0,21		$9,31 \cdot 10^{-10}$	
	28	1,39	1,39 (0,00)	1,77	2,45 (0,59)	0,47	0,31 (0,16)	$2,94 \cdot 10^{-10}$	$4,95 \cdot 10^{-10}$ ($1,75 \cdot 10^{-10}$)
		1,38		2,69		0,33		$6,10 \cdot 10^{-10}$	
		1,39		2,88		0,14		$5,82 \cdot 10^{-10}$	
	60	1,40	1,39 (0,00)	2,96	3,28 (0,31)	0,39	0,30 (0,09)	$1,95 \cdot 10^{-11}$	$2,35 \cdot 10^{-10}$ ($1,91 \cdot 10^{-10}$)
		1,39		3,57		0,21		$3,04 \cdot 10^{-10}$	
		1,39		3,32		0,29		$3,81 \cdot 10^{-10}$	
	120	1,40	1,39 (0,01)	3,54	3,47 (0,26)	0,38	0,32 (0,10)	$1,62 \cdot 10^{-10}$	$4,40 \cdot 10^{-10}$ ($2,54 \cdot 10^{-10}$)
		1,38		3,18		0,37		$6,60 \cdot 10^{-10}$	
		-		-		0,21		$4,98 \cdot 10^{-10}$	
5NA	14	1,25	1,29 (0,04)	0,60	0,72 (0,24)	0,12	0,16 (0,03)	$1,28 \cdot 10^{-9}$	$5,01 \cdot 10^{-9}$ ($5,72 \cdot 10^{-9}$)
		1,33		0,57		0,18		$2,15 \cdot 10^{-9}$	
		1,31		0,99		0,17		$1,16 \cdot 10^{-8}$	
	28	1,26	1,28 (0,02)	1,19	1,27 (0,11)	0,18	0,23 (0,04)	$9,55 \cdot 10^{-10}$	$1,08 \cdot 10^{-9}$ ($1,63 \cdot 10^{-10}$)
		1,28		1,39		0,24		$1,26 \cdot 10^{-9}$	
		1,29		1,21		0,25		$1,01 \cdot 10^{-9}$	
	60	1,27	1,28 (0,02)	1,09	1,08 (0,18)	0,25	0,24 (0,02)	$1,34 \cdot 10^{-9}$	$3,74 \cdot 10^{-9}$ ($2,35 \cdot 10^{-10}$)
		1,30		1,25		0,22		$9,82 \cdot 10^{-10}$	
		1,28		0,90		0,25		$8,90 \cdot 10^{-9}$	
	120	1,30	1,32 (0,02)	1,57	1,42 (0,28)	0,44	0,37 (0,12)	$1,51 \cdot 10^{-10}$	$4,63 \cdot 10^{-10}$ ($2,84 \cdot 10^{-10}$)
		1,34		1,59		0,44		$7,04 \cdot 10^{-10}$	
		1,31		1,09		0,23		$5,35 \cdot 10^{-10}$	
6NA	14	1,31	1,30 (0,01)	0,90	0,95 (0,05)	0,10	0,12 (0,04)	$7,61 \cdot 10^{-10}$	$1,52 \cdot 10^{-9}$ ($7,34 \cdot 10^{-10}$)
		1,29		0,97		0,09		$1,57 \cdot 10^{-9}$	
		1,29		0,97		0,17		$2,23 \cdot 10^{-9}$	
	28	1,25	1,26 (0,01)	1,63	1,46 (0,16)	0,32	0,29 (0,03)	$3,00 \cdot 10^{-9}$	$1,76 \cdot 10^{-9}$ ($1,07 \cdot 10^{-9}$)
		1,25		1,43		0,27		$1,07 \cdot 10^{-9}$	
		1,27		1,31		0,27		$1,22 \cdot 10^{-9}$	
	60	1,30	1,30 (0,03)	1,80	1,47 (0,29)	0,28	0,29 (0,02)	$7,10 \cdot 10^{-10}$	$1,20 \cdot 10^{-9}$ ($5,94 \cdot 10^{-10}$)
		1,33		1,31		0,28		$1,86 \cdot 10^{-9}$	
		1,27		1,31		0,31		$1,02 \cdot 10^{-9}$	
	120	1,29	1,30 (0,02)	0,84	1,34 (0,45)	0,44	0,41 (0,03)	$2,80 \cdot 10^{-10}$	$4,44 \cdot 10^{-10}$ ($1,84 \cdot 10^{-10}$)
		1,32		1,69		0,38		$4,09 \cdot 10^{-10}$	
		1,30		1,49		0,40		$6,44 \cdot 10^{-10}$	

1	2	3	4	5	6				
7NA	14	1,22	1,22 (0,02)	0,14	0,13 (0,01)	0,02	0,02 (0,00)	$5,72 \cdot 10^{-8}$	$5,68 \cdot 10^{-8}$ ($9,52 \cdot 10^{-9}$)
		1,23		0,14		0,02		$6,61 \cdot 10^{-8}$	
		1,20		0,12		0,02		$4,71 \cdot 10^{-8}$	
	28	1,19	1,19 (0,00)	0,48	0,44 (0,03)	0,08	0,07 (0,01)	$3,97 \cdot 10^{-8}$	$8,99 \cdot 10^{-8}$ ($6,62 \cdot 10^{-8}$)
		1,19		0,45		0,07		$1,65 \cdot 10^{-7}$	
		1,18		0,41		0,06		$6,49 \cdot 10^{-8}$	
	60	1,22	1,23 (0,01)	0,54	0,53 (0,01)	0,10	0,11 (0,01)	$3,55 \cdot 10^{-9}$	$9,86 \cdot 10^{-9}$ ($7,84 \cdot 10^{-9}$)
		1,24		0,51		0,11		$7,42 \cdot 10^{-9}$	
		1,23		0,53		0,11		$1,86 \cdot 10^{-8}$	
	120	1,25	1,26 (0,01)	0,63	0,64 (0,09)	0,10	0,14 (0,04)	$2,24 \cdot 10^{-9}$	$1,35 \cdot 10^{-9}$ ($7,89 \cdot 10^{-10}$)
		1,26		0,55		0,17		$1,07 \cdot 10^{-9}$	
		1,26		0,73		0,17		$7,45 \cdot 10^{-10}$	
8NA	14	1,37	1,37 (0,01)	0,99	0,94 (0,07)	0,16	0,15 (0,03)	$6,47 \cdot 10^{-10}$	$7,08 \cdot 10^{-10}$ ($6,75 \cdot 10^{-11}$)
		1,36		0,95		0,11		$6,97 \cdot 10^{-10}$	
		1,37		0,86		0,17		$7,81 \cdot 10^{-10}$	
	28	1,38	1,36 (0,02)	2,47	2,22 (0,27)	0,30	0,30 (0,10)	$1,13 \cdot 10^{-9}$	$1,93 \cdot 10^{-9}$ ($1,13 \cdot 10^{-9}$)
		1,34		2,25		0,21		$2,73 \cdot 10^{-9}$	
		1,35		1,93		0,40		-	
	60	1,37	1,37 (0,02)	2,69	2,60 (0,08)	0,49	0,45 (0,04)	$6,25 \cdot 10^{-10}$	$7,79 \cdot 10^{-10}$ ($1,34 \cdot 10^{-10}$)
		1,35		2,55		0,41		$8,63 \cdot 10^{-10}$	
		1,38		2,55		0,45		$8,49 \cdot 10^{-10}$	
	120	1,36	1,37 (0,01)	2,90	2,82 (0,30)	0,28	0,48 (0,18)	$2,11 \cdot 10^{-10}$	$0,93 \cdot 10^{-9}$ ($1,17 \cdot 10^{-9}$)
		1,36		3,07		0,63		$1,58 \cdot 10^{-9}$	
		1,38		2,49		0,52		$1,00 \cdot 10^{-9}$	
9NA	14	1,23	1,24 (0,02)	0,31	0,33 (0,04)	0,07	0,06 (0,01)	$1,79 \cdot 10^{-8}$	$8,82 \cdot 10^{-9}$ ($7,87 \cdot 10^{-9}$)
		1,26		0,37		0,04		$4,97 \cdot 10^{-9}$	
		1,22		0,31		0,06		$3,60 \cdot 10^{-9}$	
	28	1,24	1,25 (0,01)	0,55	0,56 (0,04)	0,11	0,12 (0,02)	$1,45 \cdot 10^{-9}$	$7,31 \cdot 10^{-9}$ ($8,84 \cdot 10^{-9}$)
		1,25		0,61		0,15		$2,67 \cdot 10^{-9}$	
		1,25		0,53		0,11		$1,73 \cdot 10^{-8}$	
	60	1,26	1,27 (0,01)	1,18	1,05 (0,24)	0,05	0,08 (0,03)	$5,19 \cdot 10^{-9}$	$2,44 \cdot 10^{-9}$ ($2,41 \cdot 10^{-9}$)
		1,27		1,20		0,08		$1,45 \cdot 10^{-9}$	
		1,27		0,77		0,12		$6,90 \cdot 10^{-10}$	
	120	1,25	1,26 (0,00)	1,29	1,33 (0,07)	0,16	0,15 (0,01)	$5,65 \cdot 10^{-9}$	$2,64 \cdot 10^{-9}$ ($2,61 \cdot 10^{-9}$)
		1,26		1,41		0,15		$9,24 \cdot 10^{-10}$	
		1,26		1,29		0,15		$1,34 \cdot 10^{-9}$	

1	2	3		4		5		6	
10NA	14	1,29	1,32 (0,03)	0,86	0,95 (0,10)	0,15	0,15 (0,01)	$2,91 \cdot 10^{-9}$	$4,37 \cdot 10^{-9}$ ($1,63 \cdot 10^{-9}$)
		1,33		0,94		0,15		$4,06 \cdot 10^{-9}$	
		1,34		1,06		0,16		$6,13 \cdot 10^{-9}$	
	28	1,33	1,33 (0,01)	1,31	1,42 (0,10)	0,20	0,18 (0,08)	$5,72 \cdot 10^{-9}$	$3,05 \cdot 10^{-9}$ ($2,48 \cdot 10^{-9}$)
		1,32		1,49		0,10		$8,23 \cdot 10^{-10}$	
		1,34		1,47		0,25		$2,62 \cdot 10^{-9}$	
	60	1,32	1,34 (0,02)	1,93	1,96 (0,11)	0,20	0,20 (0,02)	$5,64 \cdot 10^{-10}$	$1,20 \cdot 10^{-9}$ ($8,75 \cdot 10^{-10}$)
		1,35		2,08		0,18		$8,47 \cdot 10^{-10}$	
		1,34		1,86		0,23		$2,20 \cdot 10^{-9}$	
	120	1,37	1,37 (0,01)	2,43	2,73 (0,43)	0,27	0,22 (0,07)	$6,07 \cdot 10^{-10}$	$8,05 \cdot 10^{-10}$ ($4,42 \cdot 10^{-10}$)
		1,36		3,04		0,17		$1,31 \cdot 10^{-9}$	
		-		-		-		$4,99 \cdot 10^{-10}$	
11NA	14	1,28	1,29 (0,01)	0,66	0,67 (0,02)	0,08	0,09 (0,03)	$7,88 \cdot 10^{-10}$	$9,49 \cdot 10^{-10}$ ($1,58 \cdot 10^{-10}$)
		1,31		0,70		0,12		$9,59 \cdot 10^{-10}$	
		1,30		0,65		0,08		$1,10 \cdot 10^{-9}$	
	28	1,27	1,28 (0,01)	0,80	0,85 (0,11)	0,14	0,11 (0,02)	$3,22 \cdot 10^{-10}$	$8,09 \cdot 10^{-10}$ ($4,85 \cdot 10^{-10}$)
		1,27		0,97		0,09		$1,29 \cdot 10^{-9}$	
		1,29		0,78		0,11		$8,14 \cdot 10^{-10}$	
	60	1,30	1,30 (0,00)	1,87	1,70 (0,15)	0,16	0,16 (0,02)	$4,47 \cdot 10^{-9}$	$2,01 \cdot 10^{-9}$ ($2,14 \cdot 10^{-9}$)
		1,30		1,57		0,18		$8,36 \cdot 10^{-10}$	
		1,30		1,65		0,13		$7,16 \cdot 10^{-10}$	
	120	1,29	1,31 (0,02)	2,23	2,31 (0,09)	0,13	0,16 (0,06)	$8,45 \cdot 10^{-11}$	$5,23 \cdot 10^{-10}$ ($3,81 \cdot 10^{-10}$)
		1,33		2,41		0,23		$7,72 \cdot 10^{-10}$	
		1,32		2,29		0,12		$7,12 \cdot 10^{-10}$	

Uwaga: w nawiasach podano odchylenie standardowe średniej poszczególnych parametrów

Tabela 5.2. Właściwości mechaniczne i filtracyjne zawiesiny stwardniałej wykonanej z udziałem aktywowanego mechanicznie popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (ozn. PA)

Receptura	Ilość dni twardnienia	Gęstość objętościowa ρ_{st} , g/cm ³		Wytrzymałość na ściskanie f_c , MPa		Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu f_t , MPa		Przewodność hydrauliczna k_{10} , m/s	
1	2	3		4		5		6	
1PA	14	1,24	1,27 (0,02)	0,16	0,20 (0,09)	0,08	0,07 (0,02)	1,90·10 ⁻⁷	2,33·10 ⁻⁷ (5,59·10 ⁻⁸)
		1,29		0,14		0,05		2,96·10 ⁻⁷	
		1,28		0,31		0,07		2,13·10 ⁻⁷	
	28	1,21	1,23 (0,04)	0,25	0,25 (0,01)	0,07	0,09 (0,01)	1,79·10 ⁻⁷	1,98·10 ⁻⁷ (1,73·10 ⁻⁸)
		1,20		0,24		0,09		2,02·10 ⁻⁷	
		1,28		0,24		0,09		2,12·10 ⁻⁷	
	60	1,21	1,22 (0,01)	0,54	0,53 (0,04)	0,13	0,11 (0,01)	1,01·10 ⁻⁷	1,09·10 ⁻⁷ (8,59·10 ⁻⁹)
		1,21		0,56		0,11		1,07·10 ⁻⁷	
		1,23		0,48		0,11		1,18·10 ⁻⁷	
	120	1,28	1,26 (0,06)	0,76	0,74 (0,08)	0,21	0,15 (0,09)	3,38·10 ⁻⁸	7,54·10 ⁻⁸ (5,52·10 ⁻⁸)
		1,30		0,82		0,08		5,45·10 ⁻⁸	
		1,19		0,65		-		1,38·10 ⁻⁷	
2PA	14	1,18	1,17 (0,01)	0,23	0,21 (0,03)	0,05	0,04 (0,02)	1,39·10 ⁻⁷	9,28·10 ⁻⁸ (4,31·10 ⁻⁸)
		1,17		0,23		0,02		5,39·10 ⁻⁸	
		1,17		0,18		0,04		8,56·10 ⁻⁸	
	28	1,17	1,15 (0,01)	0,47	0,51 (0,09)	0,06	0,06 (0,01)	6,85·10 ⁻⁹	3,14·10 ⁻⁸ (2,16·10 ⁻⁸)
		1,14		0,61		0,05		4,76·10 ⁻⁸	
		1,15		0,46		0,08		3,96·10 ⁻⁸	
	60	1,16	1,16 (0,00)	0,69	0,69 (0,15)	0,14	0,12 (0,04)	7,52·10 ⁻⁹	3,13·10 ⁻⁹ (3,83·10 ⁻⁹)
		1,16		0,53		0,15		7,69·10 ⁻¹⁰	
		1,16		0,84		0,07		1,09·10 ⁻⁹	
	120	1,18	1,18 (0,01)	0,69	0,75 (0,09)	0,09	0,09 (0,00)	3,45·10 ⁻¹⁰	3,88·10 ⁻⁹ (5,00·10 ⁻⁹)
		1,18		0,82		0,09		1,68·10 ⁻⁹	
		-		-		-		9,60·10 ⁻⁹	
3PA	14	1,30	1,31 (0,03)	1,05	0,99 (0,14)	0,08	0,10 (0,02)	4,77·10 ⁻¹⁰	1,14·10 ⁻⁹ (5,83·10 ⁻¹⁰)
		1,34		1,09		0,12		1,38·10 ⁻⁹	
		1,29		0,83		0,10		1,57·10 ⁻⁹	
	28	1,33	1,33 (0,01)	1,15	1,21 (0,08)	0,23	0,26 (0,04)	4,71·10 ⁻¹⁰	6,59·10 ⁻¹⁰ (1,90·10 ⁻¹⁰)
		1,33		1,29		0,30		6,57·10 ⁻¹⁰	
		1,32		1,17		0,24		8,50·10 ⁻¹⁰	
	60	1,32	1,33 (0,02)	1,35	1,51 (0,49)	0,13	0,21 (0,08)	4,87·10 ⁻¹⁰	6,47·10 ⁻¹⁰ (1,41·10 ⁻¹⁰)
		1,32		1,11		0,21		7,52·10 ⁻¹⁰	
		1,35		2,06		0,29		7,03·10 ⁻¹⁰	
	120	1,36	1,32 (0,04)	2,04	2,14 (0,32)	0,39	0,31 (0,11)	3,42·10 ⁻¹⁰	4,29·10 ⁻¹⁰ (7,64·10 ⁻¹¹)
		1,34		2,50		0,23		4,62·10 ⁻¹⁰	
		1,28		1,88		-		4,84·10 ⁻¹⁰	

1	2	3		4		5		6	
4PA	14	1,38	1,37 (0,04)	2,45	2,38 (0,17)	0,15	0,18 (0,03)	$8,65 \cdot 10^{-10}$	$1,18 \cdot 10^{-9}$ ($4,68 \cdot 10^{-10}$)
		1,34		2,19		0,18		$1,72 \cdot 10^{-9}$	
		1,41		2,51		0,21		$9,69 \cdot 10^{-10}$	
	28	1,35	1,36 (0,02)	2,59	2,37 (0,19)	0,47	0,29 (0,16)	$3,10 \cdot 10^{-10}$	$6,41 \cdot 10^{-10}$ ($2,87 \cdot 10^{-10}$)
		1,38		2,22		0,19		$8,08 \cdot 10^{-10}$	
		1,36		2,29		0,20		$8,05 \cdot 10^{-10}$	
	60	1,39	1,39 (0,01)	2,92	2,63 (0,60)	0,59	0,47 (0,16)	$1,09 \cdot 10^{-9}$	$6,84 \cdot 10^{-10}$ ($3,55 \cdot 10^{-10}$)
		1,40		3,02		0,29		$5,26 \cdot 10^{-10}$	
		1,38		1,94		0,55		$4,35 \cdot 10^{-10}$	
	120	1,36	1,37 (0,00)	2,19	2,33 (0,47)	0,20	0,19 (0,01)	$5,69 \cdot 10^{-10}$	$6,28 \cdot 10^{-10}$ ($5,25 \cdot 10^{-11}$)
		1,37		1,95		0,19		$6,47 \cdot 10^{-10}$	
		1,37		2,86		-		$6,68 \cdot 10^{-10}$	
5PA	14	1,32	1,32 (0,00)	0,76	0,74 (0,04)	0,11	0,12 (0,02)	$5,56 \cdot 10^{-10}$	$1,05 \cdot 10^{-9}$ ($4,54 \cdot 10^{-10}$)
		1,32		0,78		0,15		$1,45 \cdot 10^{-9}$	
		1,31		0,70		0,10		$1,14 \cdot 10^{-9}$	
	28	1,31	1,32 (0,01)	0,99	1,32 (0,30)	0,21	0,18 (0,02)	$2,39 \cdot 10^{-10}$	$6,69 \cdot 10^{-10}$ ($3,72 \cdot 10^{-10}$)
		1,32		1,59		0,18		$8,78 \cdot 10^{-10}$	
		1,33		1,37		0,16		$8,90 \cdot 10^{-10}$	
	60	1,35	1,34 (0,01)	2,06	2,08 (0,26)	0,26	0,22 (0,03)	$4,51 \cdot 10^{-10}$	$7,77 \cdot 10^{-10}$ ($2,88 \cdot 10^{-10}$)
		1,33		2,35		0,22		$9,93 \cdot 10^{-10}$	
		1,33		1,83		0,19		$8,92 \cdot 10^{-10}$	
	120	1,33	1,33 (0,02)	2,79	2,65 (0,61)	0,24	0,23 (0,01)	$1,26 \cdot 10^{-10}$	$3,38 \cdot 10^{-10}$ ($1,84 \cdot 10^{-10}$)
		1,32		1,99		0,22		$4,49 \cdot 10^{-10}$	
		1,36		3,18		-		$4,38 \cdot 10^{-10}$	
6PA	14	1,27	1,27 (0,00)	0,95	0,90 (0,06)	0,09	0,08 (0,01)	$5,32 \cdot 10^{-10}$	$8,35 \cdot 10^{-10}$ ($2,62 \cdot 10^{-10}$)
		1,27		0,84		0,07		$9,78 \cdot 10^{-10}$	
		1,27		0,92		0,09		$9,94 \cdot 10^{-10}$	
	28	1,30	1,28 (0,02)	1,45	1,54 (0,17)	0,15	0,17 (0,02)	$2,43 \cdot 10^{-10}$	$0,86 \cdot 10^{-9}$ ($6,24 \cdot 10^{-10}$)
		1,30		1,73		0,18		$1,49 \cdot 10^{-9}$	
		1,26		1,42		0,17		$8,33 \cdot 10^{-10}$	
	60	1,35	1,34 (0,01)	2,51	2,88 (0,33)	0,28	0,25 (0,10)	$3,17 \cdot 10^{-10}$	$0,75 \cdot 10^{-9}$ ($3,82 \cdot 10^{-10}$)
		1,34		2,96		0,14		$1,01 \cdot 10^{-9}$	
		1,34		3,16		0,33		$9,46 \cdot 10^{-10}$	
	120	1,29	1,30 (0,01)	3,49	3,54 (0,06)	0,22	0,18 (0,05)	$1,33 \cdot 10^{-10}$	$5,94 \cdot 10^{-10}$ ($4,11 \cdot 10^{-10}$)
		1,31		3,58		0,15		$9,24 \cdot 10^{-10}$	
		-		-		-		$7,24 \cdot 10^{-10}$	

1	2	3		4		5		6	
7PA	14	1,24	1,21 (0,03)	0,20	0,18 (0,02)	0,02	0,03 (0,01)	$5,63 \cdot 10^{-8}$	$4,97 \cdot 10^{-8}$ ($6,40 \cdot 10^{-9}$)
		1,21		0,18		0,03		$4,35 \cdot 10^{-8}$	
		1,18		0,16		0,04		$4,93 \cdot 10^{-8}$	
	28	1,21	1,23 (0,02)	0,31	0,28 (0,03)	0,05	0,05 (0,01)	$1,63 \cdot 10^{-8}$	$1,55 \cdot 10^{-8}$ ($4,91 \cdot 10^{-9}$)
		1,25		0,24		0,06		$1,03 \cdot 10^{-8}$	
		1,22		0,28		0,03		$2,00 \cdot 10^{-8}$	
	60	1,20	1,20 (0,01)	0,74	0,73 (0,03)	0,09	0,12 (0,03)	$4,16 \cdot 10^{-10}$	$1,14 \cdot 10^{-9}$ ($6,58 \cdot 10^{-10}$)
		1,22		0,70		0,13		$1,70 \cdot 10^{-9}$	
		1,20		0,76		0,14		$1,32 \cdot 10^{-9}$	
	120	1,22	1,21 (0,02)	0,99	0,95 (0,06)	0,28	0,21 (0,09)	$2,34 \cdot 10^{-10}$	$6,36 \cdot 10^{-10}$ ($3,50 \cdot 10^{-10}$)
		1,20		0,91		0,15		$8,70 \cdot 10^{-10}$	
		-		-		-		$8,04 \cdot 10^{-10}$	
8PA	14	1,38	1,37 (0,01)	1,41	1,29 (0,17)	0,11	0,15 (0,04)	$8,56 \cdot 10^{-10}$	$1,32 \cdot 10^{-10}$ ($4,22 \cdot 10^{-10}$)
		1,38		1,37		0,14		$1,40 \cdot 10^{-9}$	
		1,37		1,09		0,20		$1,69 \cdot 10^{-9}$	
	28	1,38	1,38 (0,00)	1,49	1,51 (0,22)	0,20	0,19 (0,03)	$4,40 \cdot 10^{-10}$	$8,11 \cdot 10^{-10}$ ($3,45 \cdot 10^{-10}$)
		1,38		1,29		0,15		$9,99 \cdot 10^{-10}$	
		1,38		1,73		0,20		$9,95 \cdot 10^{-10}$	
	60	1,36	1,36 (0,01)	2,07	1,82 (0,26)	0,18	0,20 (0,01)	$3,05 \cdot 10^{-10}$	$5,68 \cdot 10^{-10}$ ($2,63 \cdot 10^{-10}$)
		1,37		1,83		0,20		$5,70 \cdot 10^{-10}$	
		1,36		1,55		0,20		$8,30 \cdot 10^{-10}$	
	120	1,36	1,38 (0,02)	2,20	2,27 (0,24)	0,36	0,29 (0,11)	$7,42 \cdot 10^{-11}$	$3,66 \cdot 10^{-10}$ ($4,12 \cdot 10^{-10}$)
		1,38		1,85		0,21		$6,57 \cdot 10^{-10}$	
		1,40		2,75		-		-	
9PA	14	1,26	1,24 (0,02)	0,78	0,94 (0,25)	0,12	0,16 (0,04)	$1,02 \cdot 10^{-9}$	$1,08 \cdot 10^{-9}$ ($5,57 \cdot 10^{-11}$)
		1,22		1,22		0,17		$1,13 \cdot 10^{-9}$	
		1,24		0,82		0,20		$1,09 \cdot 10^{-9}$	
	28	1,25	1,24 (0,01)	1,43	1,41 (0,15)	0,27	0,17 (0,08)	$1,55 \cdot 10^{-9}$	$1,47 \cdot 10^{-9}$ ($8,00 \cdot 10^{-11}$)
		1,22		1,36		0,11		$1,47 \cdot 10^{-9}$	
		1,24		1,13		0,14		$1,39 \cdot 10^{-9}$	
	60	1,23	1,24 (0,01)	1,01	1,19 (0,54)	0,17	0,19 (0,05)	$5,78 \cdot 10^{-10}$	$0,91 \cdot 10^{-9}$ ($2,92 \cdot 10^{-10}$)
		1,26		0,76		0,16		$1,02 \cdot 10^{-9}$	
		1,25		1,79		0,24		$1,13 \cdot 10^{-9}$	
	120	1,24	1,27 (0,04)	1,23	1,38 (0,21)	0,19	0,23 (0,06)	$9,97 \cdot 10^{-11}$	$3,04 \cdot 10^{-10}$ ($2,89 \cdot 10^{-10}$)
		1,29		1,53		0,27		$5,09 \cdot 10^{-10}$	
		-		-		-		-	

1	2	3		4		5		6	
10PA	14	1,32	1,32 (0,01)	0,34	0,36 (0,07)	0,05	0,06 (0,01)	$1,04 \cdot 10^{-8}$	$1,17 \cdot 10^{-8}$ ($1,47 \cdot 10^{-9}$)
		1,33		0,44		0,05		$1,14 \cdot 10^{-8}$	
		1,31		0,30		0,07		$1,33 \cdot 10^{-8}$	
	28	1,29	1,30 (0,02)	0,36	0,56 (0,18)	0,08	0,07 (0,01)	$2,15 \cdot 10^{-9}$	$3,33 \cdot 10^{-9}$ ($1,03 \cdot 10^{-9}$)
		1,32		0,70		0,05		$3,75 \cdot 10^{-9}$	
		1,30		0,64		0,08		$4,09 \cdot 10^{-9}$	
	60	1,32	1,32 (0,00)	1,19	1,13 (0,11)	0,23	0,16 (0,06)	$4,83 \cdot 10^{-10}$	$1,41 \cdot 10^{-9}$ ($8,19 \cdot 10^{-10}$)
		1,32		0,99		0,13		$2,04 \cdot 10^{-9}$	
		1,32		1,19		0,12		$1,70 \cdot 10^{-9}$	
	120	1,34	1,33 (0,01)	1,89	1,94 (0,07)	0,29	0,28 (0,02)	$9,89 \cdot 10^{-11}$	$3,40 \cdot 10^{-10}$ ($2,11 \cdot 10^{-10}$)
		1,32		1,99		0,27		$4,85 \cdot 10^{-10}$	
		-		-		-		$4,37 \cdot 10^{-10}$	
11PA	14	1,32	1,31 (0,01)	0,86	0,80 (0,05)	0,09	0,10 (0,02)	$7,26 \cdot 10^{-10}$	$1,24 \cdot 10^{-9}$ ($5,34 \cdot 10^{-10}$)
		1,30		0,78		0,13		$1,21 \cdot 10^{-9}$	
		1,32		0,78		0,09		$1,79 \cdot 10^{-9}$	
	28	1,31	1,29 (0,02)	1,13	1,13 (0,02)	0,12	0,14 (0,04)	$3,36 \cdot 10^{-10}$	$0,74 \cdot 10^{-9}$ ($3,70 \cdot 10^{-10}$)
		1,26		1,11		0,18		$1,06 \cdot 10^{-9}$	
		1,30		1,15		0,11		$8,13 \cdot 10^{-10}$	
	60	1,28	1,30 (0,01)	1,84	1,66 (0,24)	0,14	0,15 (0,03)	$5,58 \cdot 10^{-10}$	$0,85 \cdot 10^{-9}$ ($2,73 \cdot 10^{-10}$)
		1,31		1,39		0,18		$1,08 \cdot 10^{-9}$	
		1,30		1,75		0,14		$9,12 \cdot 10^{-10}$	
	120	1,32	1,32 (0,02)	2,13	1,92 (0,29)	0,40	0,29 (0,15)	$1,15 \cdot 10^{-10}$	$0,82 \cdot 10^{-9}$ ($7,03 \cdot 10^{-10}$)
		1,34		2,04		0,19		$1,52 \cdot 10^{-9}$	
		1,31		1,59		-		$8,34 \cdot 10^{-10}$	

Uwaga: w nawiasach podano odchylenie standardowe średniej poszczególnych parametrów

Tabela 5.3. Właściwości mechaniczne i filtracyjne zawiesiny stwardniałej wykonanej z udziałem aktywowanego mechanicznie spoiwa żużlowo-popiołowego (ozn. PŻA)

Receptura	Ilość dni twardnienia	Gęstość objętościowa ρ_{st} , g/cm ³		Wytrzymałość na ściskanie f_c , MPa		Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu f_t , MPa		Przewodność hydrauliczna k_{10} , m/s	
1	2	3		4		5		6	
1PŻA	14	1,24	1,25 (0,00)	0,33	0,33 (0,01)	0,08	0,08 (0,01)	1,59·10 ⁻⁷	1,64·10 ⁻⁷ (2,49·10 ⁻⁸)
		1,25		0,34		0,09		1,42·10 ⁻⁷	
		1,25		0,34		0,07		1,91·10 ⁻⁷	
	28	1,25	1,26 (0,01)	0,42	0,38 (0,02)	0,10	0,10 (0,01)	1,39·10 ⁻⁷	1,22·10 ⁻⁷ (1,51·10 ⁻⁸)
		1,27		0,38		0,09		1,17·10 ⁻⁷	
		1,26		0,40		0,09		1,09·10 ⁻⁷	
	60	1,29	1,27 (0,03)	0,57	0,52 (0,04)	0,09	0,09 (0,01)	5,90·10 ⁻⁸	6,45·10 ⁻⁸ (5,28·10 ⁻⁹)
		1,24		0,49		0,08		6,95·10 ⁻⁸	
		1,27		0,52		0,10		6,51·10 ⁻⁸	
	120	1,29	1,27 (0,02)	0,70	0,73 (0,04)	0,14	0,15 (0,02)	5,47·10 ⁻⁸	3,72·10 ⁻⁸ (1,53·10 ⁻⁸)
		1,25		0,78		0,17		2,62·10 ⁻⁸	
		1,26		0,72		-		3,08·10 ⁻⁸	
2PŻA	14	1,20	1,18 (0,02)	0,16	0,18 (0,01)	0,04	0,04 (0,01)	1,15·10 ⁻⁷	1,14·10 ⁻⁷ (1,38·10 ⁻⁹)
		1,18		0,18		0,03		1,12·10 ⁻⁷	
		1,16		0,18		0,03		1,14·10 ⁻⁷	
	28	1,21	1,20 (0,01)	0,43	0,45 (0,09)	0,08	0,06 (0,01)	1,76·10 ⁻⁸	2,10·10 ⁻⁸ (2,95·10 ⁻⁹)
		1,19		0,55		0,06		2,26·10 ⁻⁸	
		1,20		0,37		0,05		2,28·10 ⁻⁸	
	60	1,14	1,16 (0,02)	0,60	0,72 (0,11)	0,08	0,07 (0,01)	5,69·10 ⁻⁹	4,86·10 ⁻¹⁰ (2,88·10 ⁻⁹)
		1,17		0,80		0,06		6,48·10 ⁻¹⁰	
		1,17		0,78		0,06		7,52·10 ⁻¹⁰	
	120	1,16	1,17 (0,01)	0,92	0,93 (0,02)	0,08	0,08 (0,01)	2,47·10 ⁻¹⁰	5,67·10 ⁻¹⁰ (2,83·10 ⁻¹⁰)
		1,18		0,94		0,07		7,81·10 ⁻¹⁰	
		-		-		-		6,73·10 ⁻¹⁰	
3PŻA	14	1,31	1,33 (0,01)	0,46	0,43 (0,02)	0,14	0,13 (0,02)	2,06·10 ⁻⁹	2,84·10 ^{-9*} (1,1·10 ⁻⁹)*
		1,34		0,44		0,14		2,51·10 ⁻⁸ (próbka nieszczelna)	
		1,33		0,41		0,11		3,61·10 ⁻⁹	
	28	1,33	1,34 (0,01)	1,29	1,17 (0,17)	0,13	0,14 (0,02)	4,69·10 ⁻¹⁰	8,12·10 ⁻¹⁰ (2,97·10 ⁻¹⁰)
		1,33		0,97		0,17		9,84·10 ⁻¹⁰	
		1,36		1,24		0,13		9,82·10 ⁻¹⁰	
	60	1,36	1,34 (0,02)	1,69	1,98 (0,31)	0,19	0,15 (0,04)	3,13·10 ⁻¹⁰	6,77·10 ⁻¹⁰ (3,15·10 ⁻¹⁰)
		1,32		1,93		0,12		8,50·10 ⁻¹⁰	
		1,34		2,31		0,15		8,68·10 ⁻¹⁰	
	120	1,34	1,34 (0,03)	2,56	2,28 (0,26)	0,17	0,28 (0,15)	4,86·10 ⁻¹⁰	7,54·10 ⁻¹⁰ (3,56·10 ⁻¹⁰)
		1,38		2,24		0,39		1,16·10 ⁻⁹	
		1,31		2,04		-		6,17·10 ⁻¹⁰	

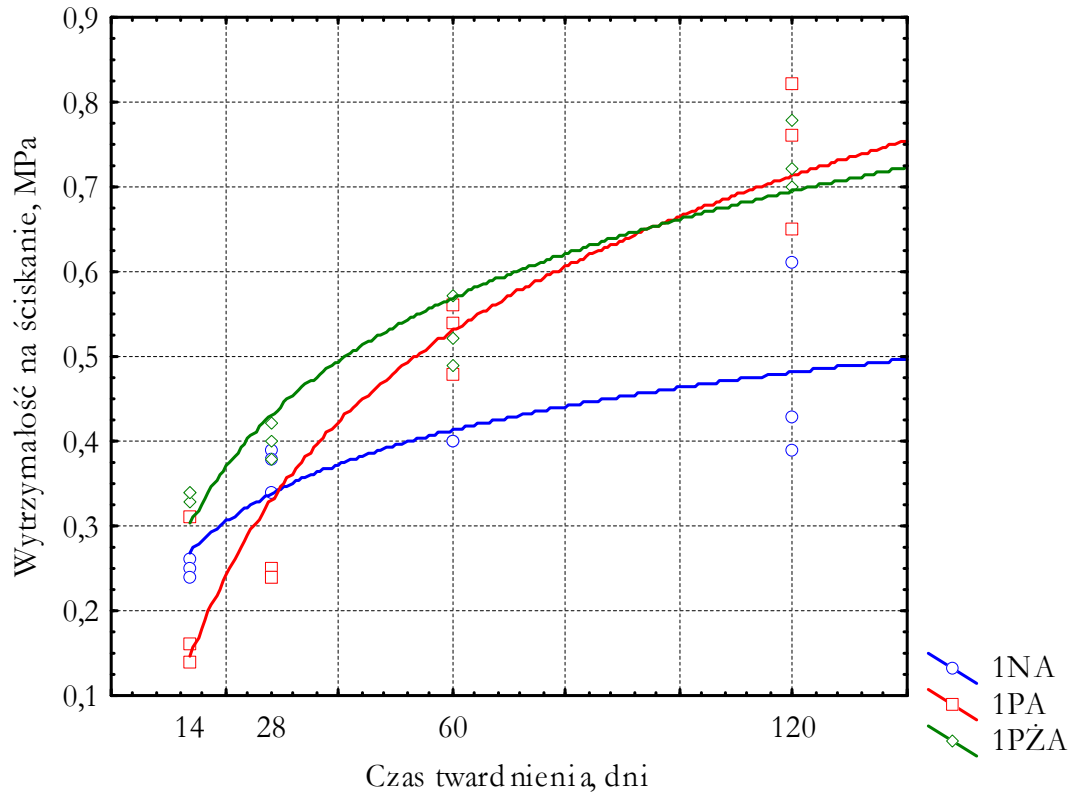
1	2	3		4		5		6	
4PZA	14	1,37	1,39 (0,02)	0,87	0,93 (0,06)	0,16	0,19 (0,04)	$8,50 \cdot 10^{-10}$	$8,60 \cdot 10^{-10}$ ($2,06 \cdot 10^{-10}$)
		1,41		0,99		0,17		$6,59 \cdot 10^{-10}$	
		1,39		0,94		0,23		$1,07 \cdot 10^{-9}$	
	28	1,41	1,39 (0,04)	1,75	2,29 (0,48)	0,31	0,26 (0,09)	$8,54 \cdot 10^{-10}$	$6,48 \cdot 10^{-10}$ ($1,83 \cdot 10^{-10}$)
		1,35		2,65		0,31		$6,00 \cdot 10^{-10}$	
		1,43		2,47		0,15		$4,91 \cdot 10^{-10}$	
	60	1,39	1,40 (0,01)	3,66	3,63 (0,36)	0,28	0,23 (0,04)	$2,06 \cdot 10^{-10}$	$5,97 \cdot 10^{-10}$ ($3,47 \cdot 10^{-10}$)
		1,39		3,26		0,19		$7,21 \cdot 10^{-10}$	
		1,40		3,98		0,21		$8,65 \cdot 10^{-10}$	
	120	1,39	1,39 (0,01)	3,28	3,47 (0,22)	0,19	0,29 (0,15)	$6,45 \cdot 10^{-10}$	$6,77 \cdot 10^{-10}$ ($3,63 \cdot 10^{-10}$)
		1,39		3,42		0,40		$6,97 \cdot 10^{-10}$	
		1,38		3,72		-		$6,89 \cdot 10^{-10}$	
5PZA	14	1,28	1,28 (0,00)	1,11	0,97 (0,13)	0,15	0,16 (0,00)	$3,50 \cdot 10^{-10}$	$6,69 \cdot 10^{-10}$ ($2,99 \cdot 10^{-10}$)
		1,28		0,89		0,16		$9,42 \cdot 10^{-10}$	
		1,28		0,89		0,15		$7,15 \cdot 10^{-10}$	
	28	1,29	1,32 (0,05)	1,45	1,47 (0,20)	0,20	0,22 (0,02)	$7,16 \cdot 10^{-10}$	$6,88 \cdot 10^{-10}$ ($2,44 \cdot 10^{-11}$)
		1,28		1,27		0,22		$6,69 \cdot 10^{-10}$	
		1,37		1,67		0,24		$6,79 \cdot 10^{-10}$	
	60	1,34	1,33 (0,01)	1,71	1,76 (0,19)	0,19	0,18 (0,02)	$2,67 \cdot 10^{-10}$	$5,03 \cdot 10^{-10}$ ($2,12 \cdot 10^{-10}$)
		1,31		1,97		0,19		$6,77 \cdot 10^{-10}$	
		1,33		1,59		0,17		$5,64 \cdot 10^{-10}$	
	120	1,32	1,31 (0,01)	2,14	1,95 (0,22)	0,21	0,30 (0,09)	$2,82 \cdot 10^{-10}$	$6,53 \cdot 10^{-10}$ ($3,29 \cdot 10^{-10}$)
		1,30		2,01		0,38		$7,69 \cdot 10^{-10}$	
		1,30		1,71		0,31		$9,08 \cdot 10^{-10}$	
6PZA	14	1,28	1,28 (0,02)	1,29	1,27 (0,02)	0,18	0,20 (0,03)	$1,73 \cdot 10^{-9}$	$1,01 \cdot 10^{-9}$ ($6,22 \cdot 10^{-10}$)
		1,26		1,27		0,23		$6,95 \cdot 10^{-10}$	
		1,30		1,25		0,19		$6,12 \cdot 10^{-10}$	
	28	1,30	1,29 (0,02)	1,51	1,55 (0,04)	0,14	0,14 (0,03)	$3,92 \cdot 10^{-10}$	$3,59 \cdot 10^{-10}$ ($2,91 \cdot 10^{-11}$)
		1,30		1,55		0,11		$3,42 \cdot 10^{-10}$	
		1,26		1,59		0,18		$3,43 \cdot 10^{-10}$	
	60	1,27	1,28 (0,03)	2,23	1,98 (0,37)	0,14	0,15 (0,01)	$1,40 \cdot 10^{-10}$	$4,17 \cdot 10^{-10}$ ($2,40 \cdot 10^{-10}$)
		1,26		1,55		0,14		$5,66 \cdot 10^{-10}$	
		1,31		2,17		0,17		$5,44 \cdot 10^{-10}$	
	120	1,30	1,29 (0,00)	1,24	1,89 (0,58)	0,14	0,15 (0,01)	$3,02 \cdot 10^{-10}$	$6,32 \cdot 10^{-10}$ ($2,86 \cdot 10^{-10}$)
		1,29		2,35		0,16		$8,04 \cdot 10^{-10}$	
		1,29		2,09		0,16		$7,91 \cdot 10^{-10}$	

1	2	3		4		5		6	
7PZA	14	1,21	1,23 (0,02)	0,32	0,37 (0,06)	0,05	0,05 (0,01)	$7,21 \cdot 10^{-8}$	$5,98 \cdot 10^{-8}$ ($1,17 \cdot 10^{-8}$)
		1,25		0,43		0,05		$4,88 \cdot 10^{-8}$	
		1,24		0,37		0,06		$5,84 \cdot 10^{-8}$	
	28	1,24	1,23 (0,03)	0,46	0,46 (0,05)	0,08	0,09 (0,02)	$1,47 \cdot 10^{-8}$	$2,23 \cdot 10^{-8}$ ($6,64 \cdot 10^{-9}$)
		1,26		0,51		0,11		$2,53 \cdot 10^{-8}$	
		1,20		0,42		0,08		$2,69 \cdot 10^{-8}$	
	60	1,19	1,20 (0,00)	0,52	0,57 (0,05)	0,09	0,09 (0,01)	$1,64 \cdot 10^{-8}$	$1,10 \cdot 10^{-8}$ ($5,22 \cdot 10^{-9}$)
		1,20		0,62		0,08		$1,05 \cdot 10^{-8}$	
		1,20		0,56		0,09		$6,04 \cdot 10^{-9}$	
	120	1,24	1,22 (0,02)	0,86	0,74 (0,11)	0,15	0,15 (0,02)	$1,51 \cdot 10^{-9}$	$2,04 \cdot 10^{-9}$ ($7,47 \cdot 10^{-10}$)
		1,19		0,64		0,17		$2,89 \cdot 10^{-9}$	
		1,22		0,71		0,14		$1,71 \cdot 10^{-9}$	
8PZA	14	1,38	1,36 (0,03)	1,71	1,88 (0,27)	0,14	0,18 (0,03)	$4,37 \cdot 10^{-10}$	$0,97 \cdot 10^{-9}$ ($4,63 \cdot 10^{-10}$)
		1,33		1,73		0,19		$1,28 \cdot 10^{-9}$	
		1,37		2,19		0,21		$1,19 \cdot 10^{-9}$	
	28	1,34	1,34 (0,01)	2,27	1,91 (0,38)	0,16	0,16 (0,01)	$6,18 \cdot 10^{-10}$	$6,40 \cdot 10^{-10}$ ($1,75 \cdot 10^{-10}$)
		1,34		1,51		0,17		$8,26 \cdot 10^{-10}$	
		1,35		1,95		0,15		$4,77 \cdot 10^{-10}$	
	60	1,36	1,34 (0,02)	2,86	2,69 (0,20)	0,17	0,33 (0,14)	$8,19 \cdot 10^{-11}$	$5,05 \cdot 10^{-10}$ ($3,77 \cdot 10^{-10}$)
		1,35		2,47		0,37		$6,31 \cdot 10^{-10}$	
		1,32		2,74		0,45		$8,03 \cdot 10^{-10}$	
	120	1,37	1,36 (0,01)	2,47	2,86 (0,39)	0,15	0,16 (0,01)	$2,31 \cdot 10^{-10}$	$0,96 \cdot 10^{-9}$ ($6,83 \cdot 10^{-10}$)
		1,35		3,24		0,18		$1,59 \cdot 10^{-9}$	
		1,36		2,88		0,17		$1,06 \cdot 10^{-9}$	
9PZA	14	1,22	1,22 (0,01)	0,60	0,55 (0,05)	0,05	0,05 (0,01)	$3,00 \cdot 10^{-9}$	$3,95 \cdot 10^{-9}$ ($9,98 \cdot 10^{-10}$)
		1,23		0,54		0,04		$3,87 \cdot 10^{-9}$	
		1,22		0,50		0,07		$4,99 \cdot 10^{-9}$	
	28	1,23	1,23 (0,01)	0,88	0,88 (0,09)	0,13	0,10 (0,03)	$1,95 \cdot 10^{-10}$	$5,63 \cdot 10^{-10}$ ($3,19 \cdot 10^{-10}$)
		1,23		0,97		0,09		$7,49 \cdot 10^{-10}$	
		1,24		0,80		0,09		$7,46 \cdot 10^{-10}$	
	60	1,24	1,25 (0,01)	1,13	1,01 (0,10)	0,25	0,22 (0,03)	$5,21 \cdot 10^{-10}$	$7,54 \cdot 10^{-10}$ ($2,02 \cdot 10^{-10}$)
		1,25		0,97		0,20		$8,81 \cdot 10^{-10}$	
		1,26		0,94		0,21		$8,59 \cdot 10^{-10}$	
	120	1,22	1,25 (0,05)	1,29	1,56 (0,38)	0,20	0,16 (0,05)	$2,30 \cdot 10^{-10}$	$6,30 \cdot 10^{-10}$ ($3,76 \cdot 10^{-10}$)
		1,29		1,84		0,13		$9,77 \cdot 10^{-10}$	
		-		-		-		$6,82 \cdot 10^{-10}$	

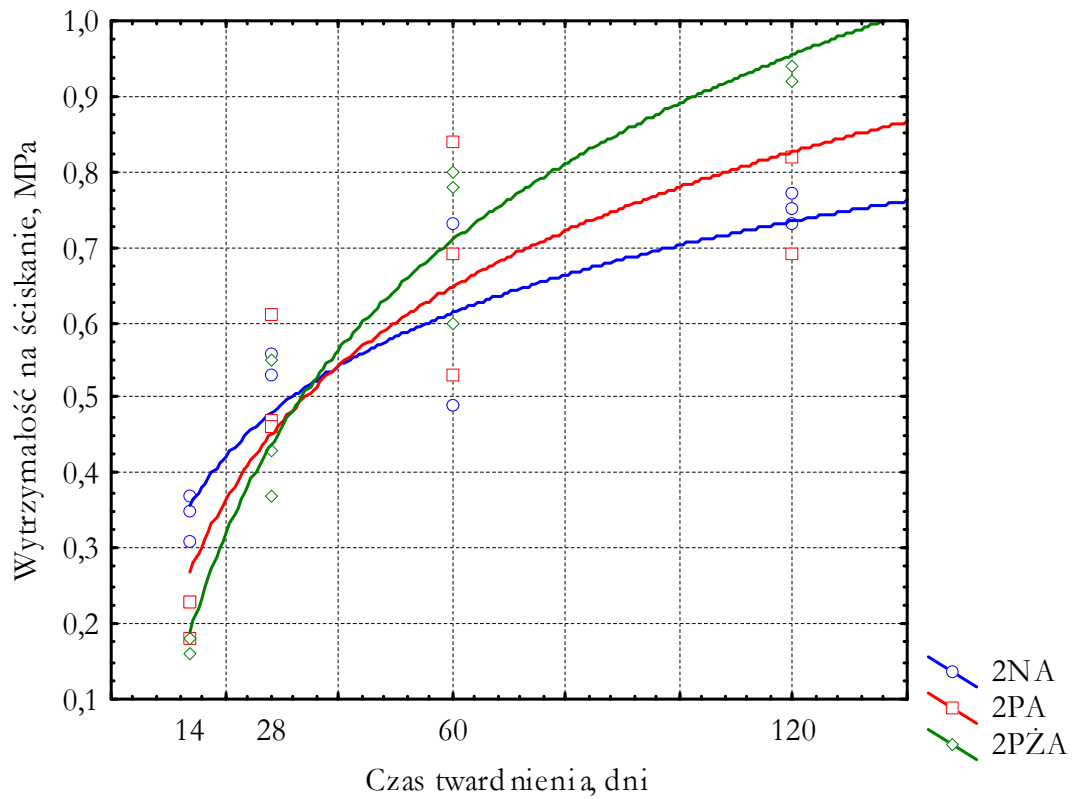
1	2	3		4		5		6	
10PZA	14	1,36	1,36 (0,01)	0,47	0,43 (0,06)	0,13	0,14 (0,03)	$1,26 \cdot 10^{-9}$	$2,29 \cdot 10^{-9}$ ($1,06 \cdot 10^{-9}$)
		1,35		0,36		0,11		$3,38 \cdot 10^{-9}$	
		1,36		0,46		0,17		$2,23 \cdot 10^{-9}$	
	28	1,36	1,35 (0,02)	0,99	0,86 (0,12)	0,19	0,16 (0,03)	$1,82 \cdot 10^{-9}$	$1,24 \cdot 10^{-9}$ ($5,03 \cdot 10^{-10}$)
		1,36		0,80		0,13		$9,45 \cdot 10^{-10}$	
		1,33		0,78		0,15		$9,50 \cdot 10^{-10}$	
	60	1,33	1,33 (0,01)	0,88	0,72 (0,26)	0,19	0,19 (0,01)	$2,71 \cdot 10^{-10}$	$7,04 \cdot 10^{-10}$ ($3,86 \cdot 10^{-10}$)
		1,34		0,42		0,20		$1,01 \cdot 10^{-9}$	
		1,32		0,87		-		$8,31 \cdot 10^{-10}$	
	120	1,36	1,35 (0,02)	1,80	1,87 (0,10)	0,18	0,19 (0,02)	$4,70 \cdot 10^{-10}$	$6,97 \cdot 10^{-10}$ ($2,00 \cdot 10^{-10}$)
		1,33		1,94		0,21		$8,50 \cdot 10^{-10}$	
		-		-		-		$7,71 \cdot 10^{-10}$	
11PZA	14	1,29	1,29 (0,01)	1,09	0,99 (0,10)	0,10	0,11 (0,01)	$7,06 \cdot 10^{-10}$	$1,08 \cdot 10^{-9}$ ($3,31 \cdot 10^{-10}$)
		1,30		0,99		0,10		$1,22 \cdot 10^{-9}$	
		1,28		0,90		0,12		$1,32 \cdot 10^{-9}$	
	28	1,30	1,27 (0,02)	1,44	1,30 (0,17)	0,11	0,12 (0,01)	$1,92 \cdot 10^{-10}$	$4,62 \cdot 10^{-10}$ ($2,34 \cdot 10^{-10}$)
		1,27		1,35		0,14		$5,81 \cdot 10^{-10}$	
		1,25		1,11		0,12		$6,13 \cdot 10^{-10}$	
	60	1,31	1,30 (0,02)	1,55	1,81 (0,28)	0,13	0,15 (0,02)	$4,54 \cdot 10^{-10}$	$1,20 \cdot 10^{-9}$ ($6,95 \cdot 10^{-10}$)
		1,30		2,10		0,16		$1,83 \cdot 10^{-9}$	
		1,28		1,77		0,17		$1,33 \cdot 10^{-9}$	
	120	1,33	1,31 (0,01)	2,65	2,29 (0,38)	0,16	0,17 (0,01)	$2,94 \cdot 10^{-10}$	$6,73 \cdot 10^{-10}$ ($3,52 \cdot 10^{-10}$)
		1,31		2,33		0,17		$9,90 \cdot 10^{-10}$	
		1,30		1,89		0,17		$7,36 \cdot 10^{-10}$	

* ze względu na nieszczelność jednej z badanych próbek średnia arytmetyczna i odchylenie standardowe uzyskanych wyników przepuszczalności hydraulicznej zostały obliczone z dwóch pomiarów, pomijając wynik otrzymany z próbki nieszczelnej

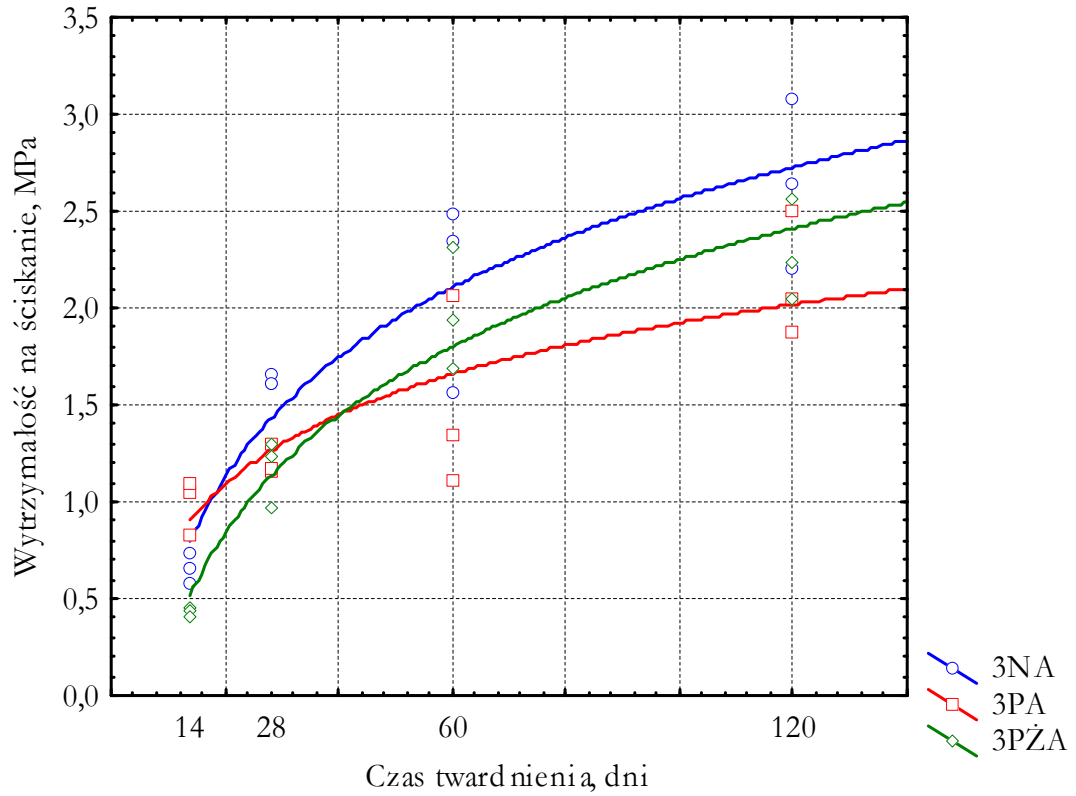
Uwaga: w nawiasach podano odchylenie standardowe średniej poszczególnych parametrów



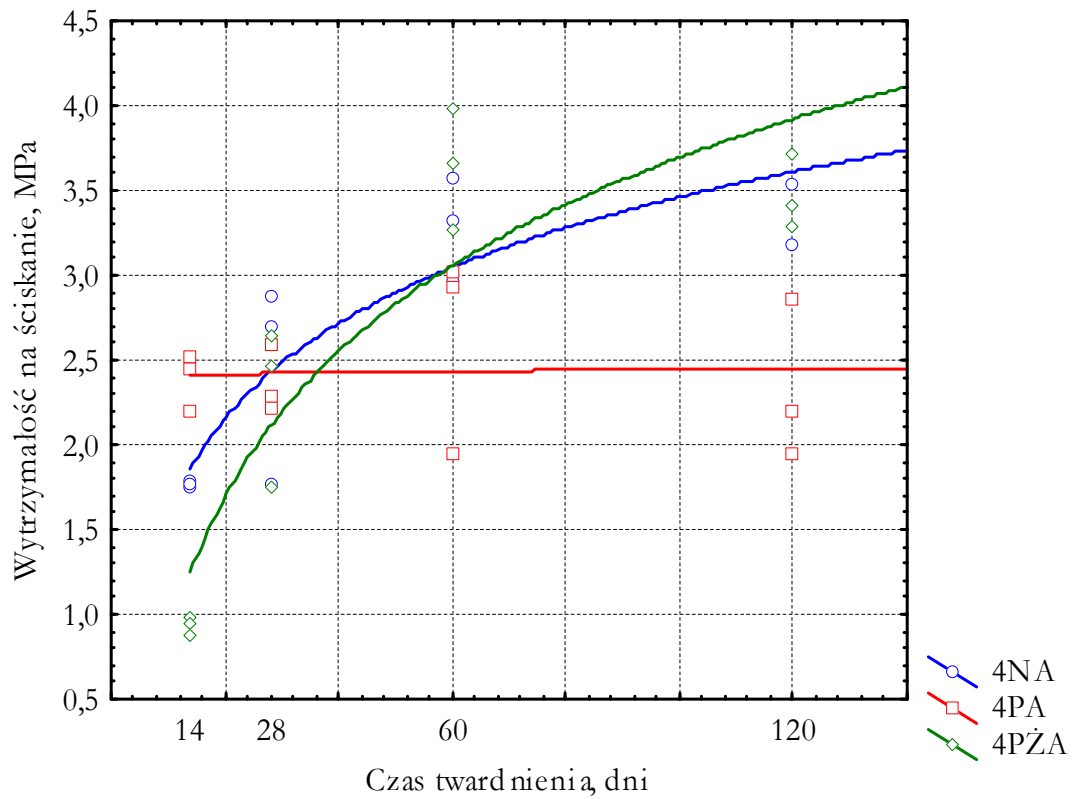
Rys. 5.1. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji czasu twardnienia receptury 1 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



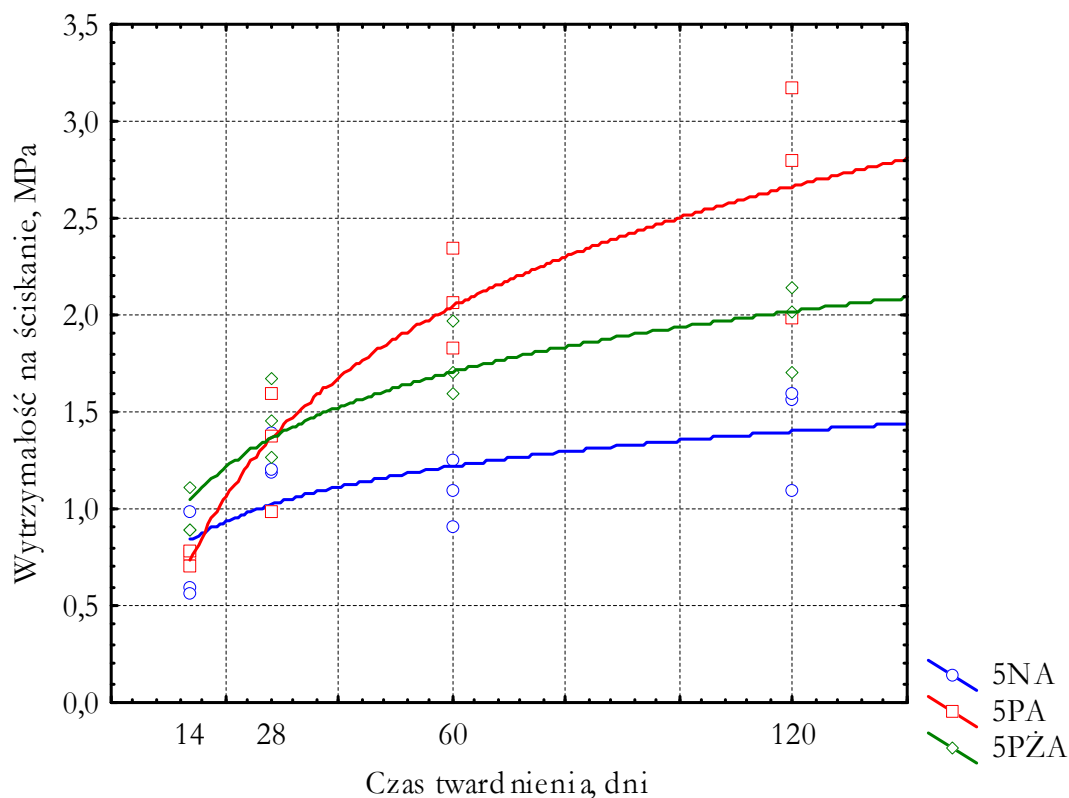
Rys. 5.2. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji czasu twardnienia receptury 2 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



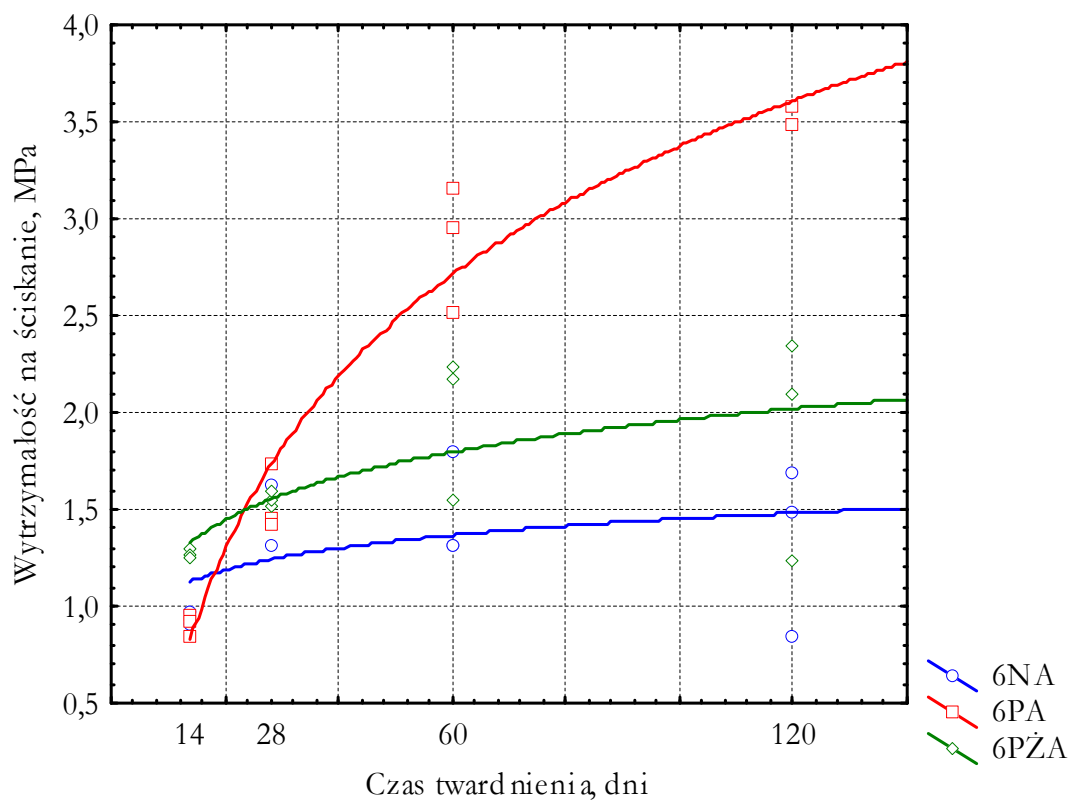
Rys. 5.3. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji czasu twardnienia receptury 3 zawiesziny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



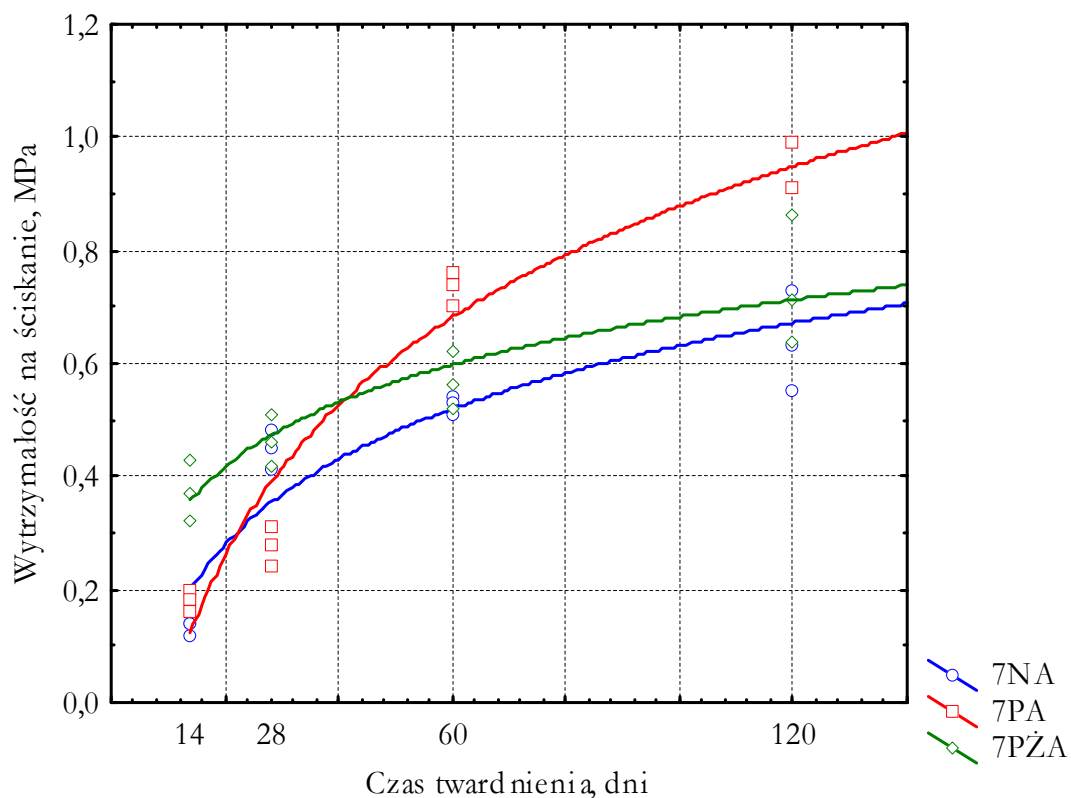
Rys. 5.4. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji czasu twardnienia receptury 4 zawiesziny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



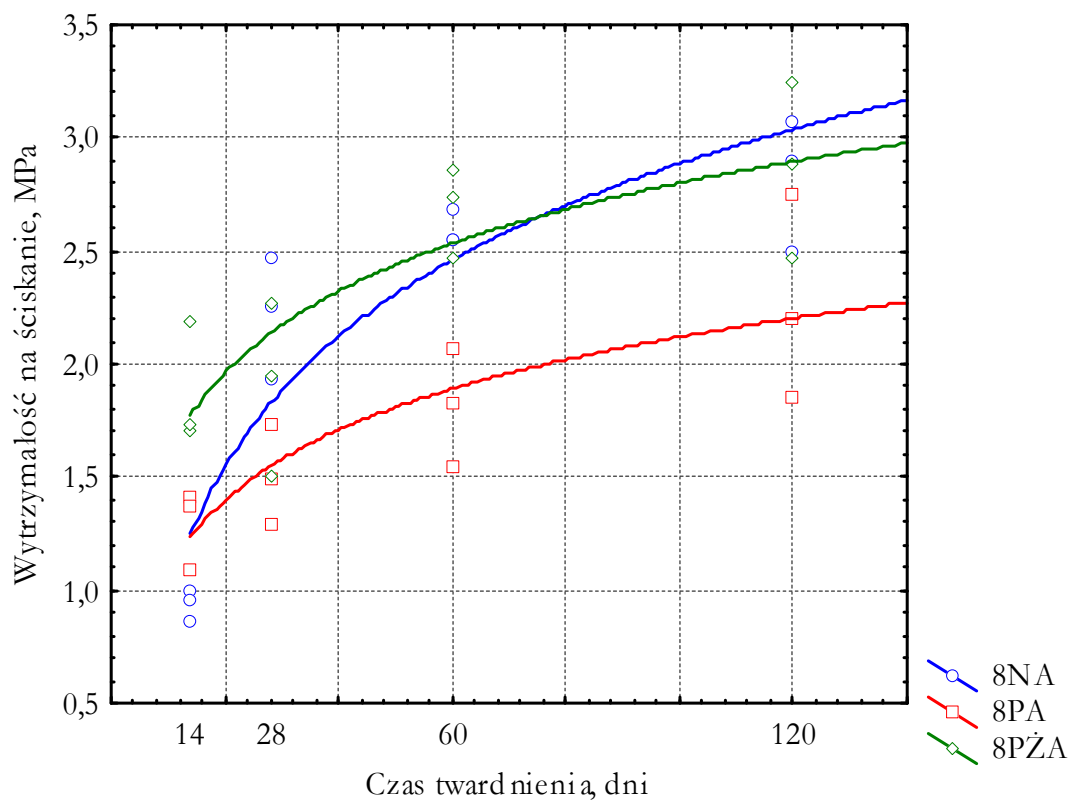
Rys. 5.5. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji czasu twardnienia receptury 5 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



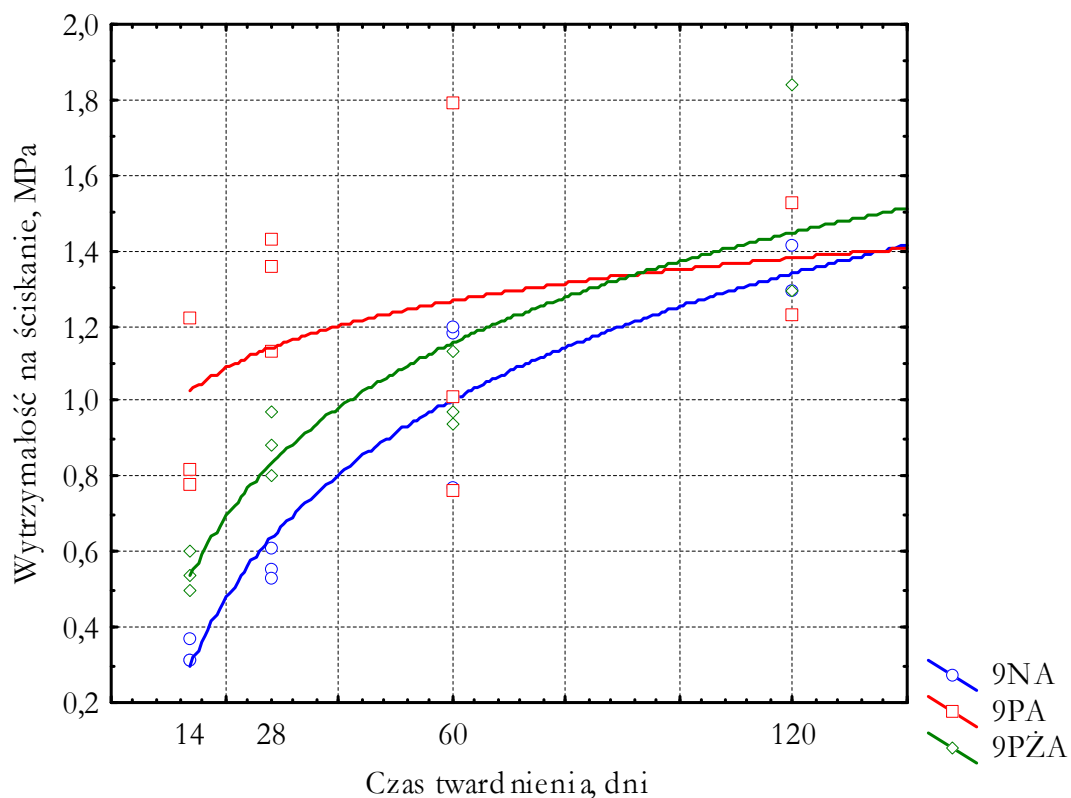
Rys. 5.6. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji czasu twardnienia receptury 6 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



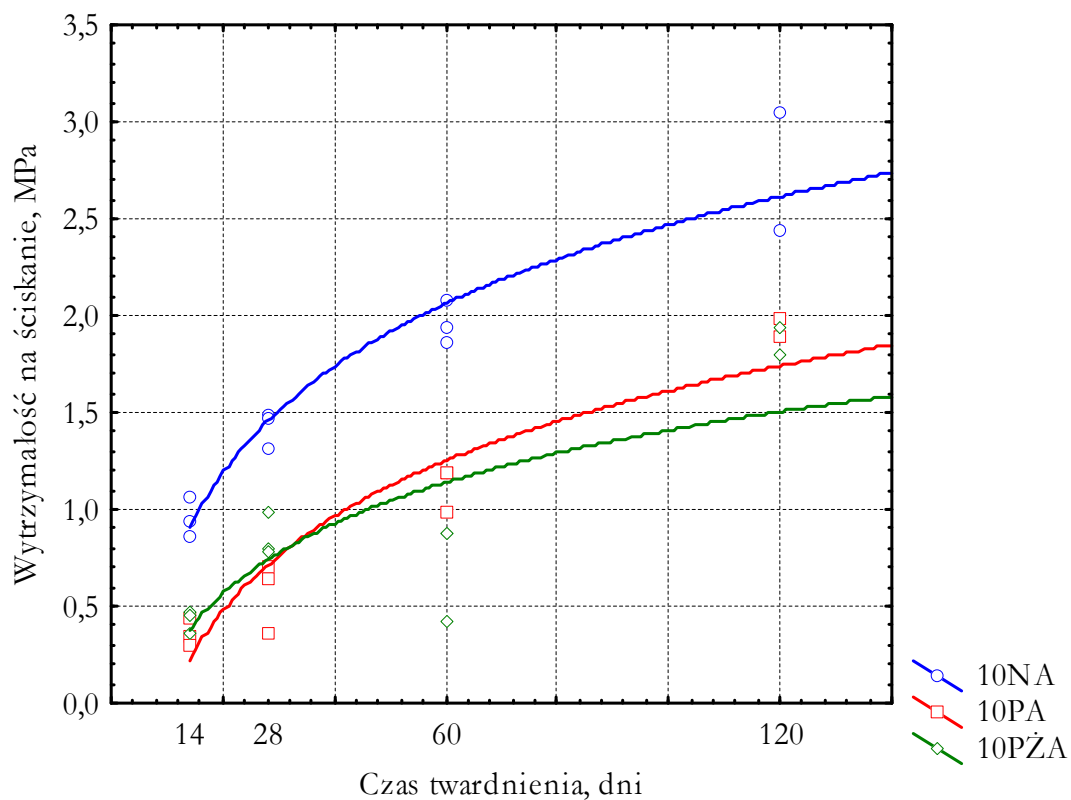
Rys. 5.7. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji czasu twardnienia receptury 7 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



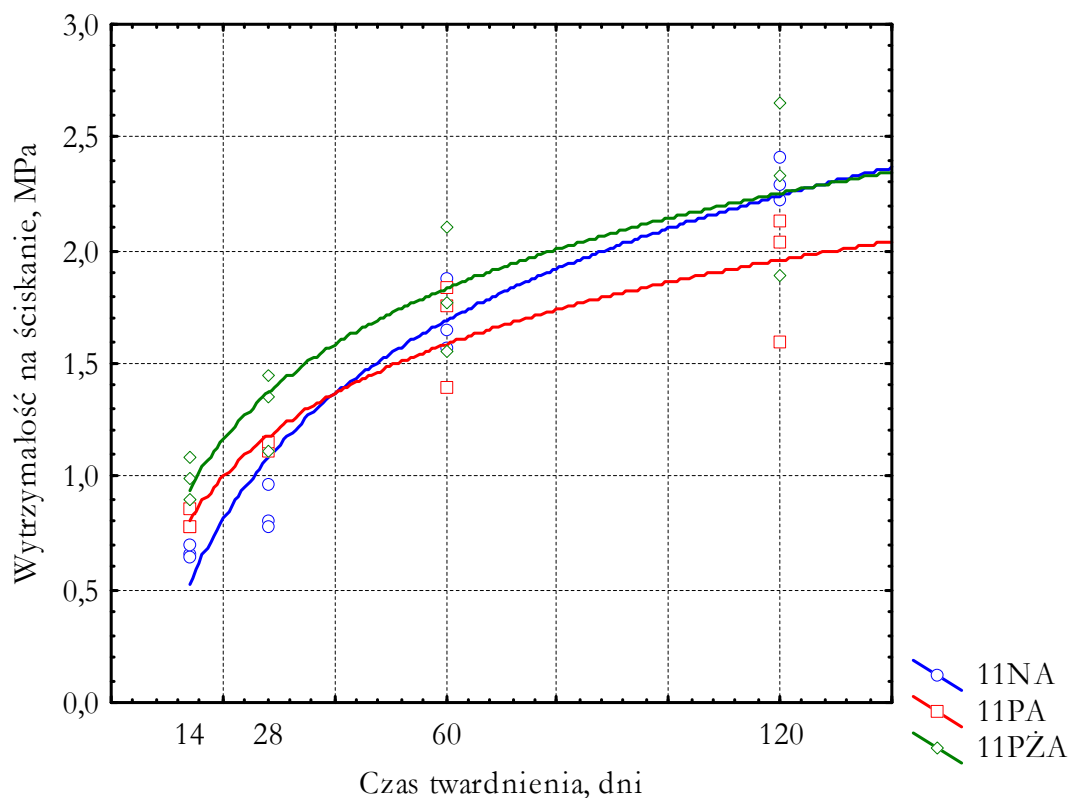
Rys. 5.8. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji czasu twardnienia receptury 8 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



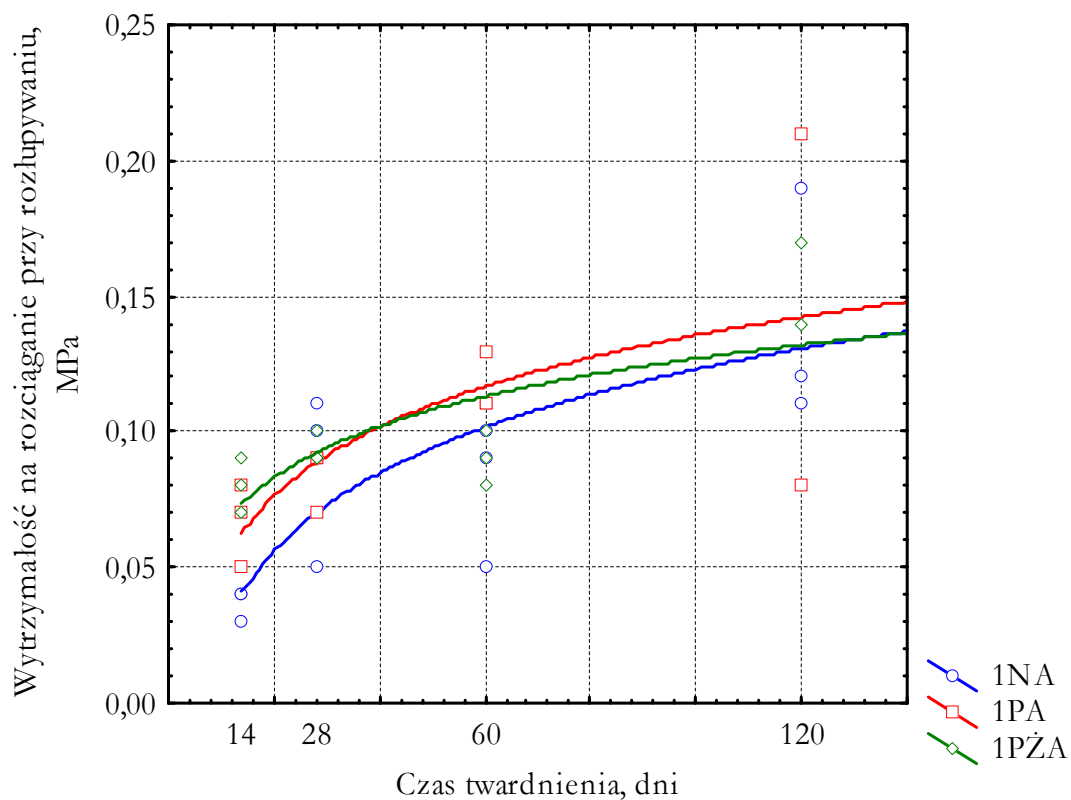
Rys. 5.9. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji czasu twardnienia receptury 9 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



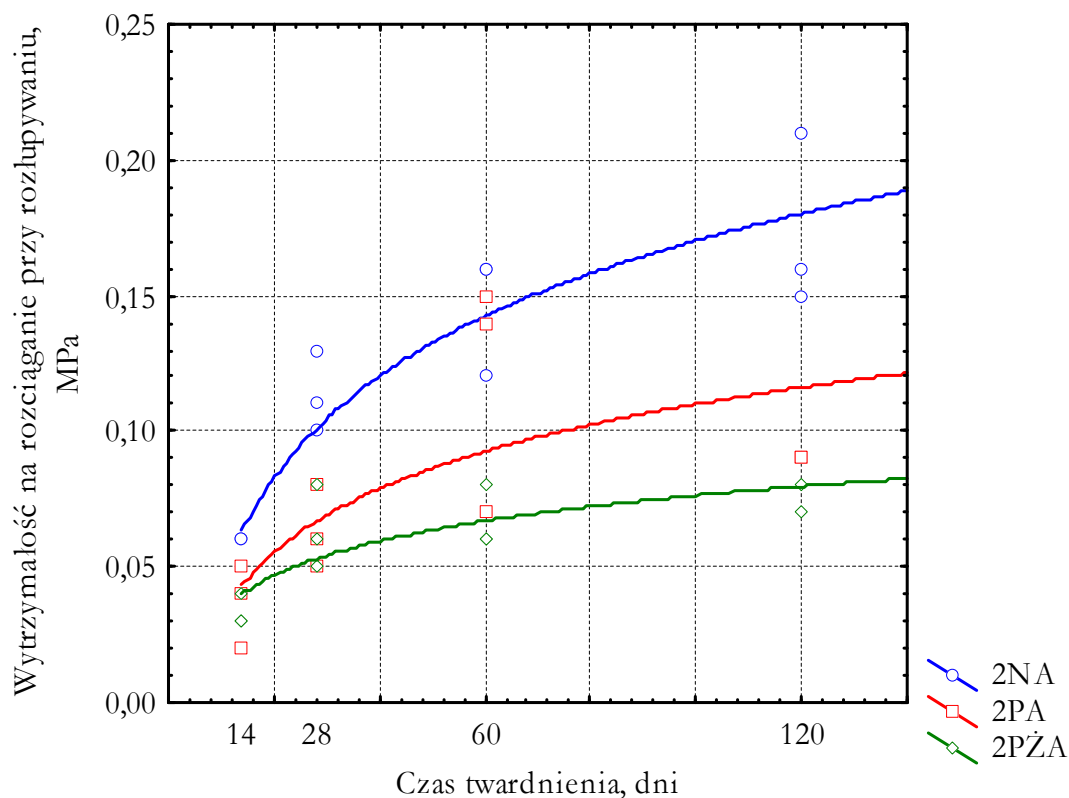
Rys. 5.10. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji czasu twardnienia receptury 10 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



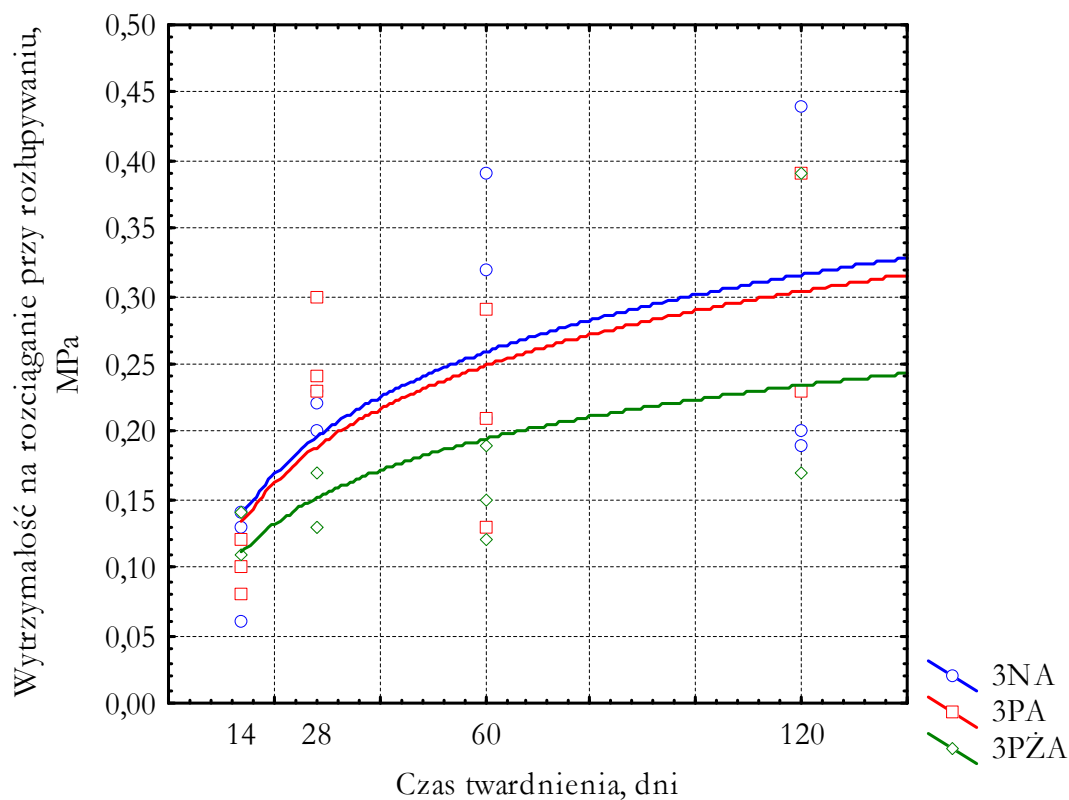
Rys. 5.11. Wytrzymałość na ściskanie w funkcji czasu twardnienia receptury 11 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



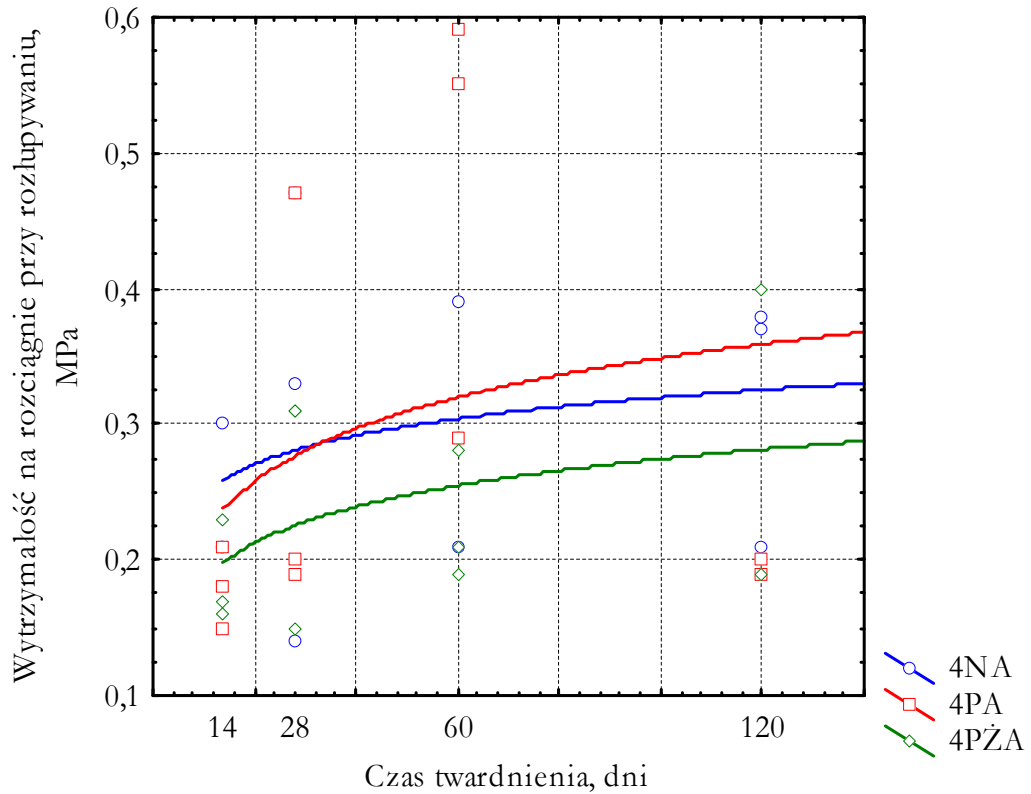
Rys. 5.12. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozłupywaniu w funkcji czasu twardnienia receptury 1 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



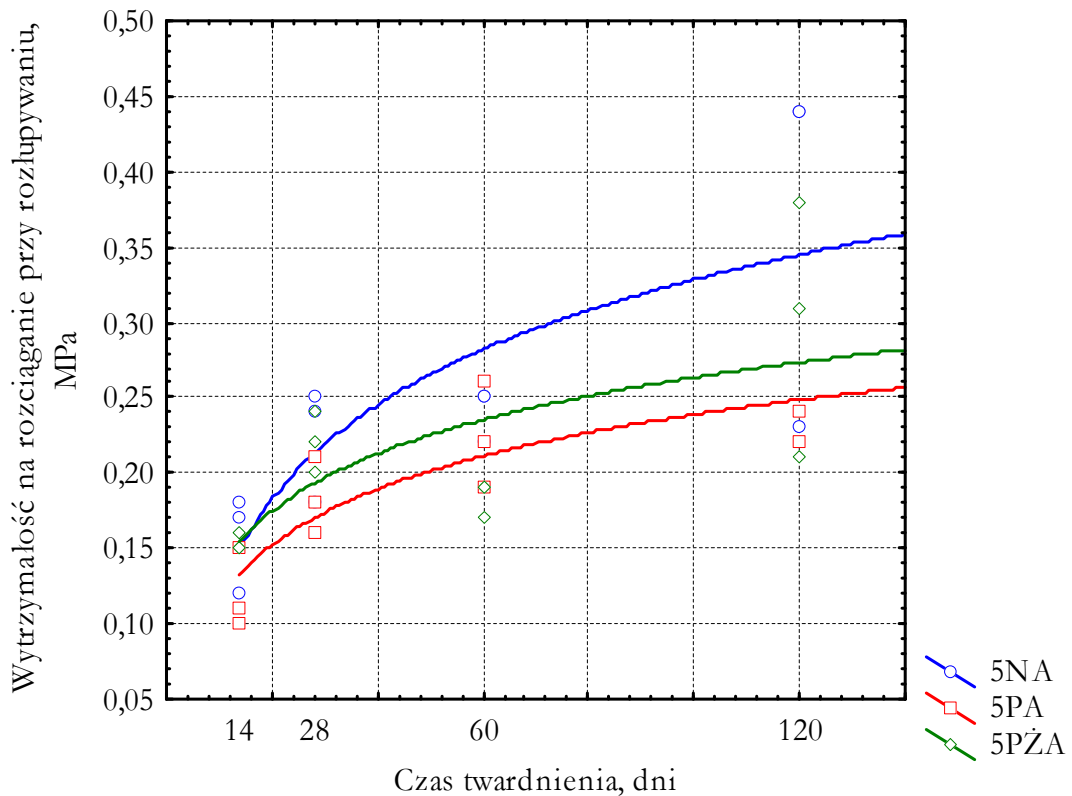
Rys. 5.13. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozlupywaniu w funkcji czasu twardnienia receptury 2 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



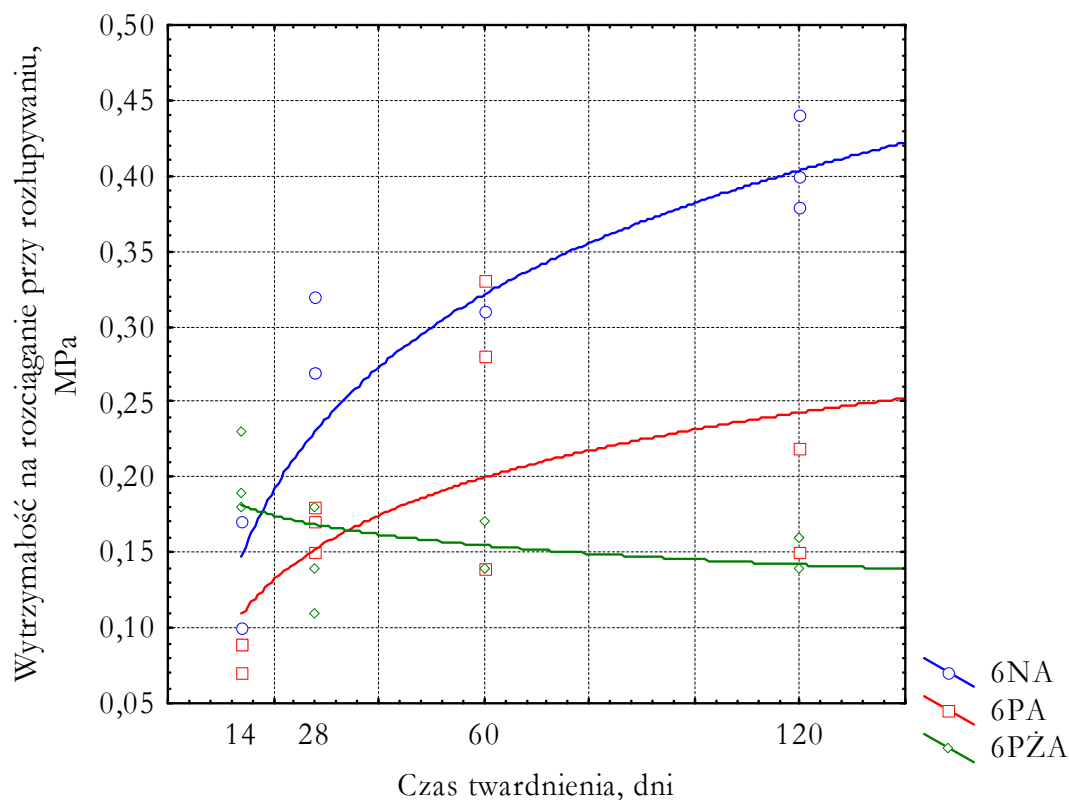
Rys. 5.14. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozlupywaniu w funkcji czasu twardnienia receptury 3 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



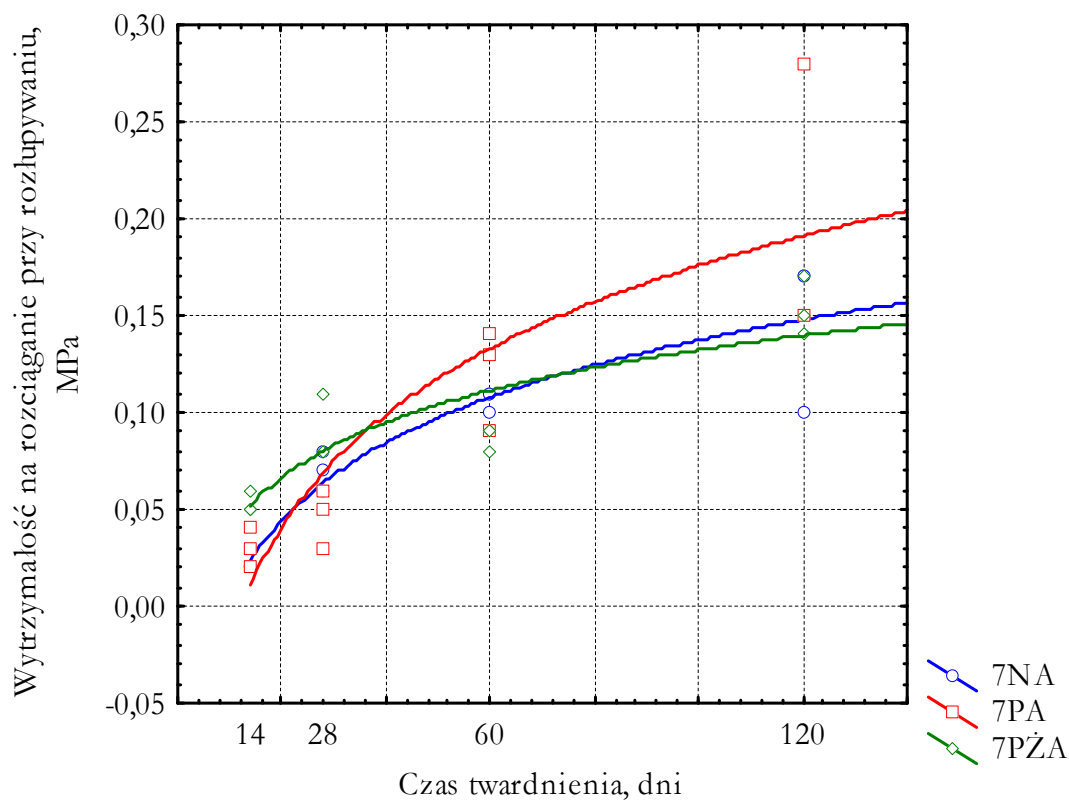
Rys. 5.15. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozlupywaniu w funkcji czasu twardnienia receptury 4 zawiesziny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



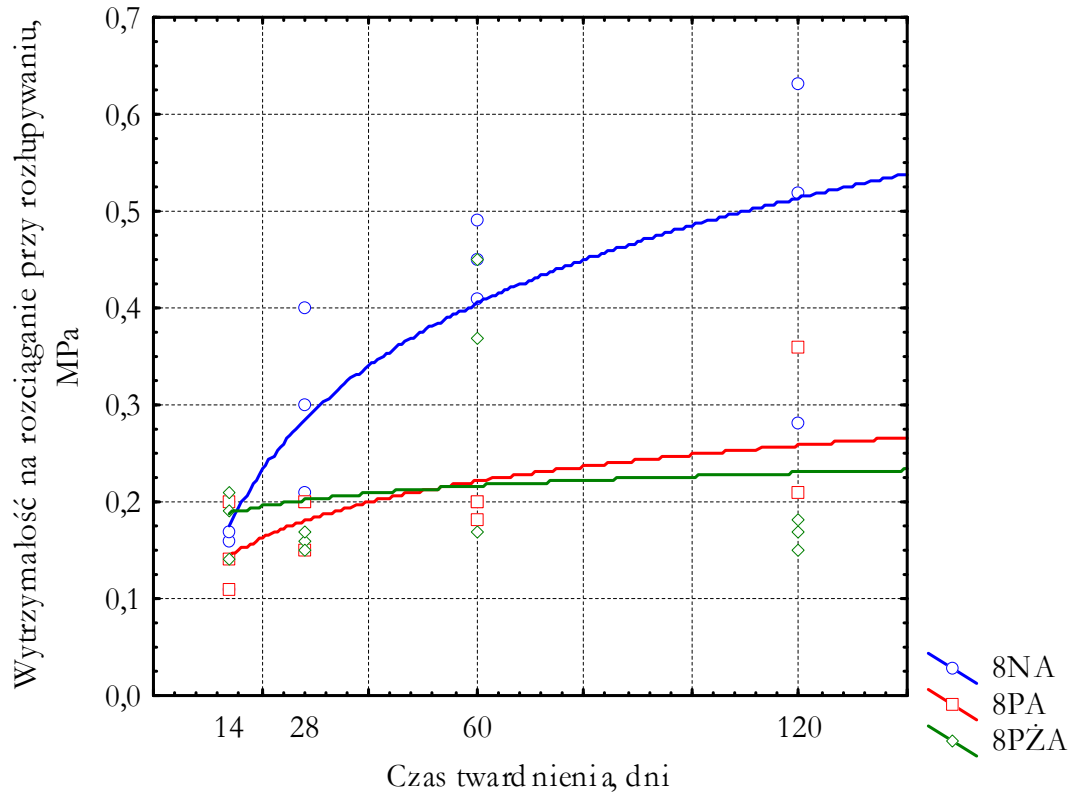
Rys. 5.16. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozlupywaniu w funkcji czasu twardnienia receptury 5 zawiesziny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



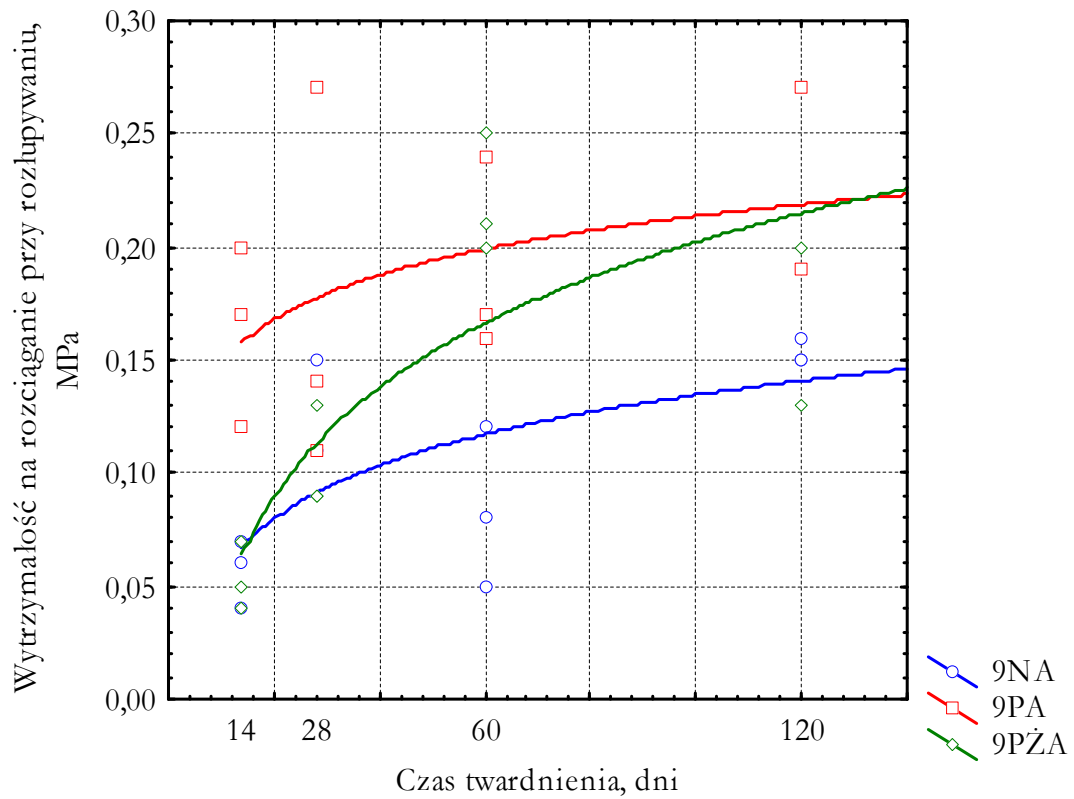
Rys. 5.17. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozlupywaniu w funkcji czasu twardnienia receptury 6 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



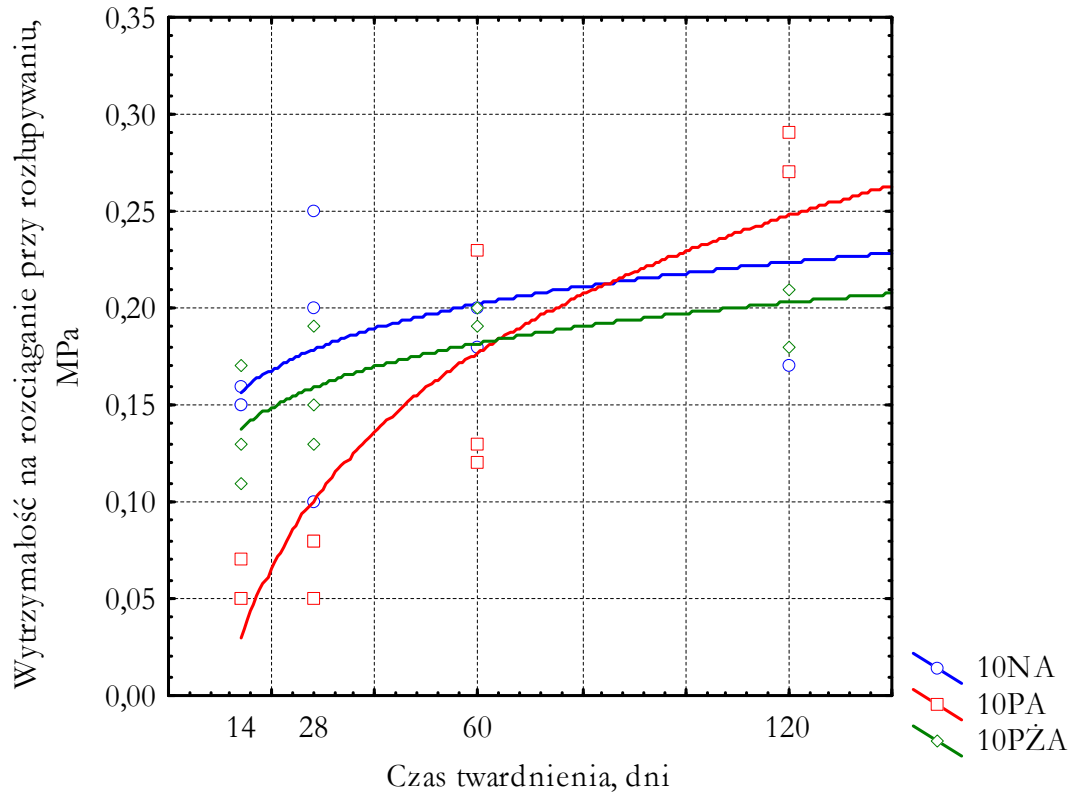
Rys. 5.18. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozlupywaniu w funkcji czasu twardnienia receptury 7 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



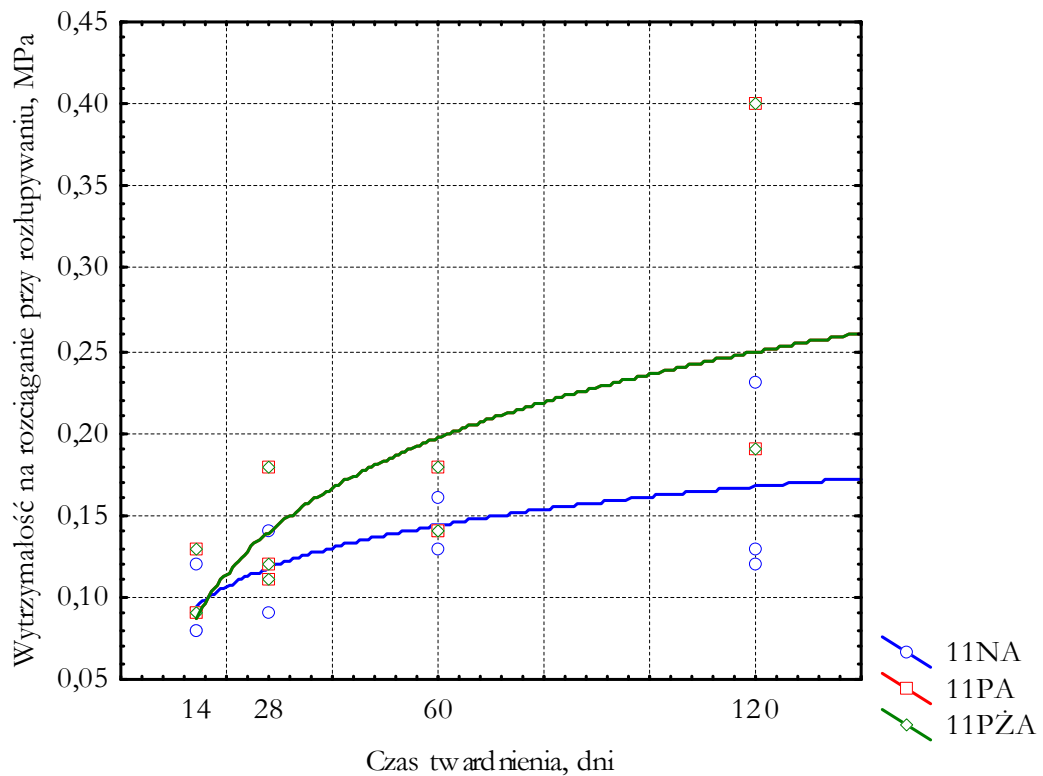
Rys. 5.19. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozlupywaniu w funkcji czasu twardnienia receptury 8 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



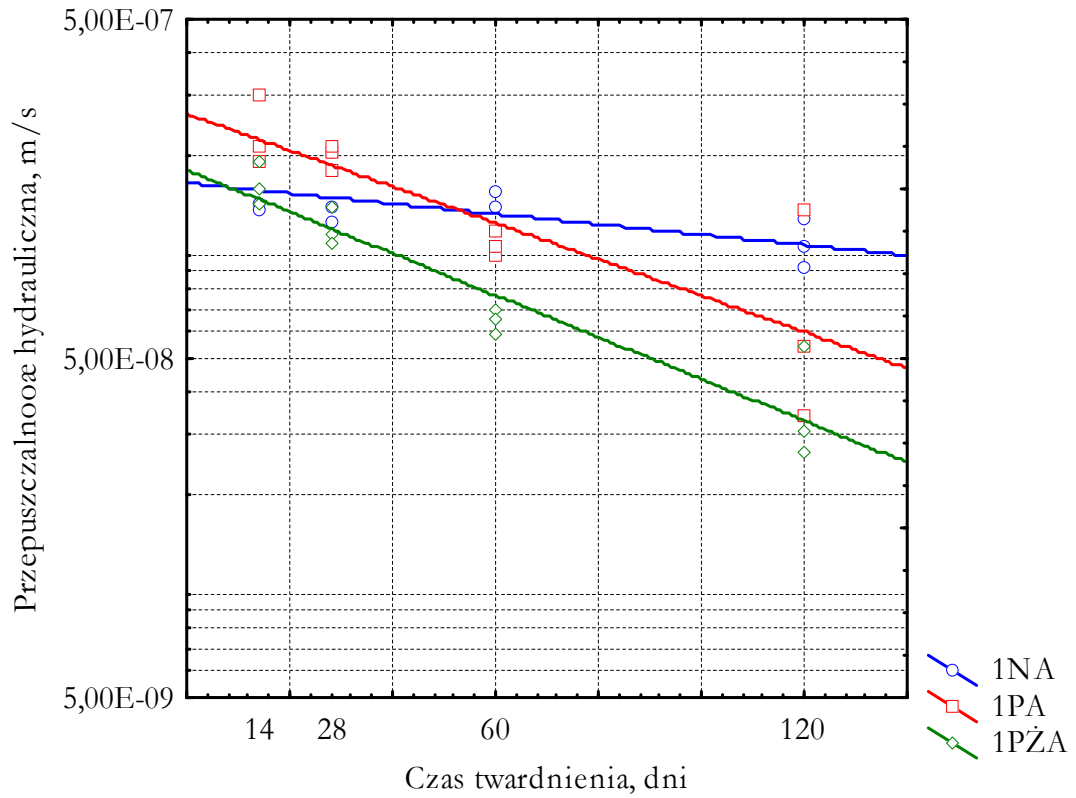
Rys. 5.20. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozlupywaniu w funkcji czasu twardnienia receptury 9 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



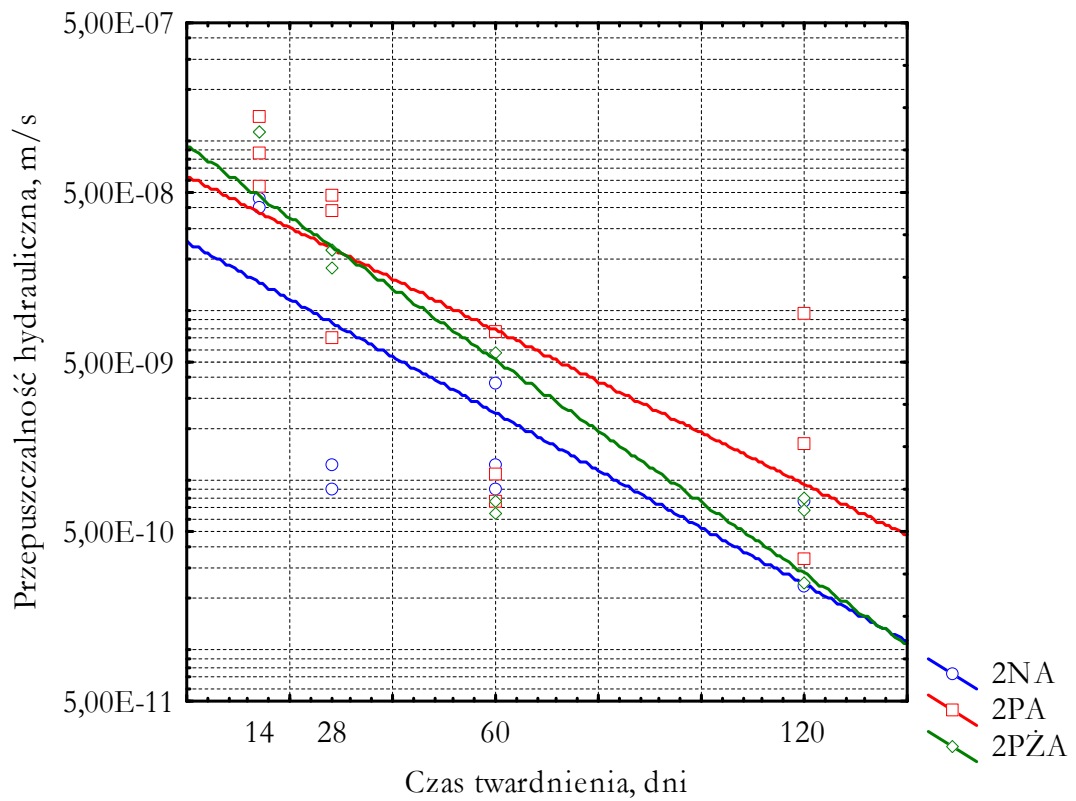
Rys. 5.21. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozlupywaniu w funkcji czasu twardnienia receptury 10 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



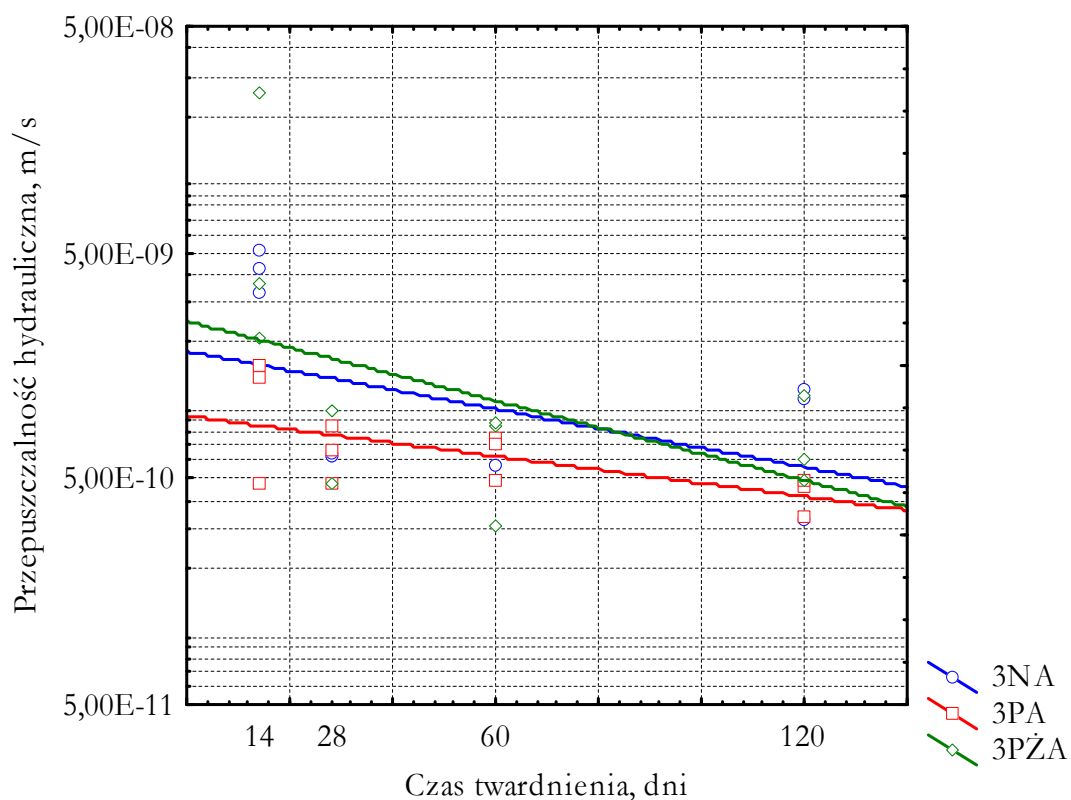
Rys. 5.22. Wytrzymałość na rozciąganie przy rozlupywaniu w funkcji czasu twardnienia receptury 11 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA); wykres próbki 11PA pokrywa się z wykresem próbki 11PZA



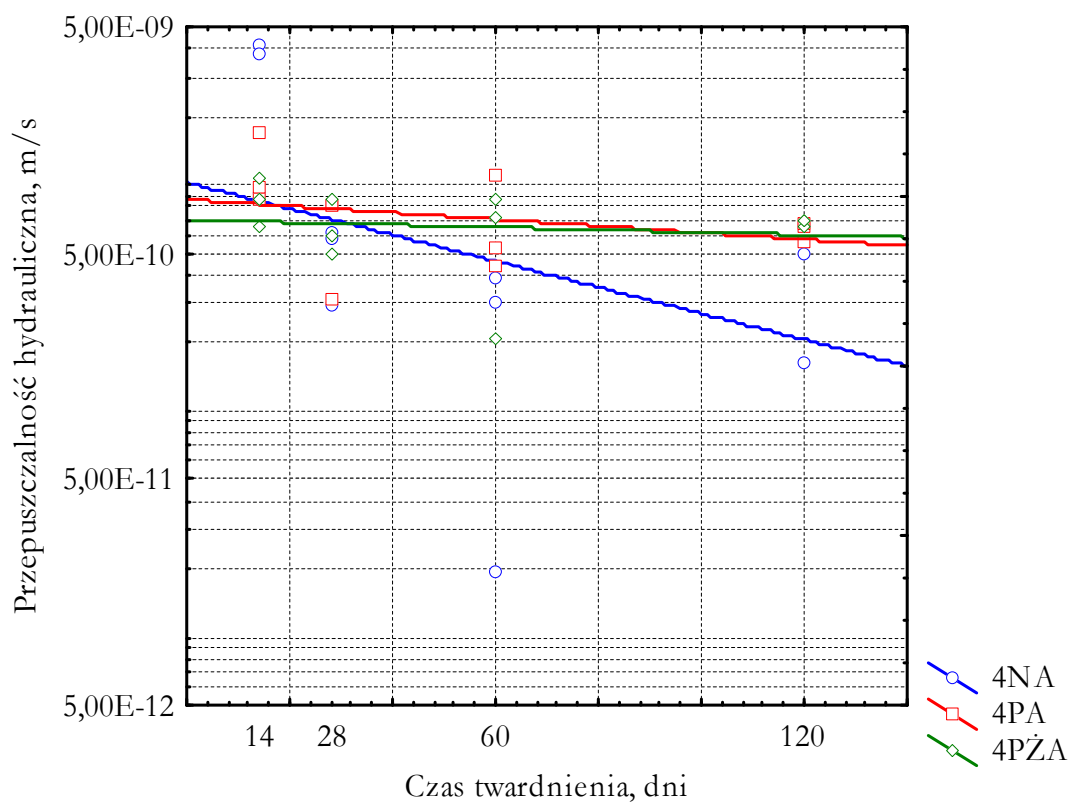
Rys. 5.23. Przepuszczalność hydrauliczna w funkcji czasu twardnienia receptury 1 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



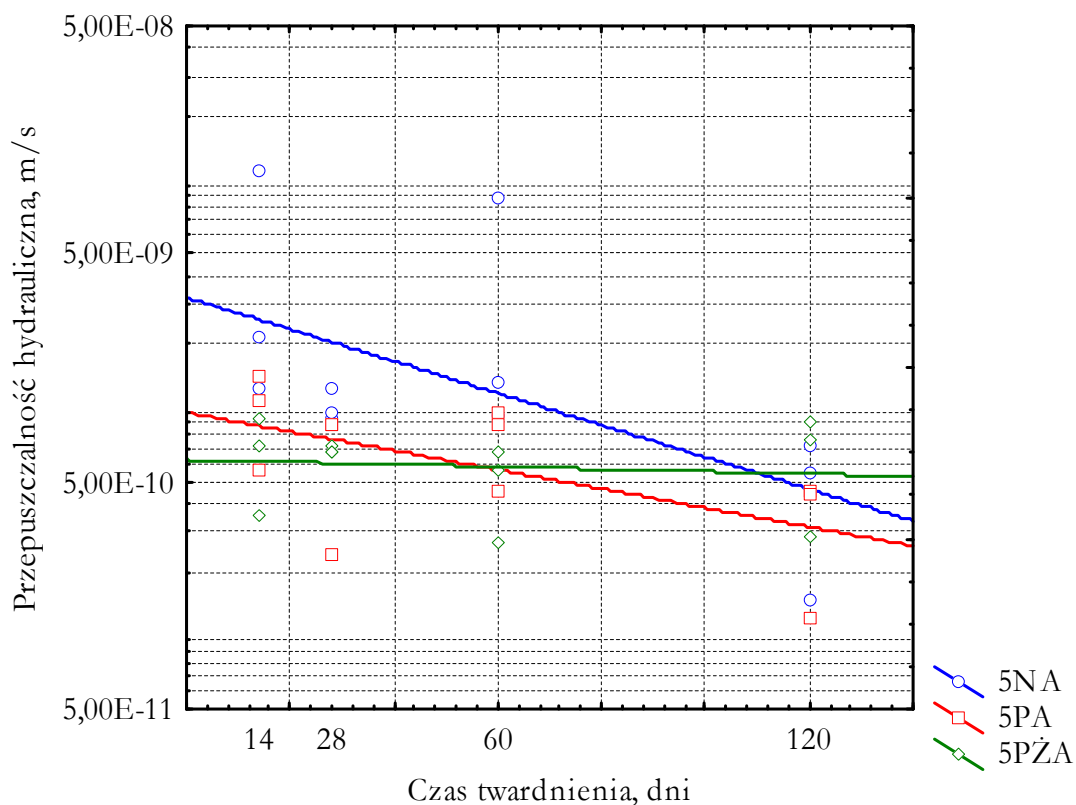
Rys. 5.24. Przepuszczalność hydrauliczna w funkcji czasu twardnienia receptury 2 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



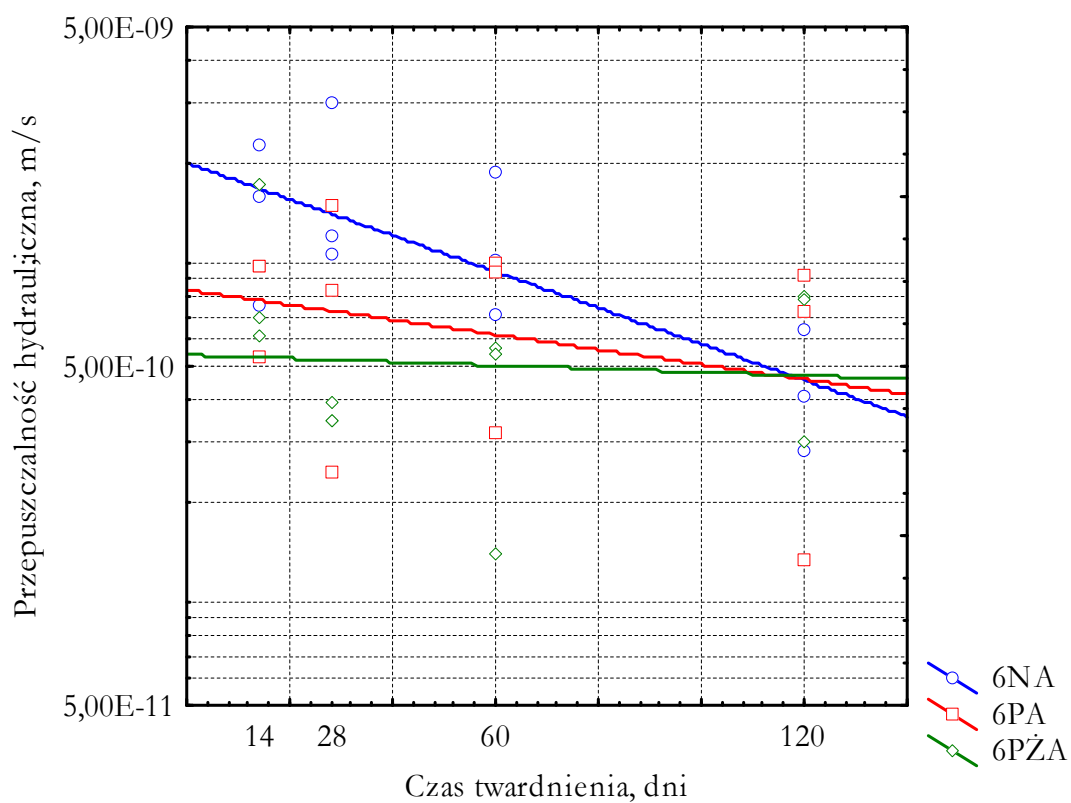
Rys. 5.25. Przepuszczalność hydrauliczna w funkcji czasu twardnienia receptury 3 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



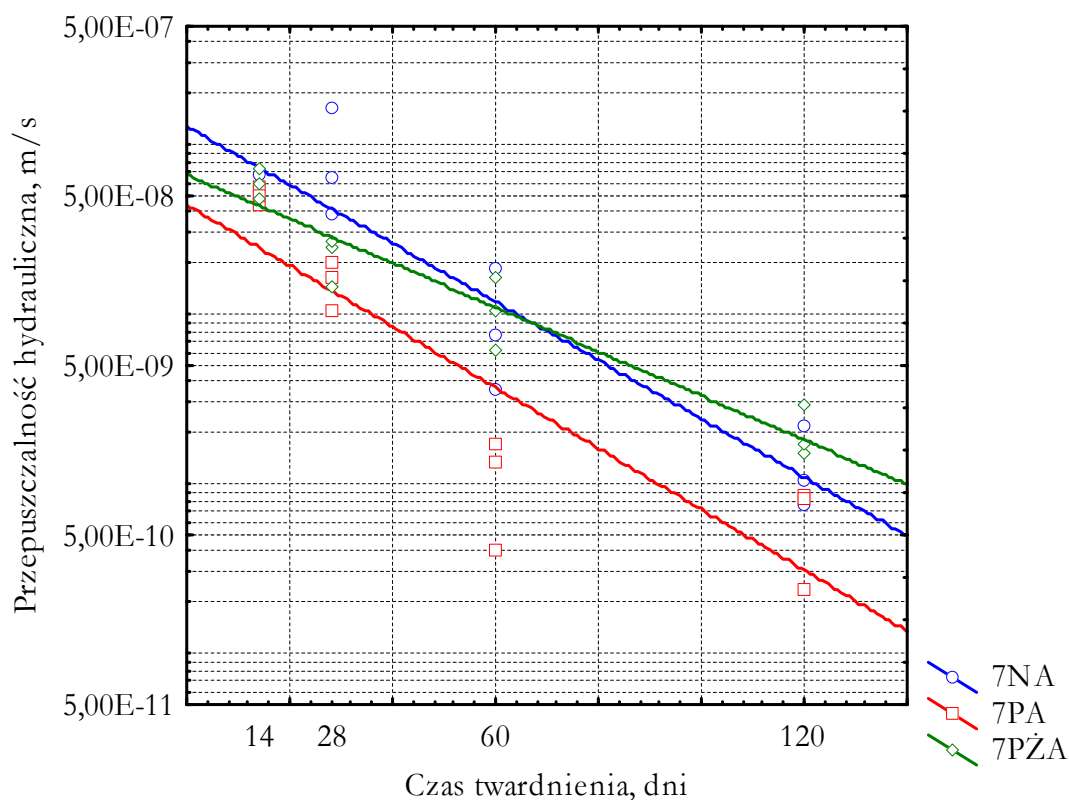
Rys. 5.26. Przepuszczalność hydrauliczna w funkcji czasu twardnienia receptury 4 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



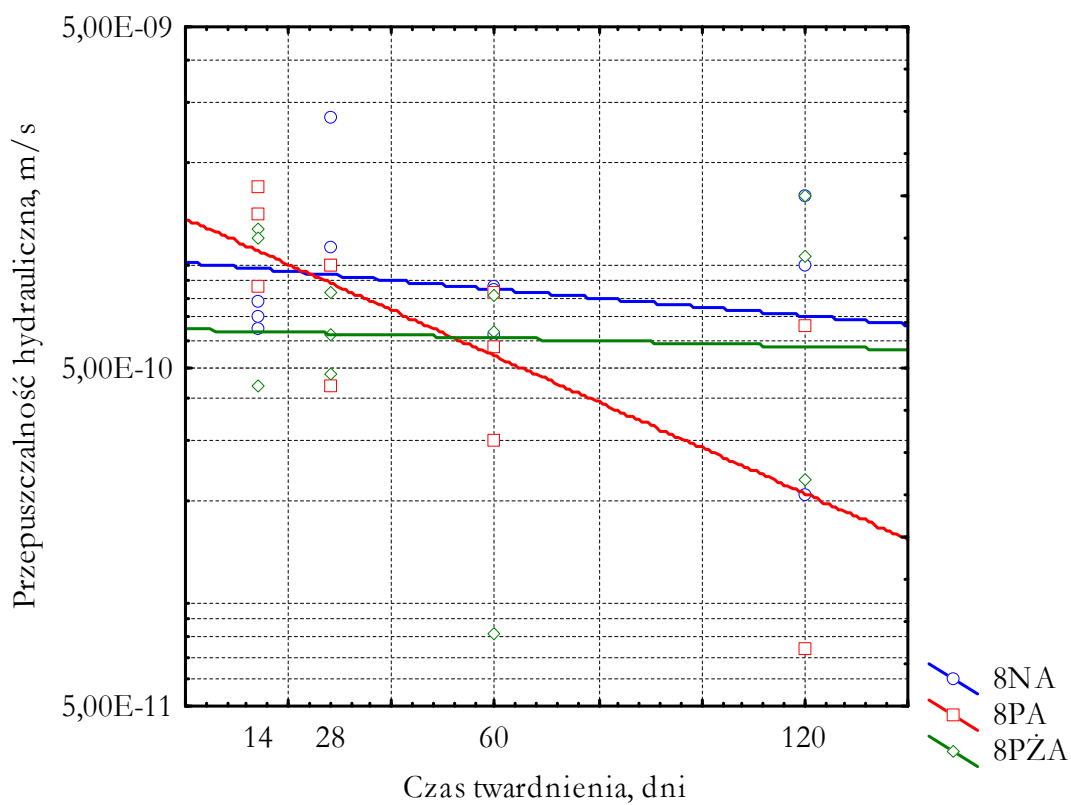
Rys. 5.27. Przepuszczalność hydrauliczna w funkcji czasu twardnienia receptury 5 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



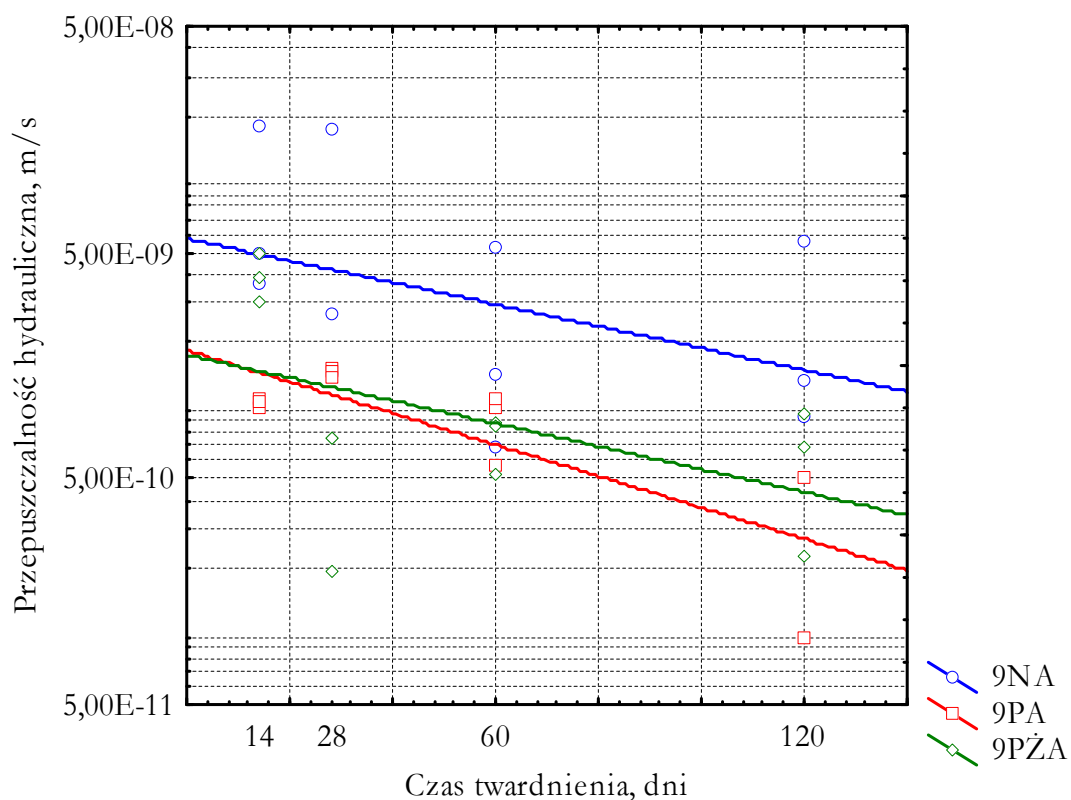
Rys. 5.28. Przepuszczalność hydrauliczna w funkcji czasu twardnienia receptury 6 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



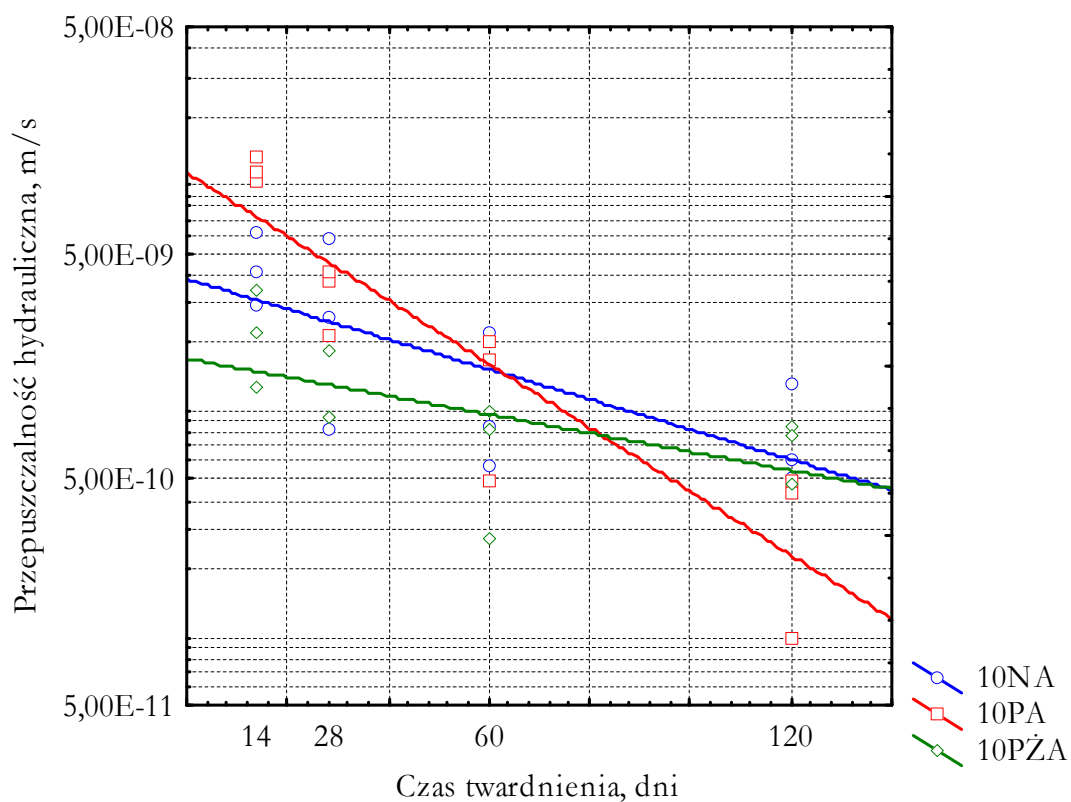
Rys. 5.29. Przepuszczalność hydrauliczna w funkcji czasu twardnienia receptury 7 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



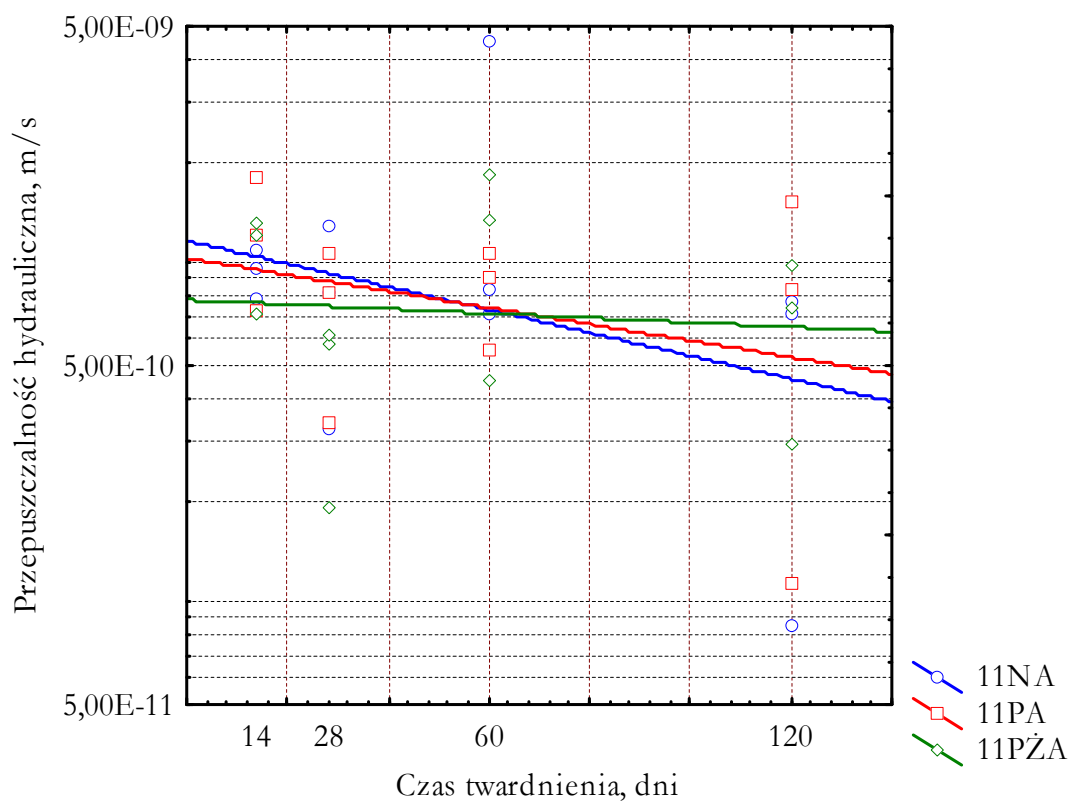
Rys. 5.30. Przepuszczalność hydrauliczna w funkcji czasu twardnienia receptury 8 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



Rys. 5.31. Przepuszczalność hydrauliczna w funkcji czasu twardnienia receptury 9 zawiesziny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



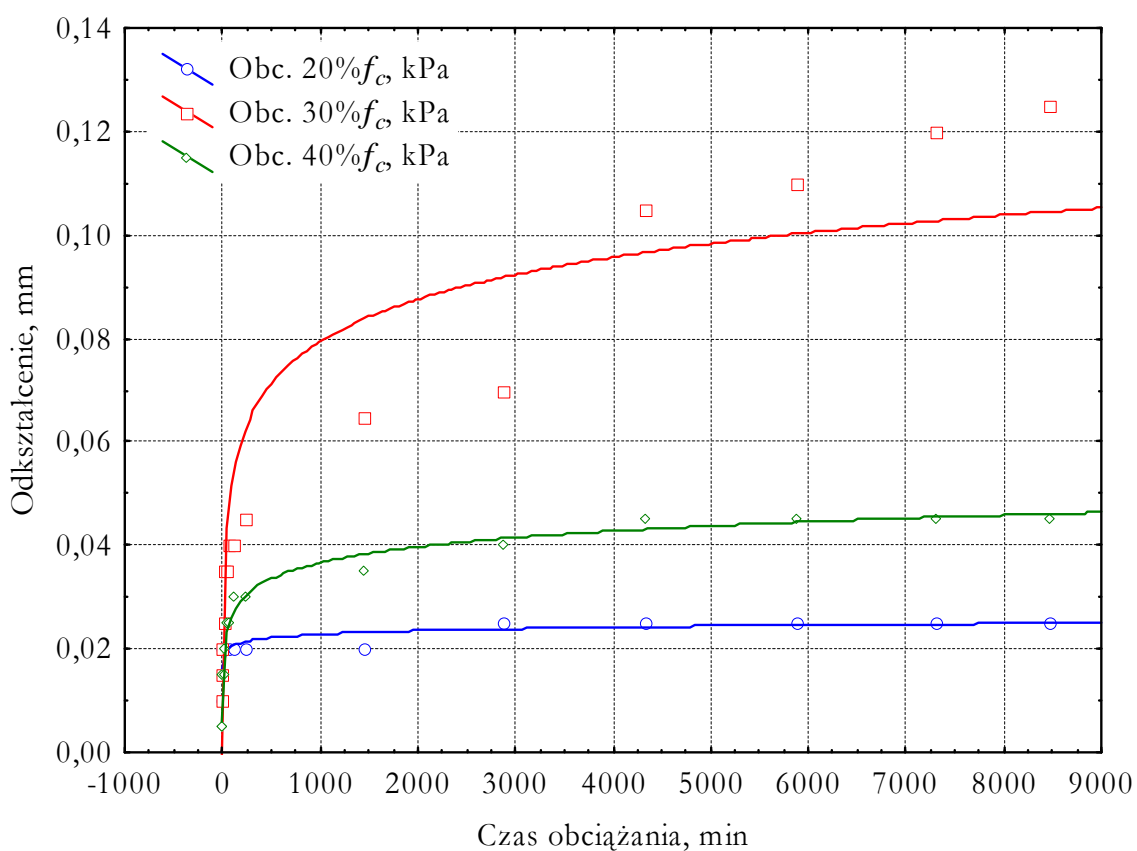
Rys. 5.32. Przepuszczalność hydrauliczna w funkcji czasu twardnienia receptury 10 zawiesziny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PZA)



Rys. 5.33. Przepuszczalność hydrauliczna w funkcji czasu twardnienia receptury 11 zawiesiny w trzech stanach aktywacji (NA, PA i PŻA)

Tabela 5.4. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka 1NA po 28 dniach twardnienia

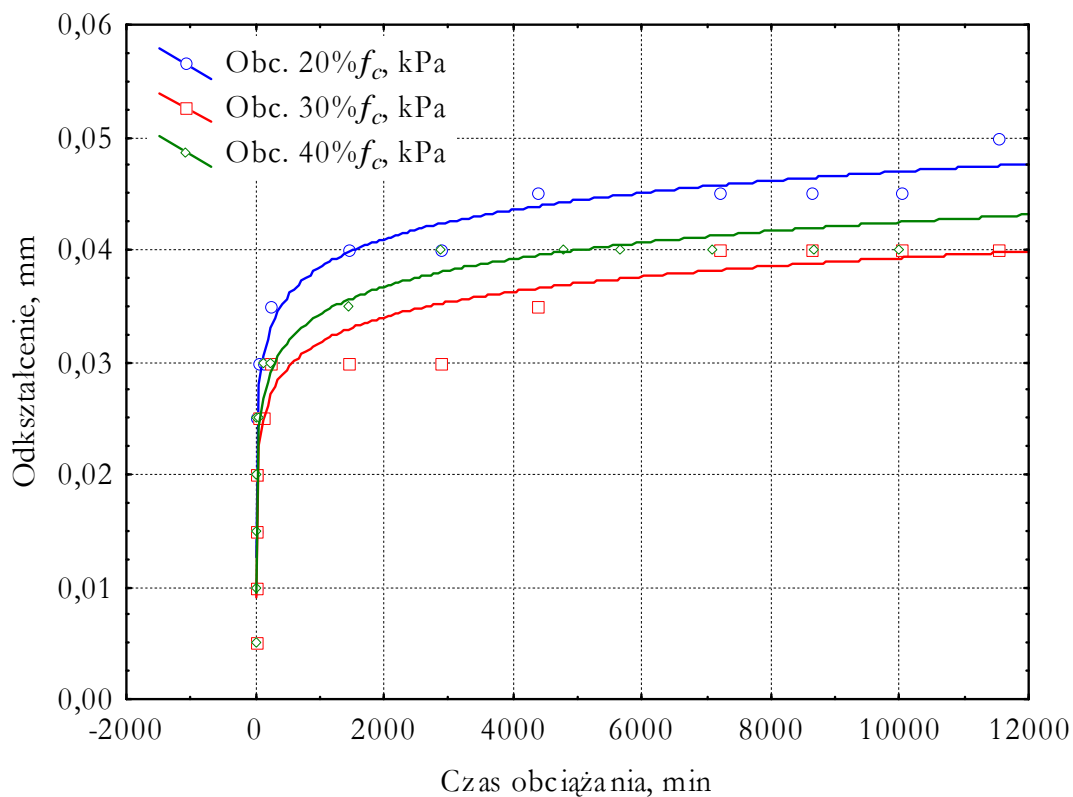
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		73,0 kPa	112,5 kPa	148,4 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
1NA	1	0,010	0,010	0,005
	2	0,020	0,015	0,005
	5	0,020	0,020	0,015
	10	0,020	0,025	0,015
	15	0,020	0,035	0,020
	30	0,020	0,035	0,025
	60	0,020	0,040	0,025
	120	0,020	0,040	0,030
	240	0,020	0,045	0,030
	1440	0,020	0,065	0,035
	2880	0,025	0,070	0,040
	4320	0,025	0,105	0,045
	5876	0,025	0,110	0,045
	7316	0,025	0,120	0,045
	8456	0,025	0,125	0,045



Rys. 5.34. Odkształcenie w czasie próbki 1NA po 28 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.5. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka 2NA po 28 dniach twardnienia

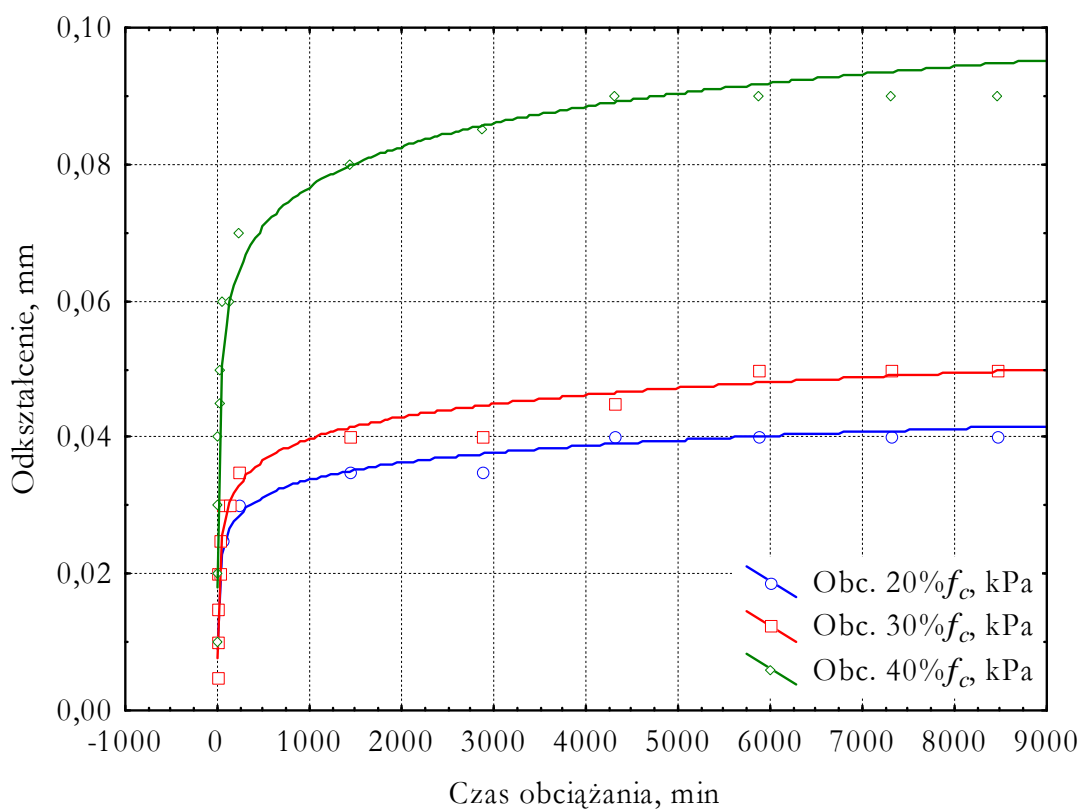
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c	Czas obciążania, min
		117,2 kPa	179,7 kPa	241,4 kPa	
Odkształcenie, mm					
1	2	3	4	5	6
2NA	1	0,010	0,005	0,005	1
	2	0,015	0,010	0,010	2
	5	0,020	0,015	0,015	5
	10	0,020	0,020	0,020	10
	15	0,025	0,020	0,020	15
	30	0,025	0,020	0,025	30
	60	0,030	0,025	0,025	60
	120	0,030	0,025	0,030	120
	240	0,035	0,030	0,030	240
	1440	0,040	0,030	0,035	1440
	2885	0,040	0,030	0,040	2873
	4360	0,045	0,035	0,040	4781
	7200	0,045	0,040	0,040	5648
	8640	0,045	0,040	0,040	7088
	10020	0,045	0,040	0,040	8673
11520	0,050	0,040	0,040	10003	



Rys. 5.35. Odkształcenie w czasie próbki 2NA po 28 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.6. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka 3NA po 28 dniach twardnienia

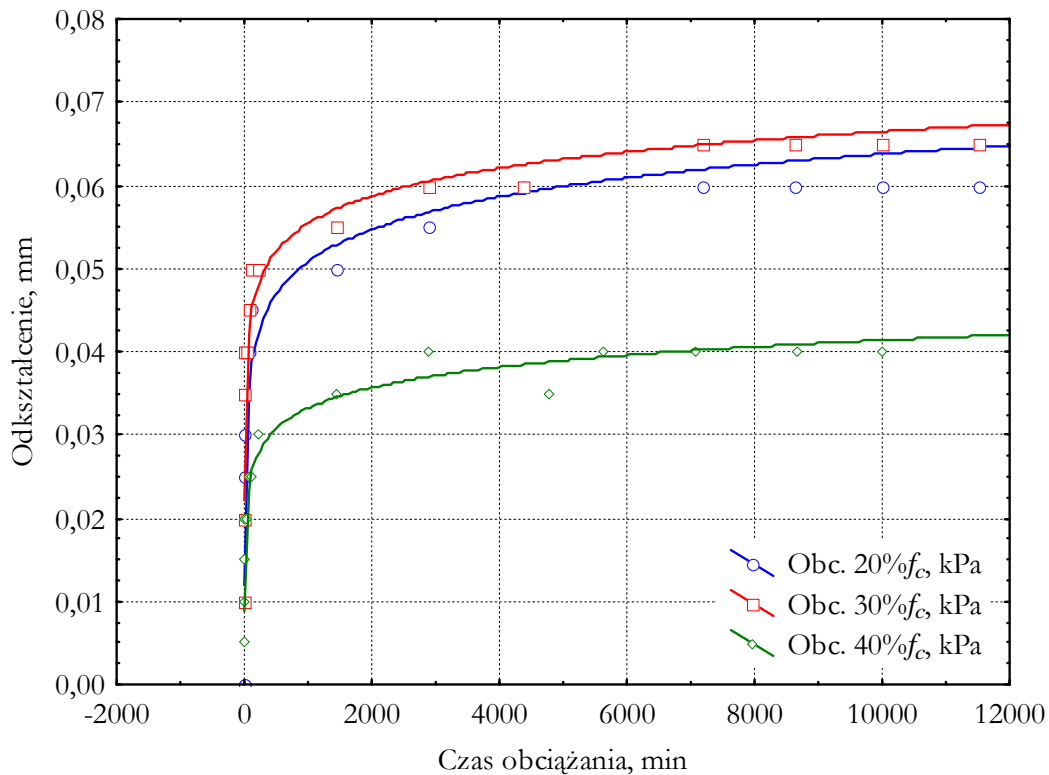
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		325 kPa	488,3 kPa	648,4 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
3NA	1	0,005	0,005	0,010
	2	0,010	0,010	0,020
	5	0,015	0,015	0,030
	10	0,020	0,020	0,040
	15	0,020	0,020	0,045
	30	0,020	0,025	0,050
	60	0,025	0,030	0,060
	120	0,030	0,030	0,060
	240	0,030	0,035	0,070
	1440	0,035	0,040	0,080
	2880	0,035	0,040	0,085
	4320	0,040	0,045	0,090
	5876	0,040	0,050	0,090
	7316	0,040	0,050	0,090
	8456	0,040	0,050	0,090



Rys. 5.36. Odkształcenie w czasie próbki 3NA po 28 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.7. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka 4NA po 28 dniach twardnienia

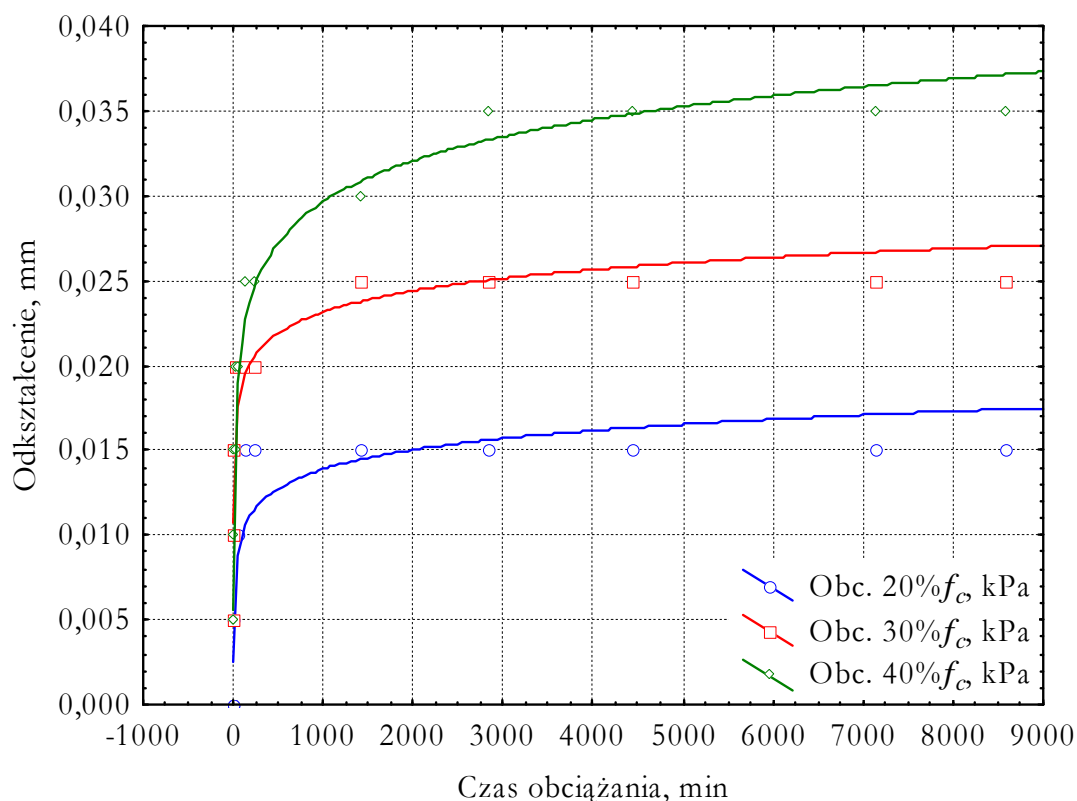
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c	Czas obciążania, min
		488,3 kPa	730,5 kPa	976,6 kPa	
Odkształcenie, mm					
1	2	3	4	5	6
4NA	1	0,000	0,010	0,005	1
	2	0,000	0,020	0,010	2
	5	0,025	0,035	0,015	5
	10	0,030	0,040	0,020	10
	15	0,035	0,040	0,020	15
	30	0,040	0,040	0,020	30
	60	0,040	0,045	0,025	60
	120	0,045	0,050	0,025	120
	240	0,050	0,050	0,030	240
	1440	0,050	0,055	0,035	1440
	2885	0,055	0,060	0,040	2873
	4360	0,060	0,060	0,035	4781
	7200	0,060	0,065	0,040	5648
	8640	0,060	0,065	0,040	7088
	10020	0,060	0,065	0,040	8673
11520	0,060	0,065	0,040	10003	



Rys. 5.37. Odkształcenie w czasie próbki 4NA po 28 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.8. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka 1NA po 90 dniach twardnienia

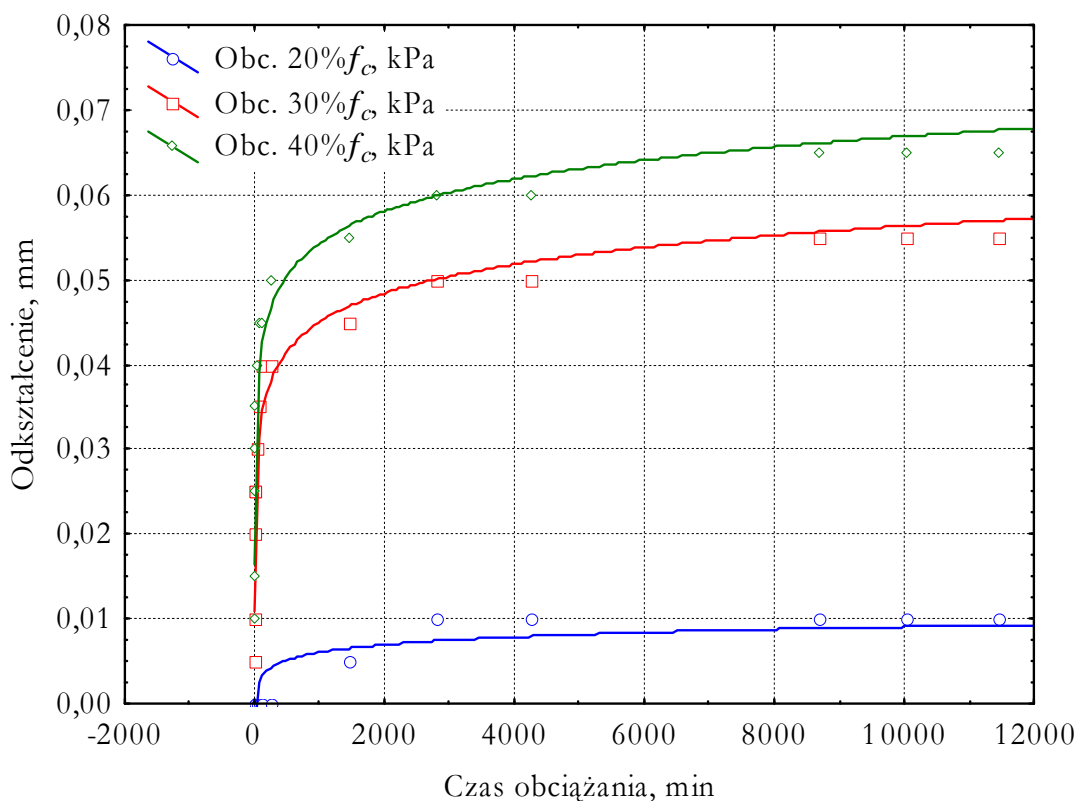
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		89,8 kPa	137,5 kPa	179,6 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
1NA	1	0,000	0,005	0,005
	2	0,000	0,010	0,005
	5	0,005	0,015	0,010
	10	0,005	0,015	0,015
	15	0,010	0,020	0,015
	30	0,010	0,020	0,020
	60	0,010	0,020	0,020
	120	0,015	0,020	0,025
	240	0,015	0,020	0,025
	1425	0,015	0,025	0,030
	2820	0,015	0,025	0,035
	4425	0,015	0,025	0,035
	7130	0,015	0,025	0,035
	8580	0,015	0,025	0,035



Rys. 5.38. Odkształcenie w czasie próbki 1NA po 90 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.9. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka 2NA po 90 dniach twardnienia

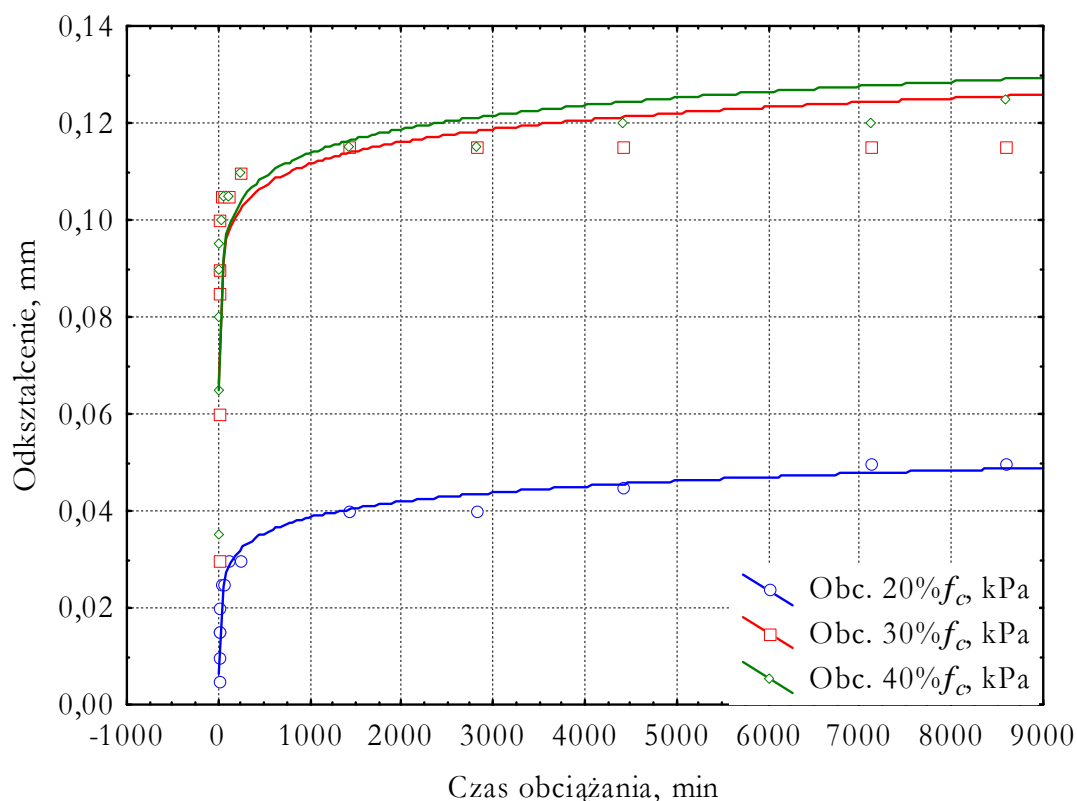
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		136,3 kPa	200,0 kPa	273,1 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
2NA	1	0,000	0,005	0,010
	2	0,000	0,010	0,015
	5	0,000	0,020	0,025
	10	0,000	0,025	0,030
	15	0,000	0,025	0,035
	30	0,000	0,030	0,040
	60	0,000	0,035	0,045
	120	0,000	0,040	0,045
	240	0,000	0,040	0,050
	1468	0,005	0,045	0,055
	2813	0,010	0,050	0,060
	4253	0,010	0,050	0,060
	8683	0,010	0,055	0,065
	10038	0,010	0,055	0,065
	11453	0,010	0,055	0,065



Rys. 5.39. Odkształcenie w czasie próbki 2NA po 90 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.10. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka 3NA po 90 dniach twardnienia

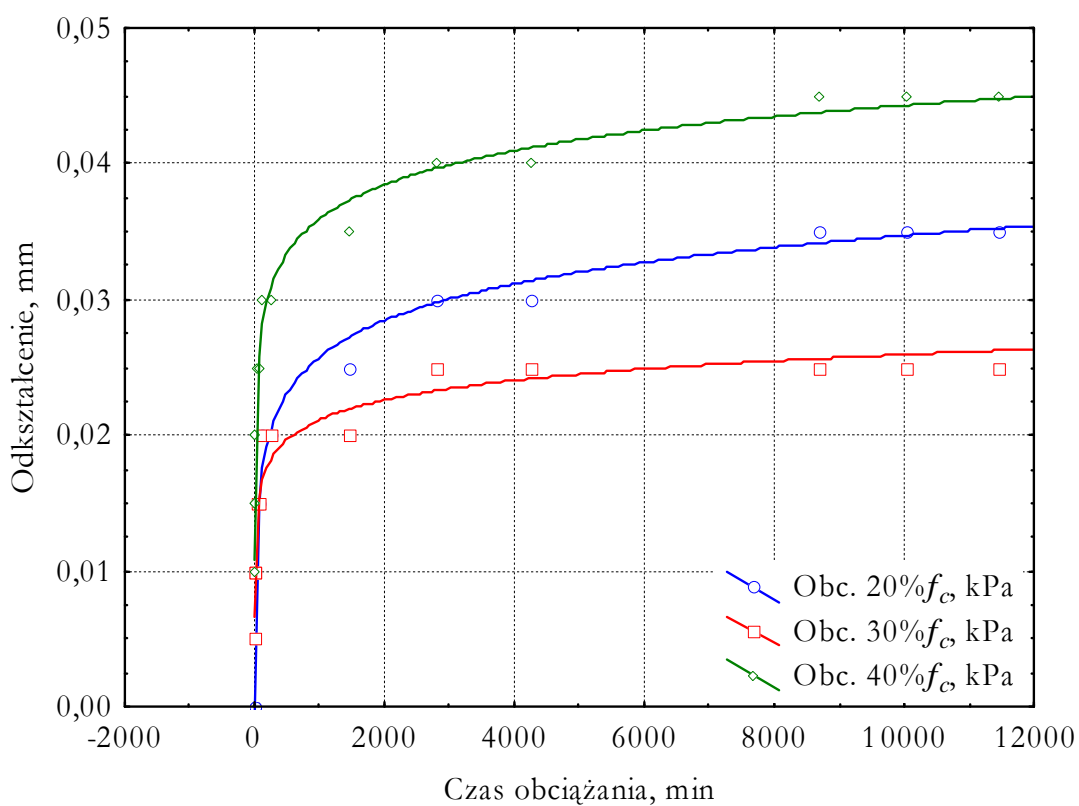
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		493,6 kPa	745,8 kPa	994,4 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
3NA	1	0,005	0,030	0,035
	2	0,010	0,060	0,065
	5	0,015	0,085	0,080
	10	0,015	0,090	0,090
	15	0,020	0,100	0,095
	30	0,025	0,105	0,100
	60	0,025	0,105	0,105
	120	0,030	0,105	0,105
	240	0,030	0,110	0,110
	1425	0,040	0,115	0,115
	2820	0,040	0,115	0,115
	4425	0,045	0,115	0,120
	7130	0,050	0,115	0,120
	8580	0,050	0,115	0,125



Rys. 5.40. Odkształcenie w czasie próbki 3NA po 90 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.11. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka 4NA po 90 dniach twardnienia

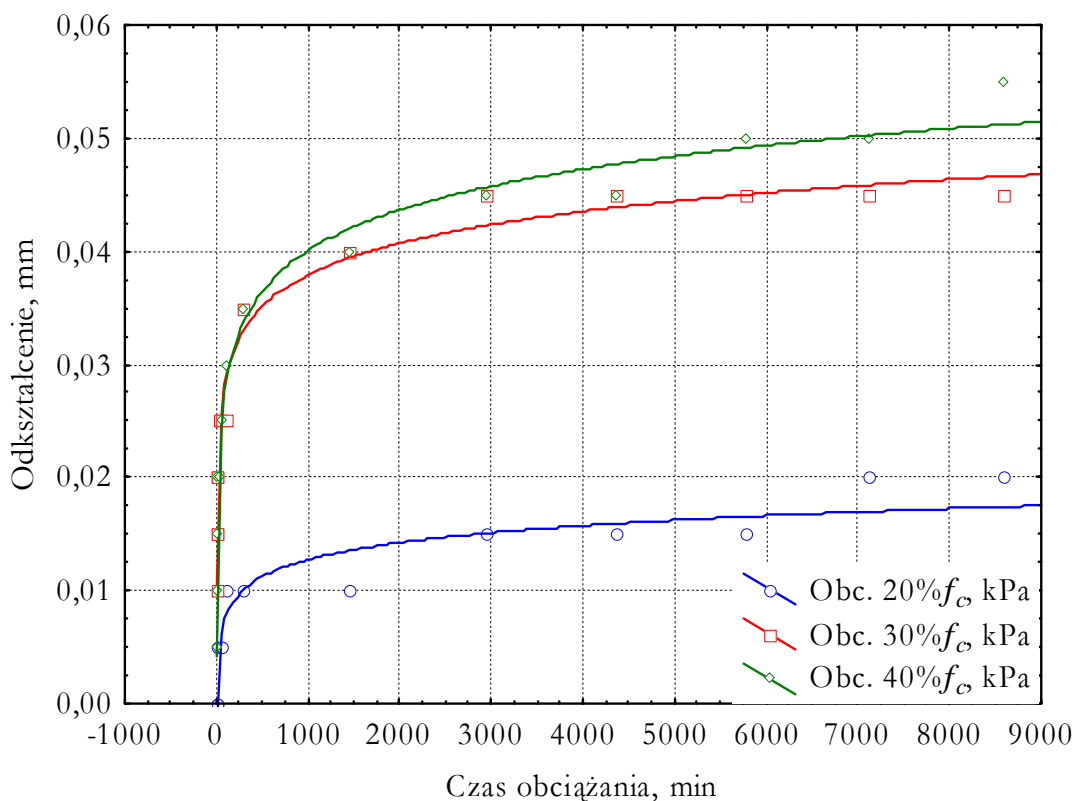
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		656,0 kPa	984,4 kPa	1312,8 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
4NA	1	0,000	0,005	0,010
	2	0,000	0,010	0,015
	5	0,000	0,010	0,015
	10	0,010	0,010	0,020
	15	0,010	0,010	0,020
	30	0,015	0,015	0,025
	60	0,015	0,015	0,025
	120	0,020	0,020	0,030
	240	0,020	0,020	0,030
	1468	0,025	0,020	0,035
	2813	0,030	0,025	0,040
	4253	0,030	0,025	0,040
	8683	0,035	0,025	0,045
	10038	0,035	0,025	0,045
	11453	0,035	0,025	0,045



Rys. 5.41. Odkształcenie w czasie próbki 4NA po 90 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.12. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka **1PA** po 28 dniach twardnienia

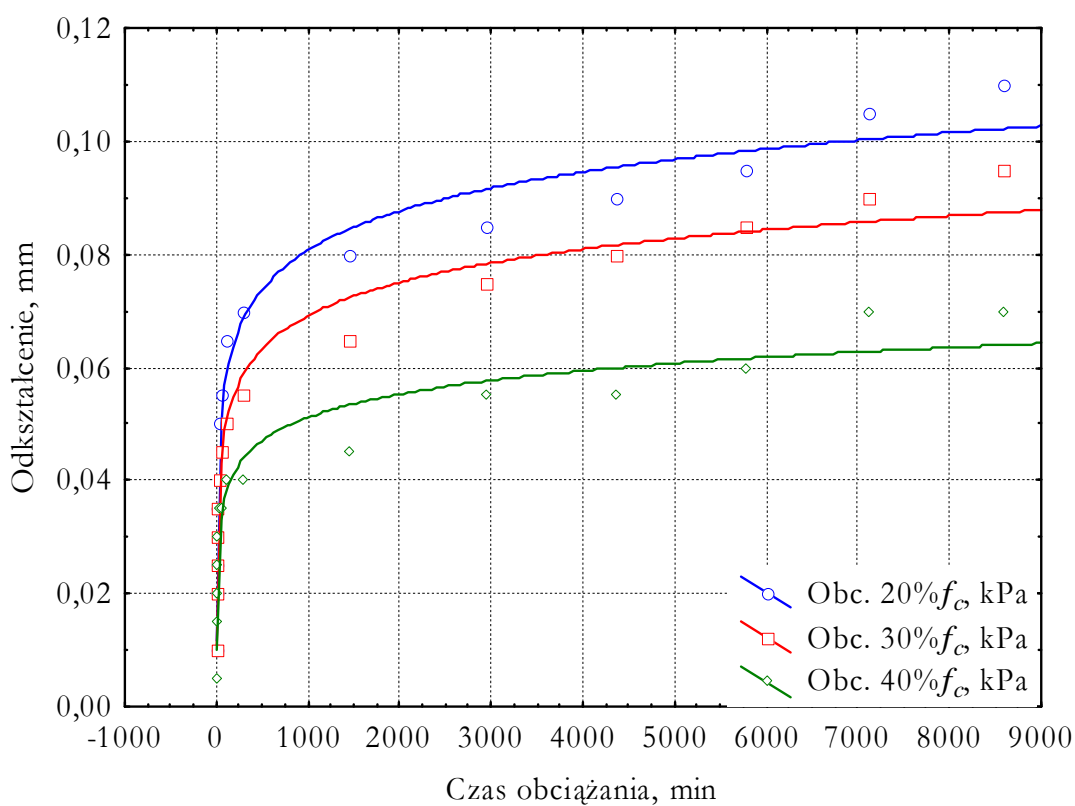
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		49,0 kPa	75,0 kPa	98,0 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
1PA	1	0,000	0,010	0,005
	2	0,000	0,015	0,010
	5	0,000	0,015	0,010
	10	0,000	0,020	0,015
	15	0,005	0,020	0,020
	30	0,005	0,025	0,020
	60	0,005	0,025	0,025
	120	0,010	0,025	0,030
	300	0,010	0,035	0,035
	1440	0,010	0,040	0,040
	2945	0,015	0,045	0,045
	4350	0,015	0,045	0,045
	5770	0,015	0,045	0,050
	7130	0,020	0,045	0,050
	8600	0,020	0,045	0,055



Rys. 5.42. Odkształcenie w czasie próbki 1PA po 28 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.13. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka **2PA** po 28 dniach twardnienia

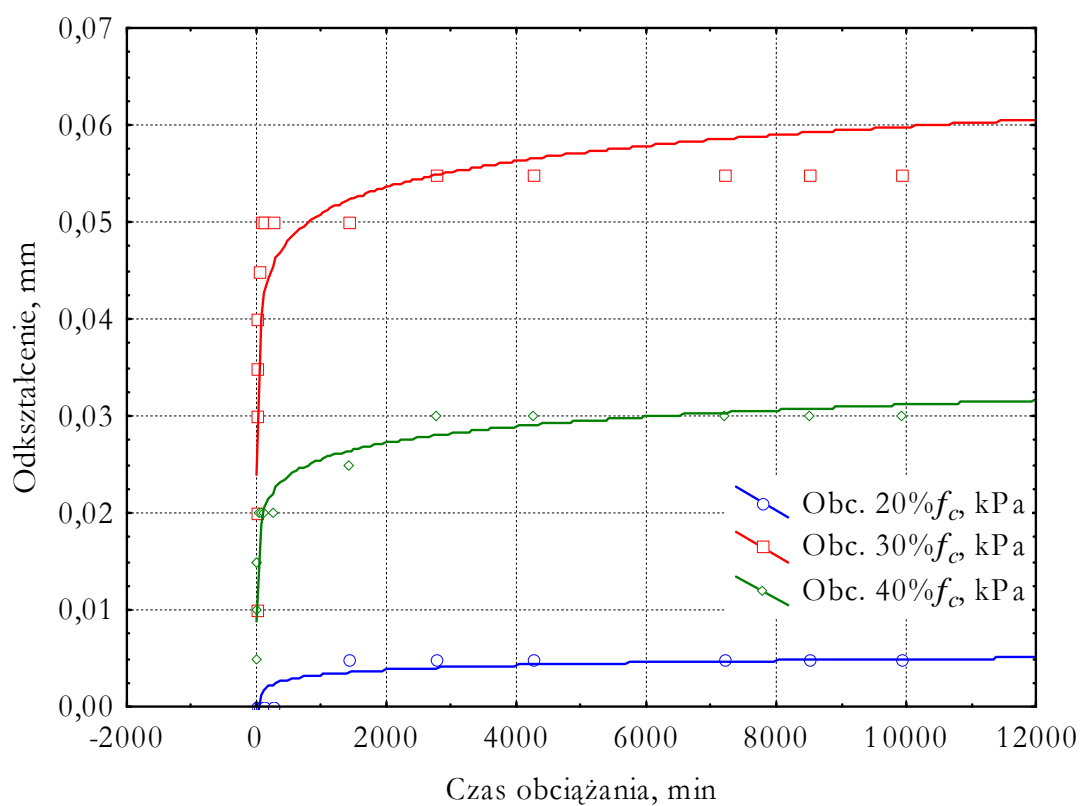
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		102,8 kPa	156,5 kPa	205,6 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
2PA	1	0,010	0,010	0,005
	2	0,020	0,020	0,015
	5	0,025	0,025	0,020
	10	0,035	0,030	0,025
	15	0,035	0,035	0,030
	30	0,050	0,040	0,035
	60	0,055	0,045	0,035
	120	0,065	0,050	0,040
	300	0,070	0,055	0,040
	1440	0,080	0,065	0,045
	2945	0,085	0,075	0,055
	4350	0,090	0,080	0,055
	5770	0,095	0,085	0,060
	7130	0,105	0,090	0,070
	8600	0,110	0,095	0,070



Rys. 5.43. Odkształcenie w czasie próbki 2PA po 28 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.14. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka **3PA** po 28 dniach twardnienia

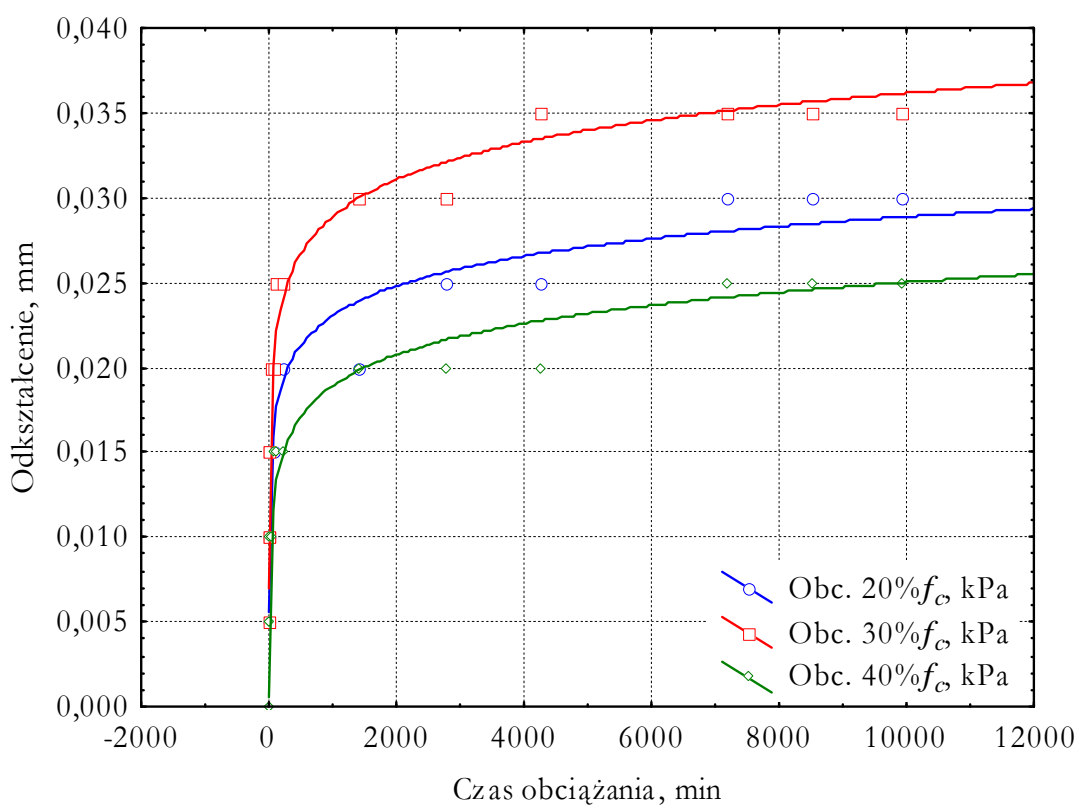
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		241,6 kPa	362,4 kPa	483,2 kPa
Odkształcenie, mm				
1	2	3	4	5
3PA	1	0,000	0,010	0,005
	2	0,000	0,020	0,010
	5	0,000	0,030	0,015
	10	0,000	0,035	0,015
	15	0,000	0,040	0,015
	30	0,000	0,045	0,020
	60	0,000	0,050	0,020
	120	0,000	0,050	0,020
	240	0,000	0,050	0,020
	1425	0,005	0,050	0,025
	2780	0,005	0,055	0,030
	4270	0,005	0,055	0,030
	7190	0,005	0,055	0,030
	8510	0,005	0,055	0,030
	9910	0,005	0,055	0,030



Rys. 5.44. Odkształcenie w czasie próbki 3PA po 28 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.15. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka 4PA po 28 dniach twardnienia

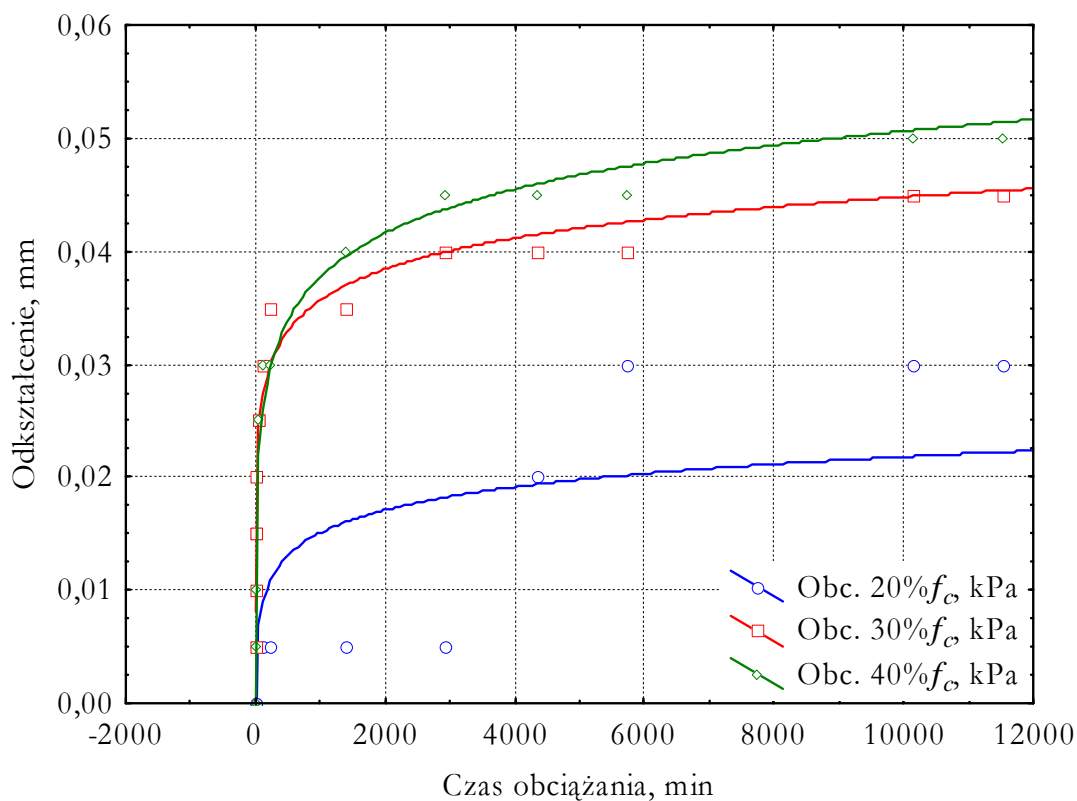
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		473,4 kPa	710,1 kPa	946,8 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
4PA	1	0,005	0,005	0,000
	2	0,010	0,010	0,000
	5	0,010	0,010	0,005
	10	0,010	0,015	0,005
	15	0,010	0,015	0,010
	30	0,015	0,020	0,010
	60	0,015	0,020	0,015
	120	0,020	0,025	0,015
	240	0,020	0,025	0,015
	1425	0,020	0,030	0,020
	2780	0,025	0,030	0,020
	4270	0,025	0,035	0,020
	7190	0,030	0,035	0,025
	8510	0,030	0,035	0,025
	9910	0,030	0,035	0,025



Rys. 5.45. Odkształcenie w czasie próbki 4PA po 28 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.16. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka **1PA** po 90 dniach twardnienia

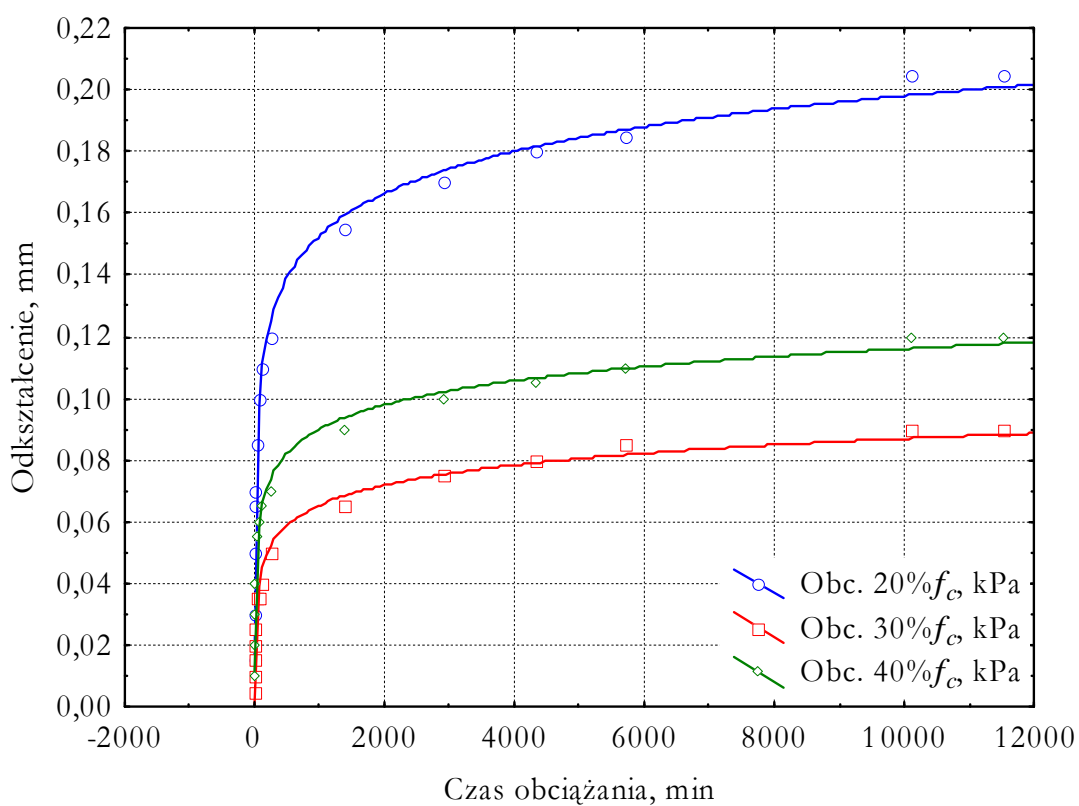
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		49,0 kPa	75,0 kPa	98,0 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
1PA	1	0,000	0,005	0,000
	2	0,000	0,010	0,000
	5	0,000	0,015	0,005
	10	0,000	0,015	0,010
	15	0,005	0,020	0,010
	30	0,005	0,025	0,025
	60	0,005	0,025	0,025
	120	0,005	0,030	0,030
	240	0,005	0,035	0,030
	1400	0,005	0,035	0,040
	2925	0,005	0,040	0,045
	4345	0,020	0,040	0,045
	5725	0,030	0,040	0,045
	10125	0,030	0,045	0,050
	11525	0,030	0,045	0,050



Rys. 5.46. Odkształcenie w czasie próbki 1PA po 90 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.17. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka **2PA** po 90 dniach twardnienia

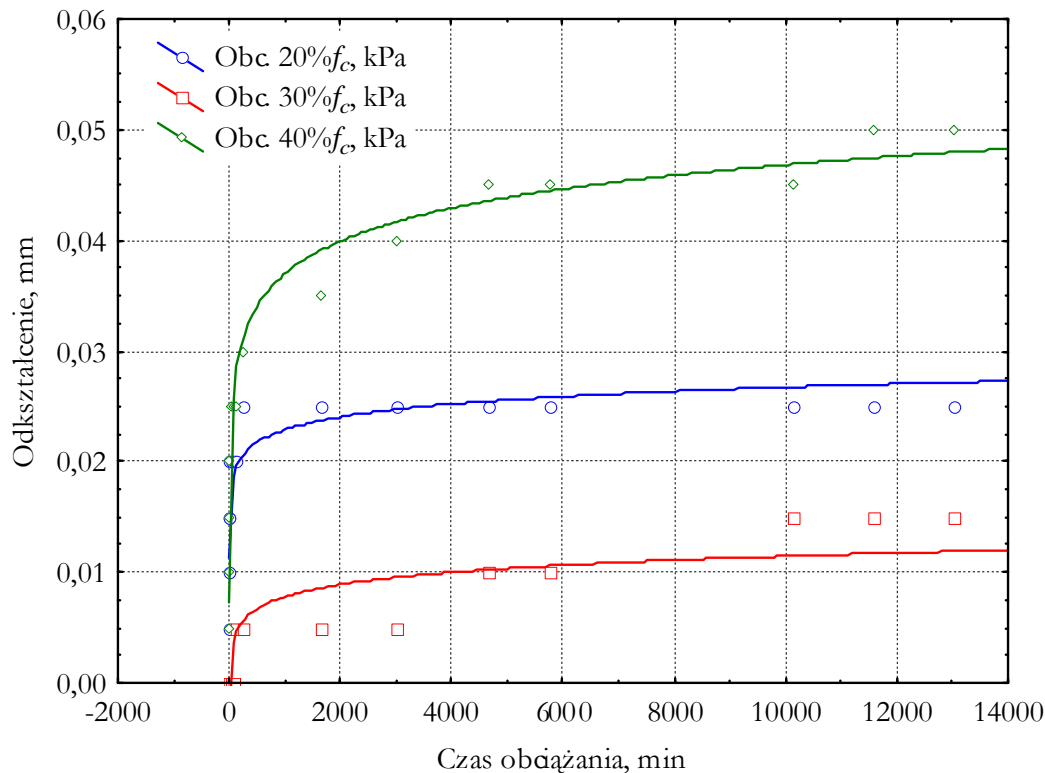
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		102,8 kPa	156,5 kPa	205,6 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
2PA	1	0,015	0,005	0,010
	2	0,030	0,010	0,020
	5	0,050	0,015	0,030
	10	0,065	0,020	0,040
	15	0,070	0,025	0,040
	30	0,085	0,035	0,055
	60	0,100	0,035	0,060
	120	0,110	0,040	0,065
	240	0,120	0,050	0,070
	1400	0,155	0,065	0,090
	2925	0,170	0,075	0,100
	4345	0,180	0,080	0,105
	5725	0,185	0,085	0,110
	10125	0,205	0,090	0,120
	11525	0,205	0,090	0,120



Rys. 5.47. Odkształcenie w czasie próbki 2PA po 90 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.18. Odształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka **3PA** po 90 dniach twardnienia

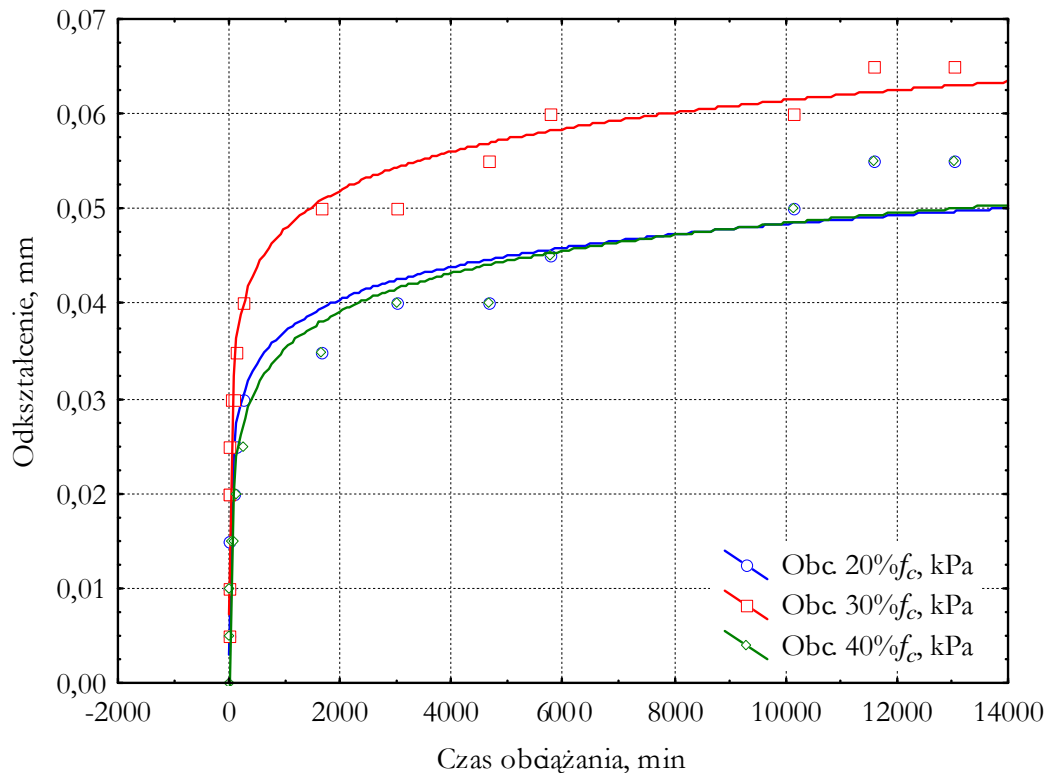
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		241,6 kPa	362,4 kPa	483,2 kPa
		Odształcenie, mm		
1	2	3	4	5
3PA	1	0,005	0,000	0,005
	2	0,010	0,000	0,010
	5	0,015	0,000	0,015
	10	0,015	0,000	0,020
	15	0,020	0,000	0,020
	30	0,020	0,000	0,025
	60	0,020	0,000	0,025
	120	0,020	0,005	0,025
	240	0,025	0,005	0,030
	1640	0,025	0,005	0,035
	3010	0,025	0,005	0,040
	4675	0,025	0,010	0,045
	5770	0,025	0,010	0,045
	10160	0,025	0,015	0,045
	11580	0,025	0,015	0,050
13020	0,025	0,015	0,050	



Rys. 5.48. Odształcenie w czasie próbki 3PA po 90 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.19. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka **4PA** po 90 dniach twardnienia

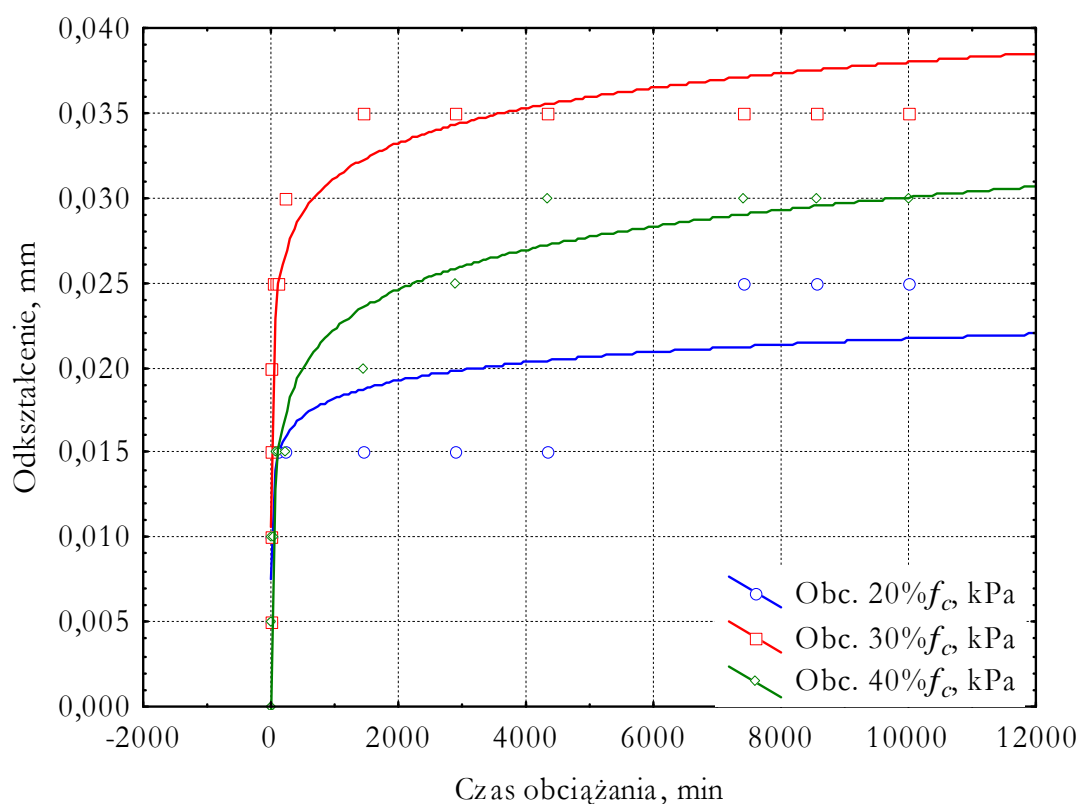
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		473,4 kPa	710,1 kPa	946,8 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
4PA	1	0,005	0,005	0,000
	2	0,010	0,010	0,000
	5	0,010	0,020	0,005
	10	0,015	0,020	0,010
	15	0,015	0,025	0,010
	30	0,020	0,030	0,015
	60	0,020	0,030	0,015
	120	0,025	0,035	0,020
	240	0,030	0,040	0,025
	1640	0,035	0,050	0,035
	3010	0,040	0,050	0,040
	4675	0,040	0,055	0,040
	5770	0,045	0,060	0,045
	10160	0,050	0,060	0,050
	11580	0,055	0,065	0,055
13020	0,055	0,065	0,055	



Rys. 5.49. Odkształcenie w czasie próbki 4PA po 90 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.20. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka **1PZA** po 28 dniach twardnienia

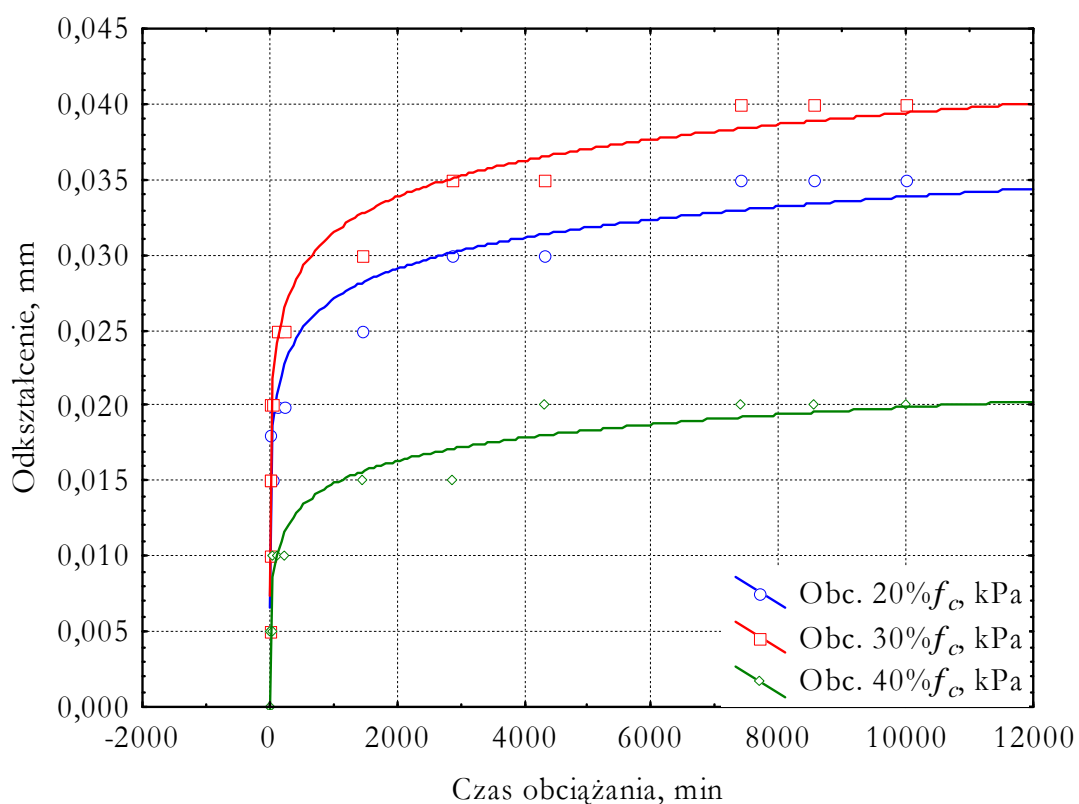
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		79,0 kPa	125,0 kPa	159,4 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
1PZA	1	0,005	0,005	0,000
	2	0,010	0,010	0,000
	5	0,010	0,015	0,005
	10	0,010	0,020	0,005
	15	0,015	0,020	0,010
	30	0,015	0,025	0,010
	60	0,015	0,025	0,015
	120	0,015	0,025	0,015
	240	0,015	0,030	0,015
	1440	0,015	0,035	0,020
	2880	0,015	0,035	0,025
	4320	0,015	0,035	0,030
	7410	0,025	0,035	0,030
	8550	0,025	0,035	0,030
	9990	0,025	0,035	0,030



Rys. 5.50. Odkształcenie w czasie próbki 1PZA po 28 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.21. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka **2PZA** po 28 dniach twardnienia

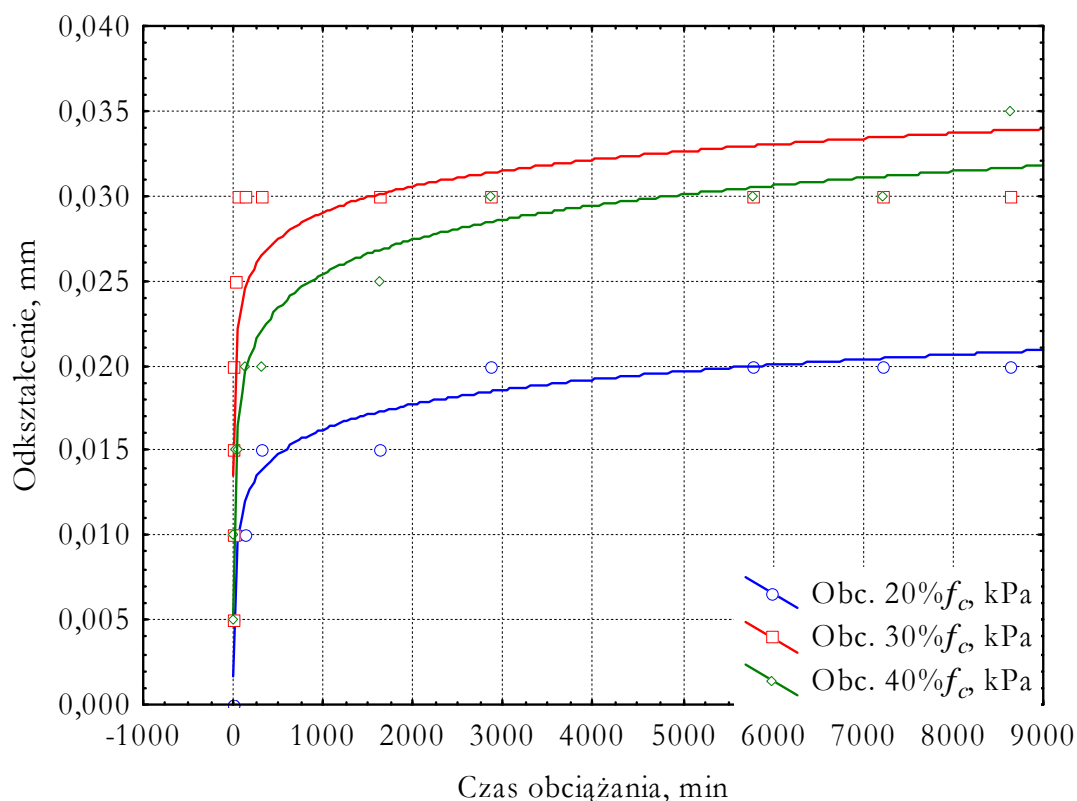
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		89,8 kPa	136,7 kPa	179,7 kPa
Odkształcenie, mm				
1	2	3	4	5
2PZA	1	0,005	0,005	0,000
	2	0,010	0,010	0,000
	5	0,010	0,015	0,005
	10	0,018	0,015	0,005
	15	0,015	0,020	0,005
	30	0,015	0,020	0,005
	60	0,020	0,020	0,010
	120	0,020	0,025	0,010
	240	0,020	0,025	0,010
	1440	0,025	0,030	0,015
	2880	0,030	0,035	0,015
	4320	0,030	0,035	0,020
	7410	0,035	0,040	0,020
	8550	0,035	0,040	0,020
	9990	0,035	0,040	0,020



Rys. 5.51. Odkształcenie w czasie próbki 2PZA po 28 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.22. Odkształcenie próbki w czasie podczas badania edometrycznego; próbka 3PŻA po 28 dniach twardnienia

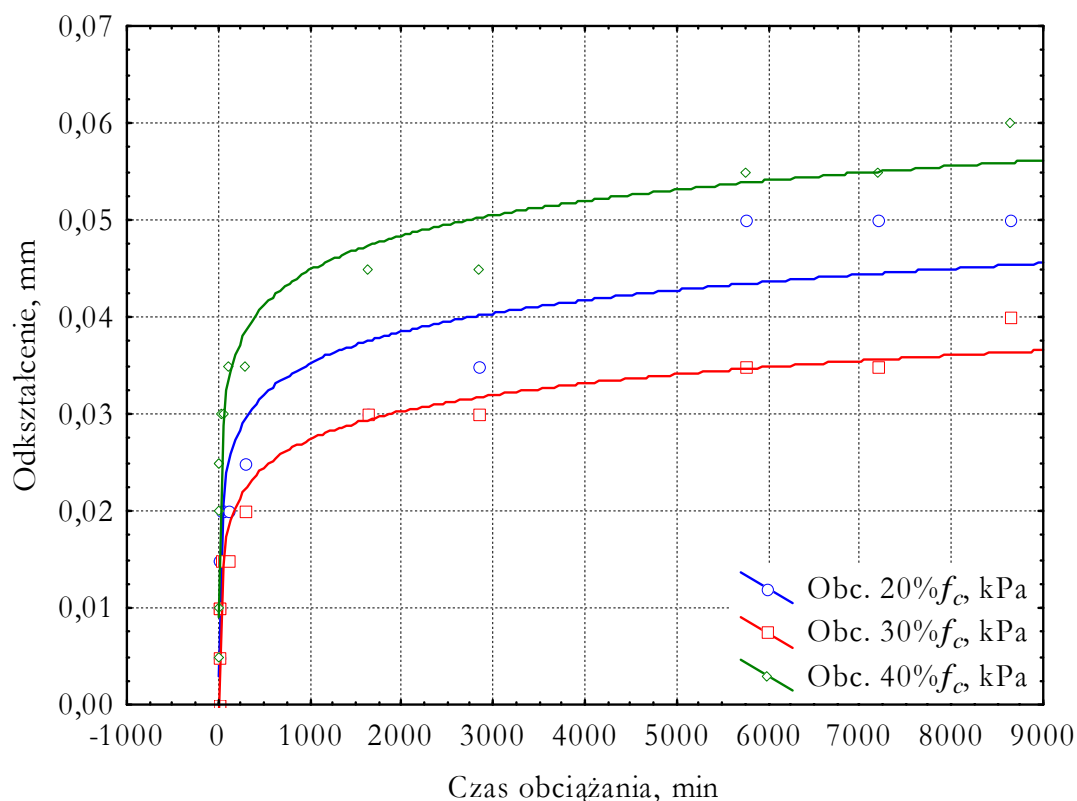
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		232,2 kPa	350,0 kPa	468,8 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
3PŻA	1	0,000	0,005	0,005
	2	0,000	0,010	0,010
	5	0,005	0,015	0,010
	10	0,010	0,020	0,010
	15	0,010	0,025	0,015
	30	0,010	0,025	0,015
	60	0,010	0,030	0,015
	120	0,010	0,030	0,020
	300	0,015	0,030	0,020
	1630	0,015	0,030	0,025
	2850	0,020	0,030	0,030
	5762	0,020	0,030	0,030
	7207	0,020	0,030	0,030
	8640	0,020	0,030	0,035



Rys. 5.52. Odkształcenie w czasie próbki 3PŻA po 28 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.23. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka 4PZA po 28 dniach twardnienia

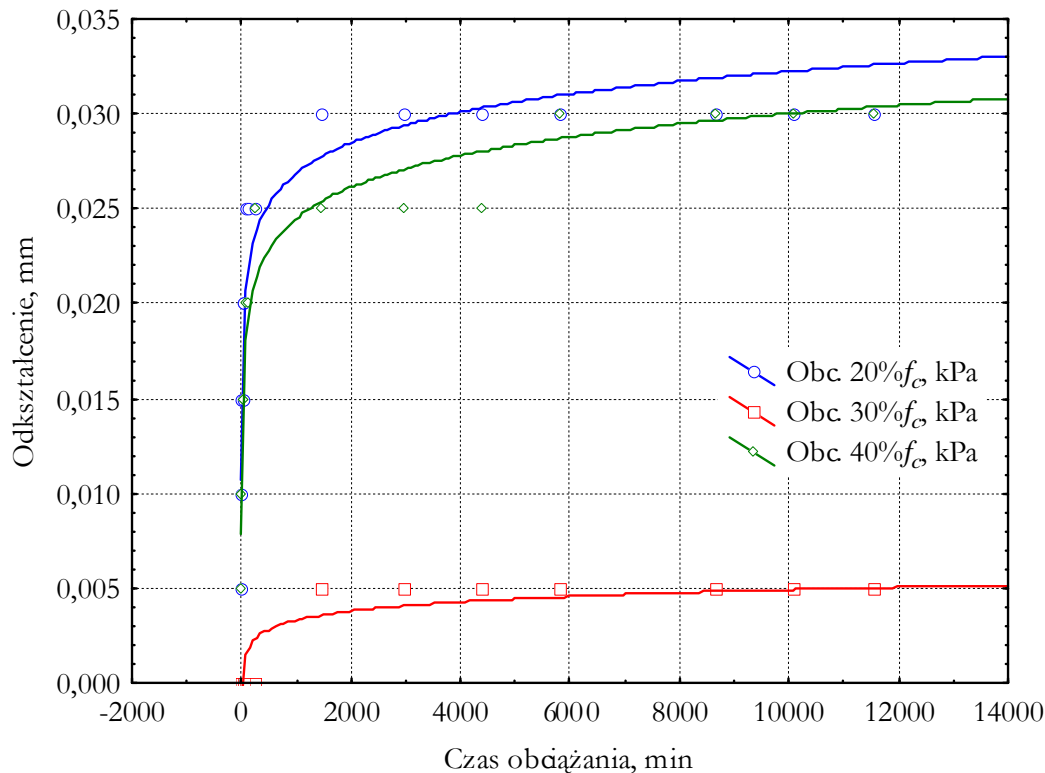
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		468,8 kPa	695,3 kPa	925,8 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
4PZA	1	0,005	0,000	0,005
	2	0,010	0,000	0,010
	5	0,010	0,005	0,020
	10	0,015	0,010	0,025
	15	0,015	0,010	0,025
	30	0,020	0,015	0,030
	60	0,020	0,015	0,030
	120	0,020	0,015	0,035
	300	0,025	0,020	0,035
	1630	0,030	0,030	0,045
	2850	0,035	0,030	0,045
	5762	0,050	0,035	0,055
	7207	0,050	0,035	0,055
	8640	0,050	0,040	0,060



Rys. 5.53. Odkształcenie w czasie próbki 4PZA po 28 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.24. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka **1PZA** po 90 dniach twardnienia

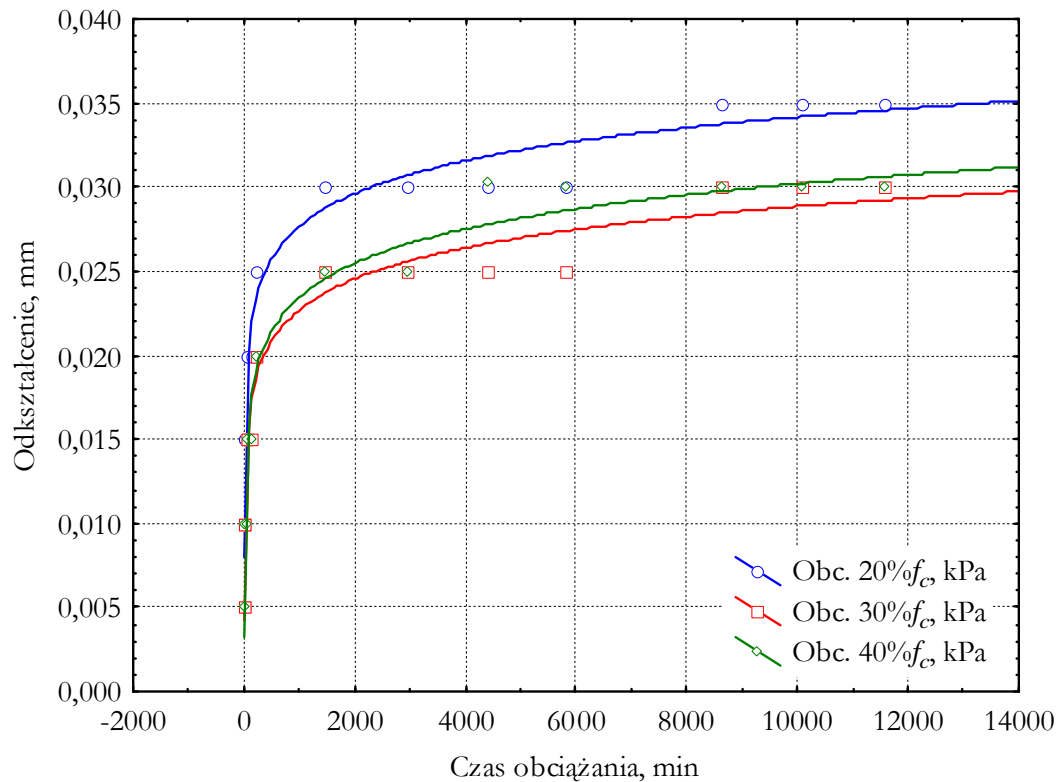
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		150,0 kPa	229,6 kPa	297,6 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
1PZA	1	0,005	0,000	0,005
	2	0,010	0,000	0,010
	5	0,015	0,000	0,010
	10	0,015	0,000	0,015
	15	0,020	0,000	0,015
	30	0,020	0,000	0,015
	60	0,025	0,000	0,020
	120	0,025	0,000	0,020
	240	0,025	0,000	0,025
	1440	0,030	0,005	0,025
	2960	0,030	0,005	0,025
	4380	0,030	0,005	0,025
	5820	0,030	0,005	0,030
	8640	0,030	0,005	0,030
	10080	0,030	0,005	0,030
	11550	0,030	0,005	0,030



Rys. 5.54. Odkształcenie w czasie próbki 1PZA po 90 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.25. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka **2PZA** po 90 dniach twardnienia

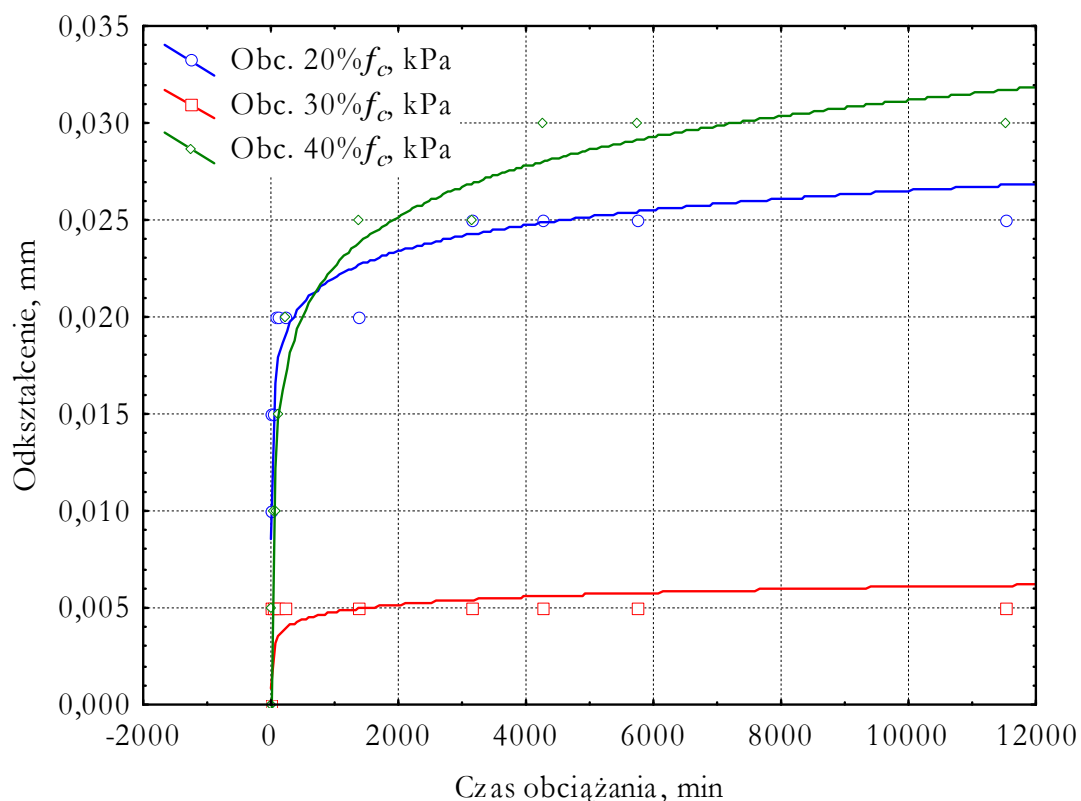
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		143,2 kPa	214,8 kPa	286,4 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
2PZA	1	0,005	0,005	0,005
	2	0,010	0,005	0,005
	5	0,015	0,010	0,010
	10	0,015	0,010	0,010
	15	0,015	0,010	0,010
	30	0,020	0,015	0,010
	60	0,020	0,015	0,015
	120	0,020	0,015	0,015
	240	0,025	0,020	0,020
	1440	0,030	0,025	0,025
	2960	0,030	0,025	0,025
	4380	0,030	0,025	0,030
	5820	0,030	0,025	0,030
	8640	0,035	0,030	0,030
	10080	0,035	0,030	0,030
	11550	0,035	0,030	0,030



Rys. 5.55. Odkształcenie w czasie próbki 2PZA po 90 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.27. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka **3PZA** po 90 dniach twardnienia

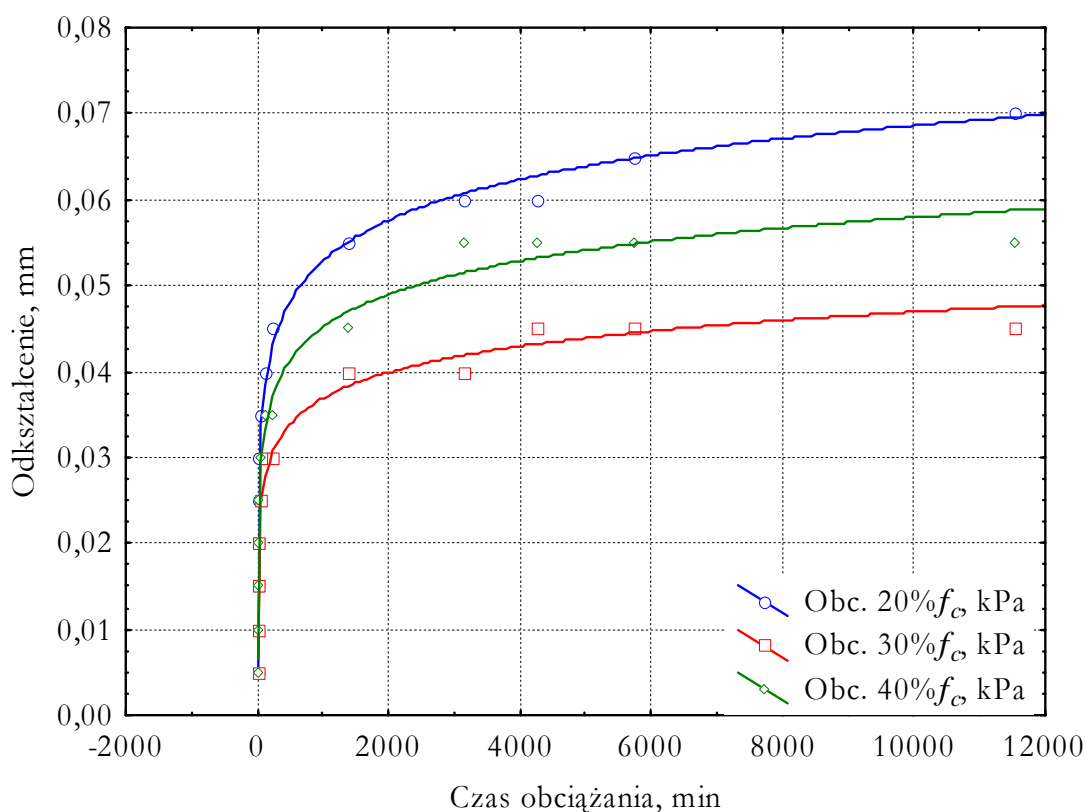
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		473,4 kPa	710,1 kPa	946,8 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
3PZA	1	0,005	0,000	0,000
	2	0,010	0,000	0,000
	5	0,010	0,000	0,000
	10	0,015	0,000	0,005
	15	0,015	0,005	0,005
	30	0,015	0,005	0,010
	60	0,020	0,005	0,010
	120	0,020	0,005	0,015
	240	0,020	0,005	0,020
	1380	0,020	0,005	0,025
	3135	0,025	0,005	0,025
	4260	0,025	0,005	0,030
	5735	0,025	0,005	0,030
	11520	0,025	0,005	0,030



Rys. 5.57. Odkształcenie w czasie próbki 3PZA po 90 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Tabela 5.28. Odkształcenie próbki w czasie badania edometrycznego; próbka 4PZA po 90 dniach twardnienia

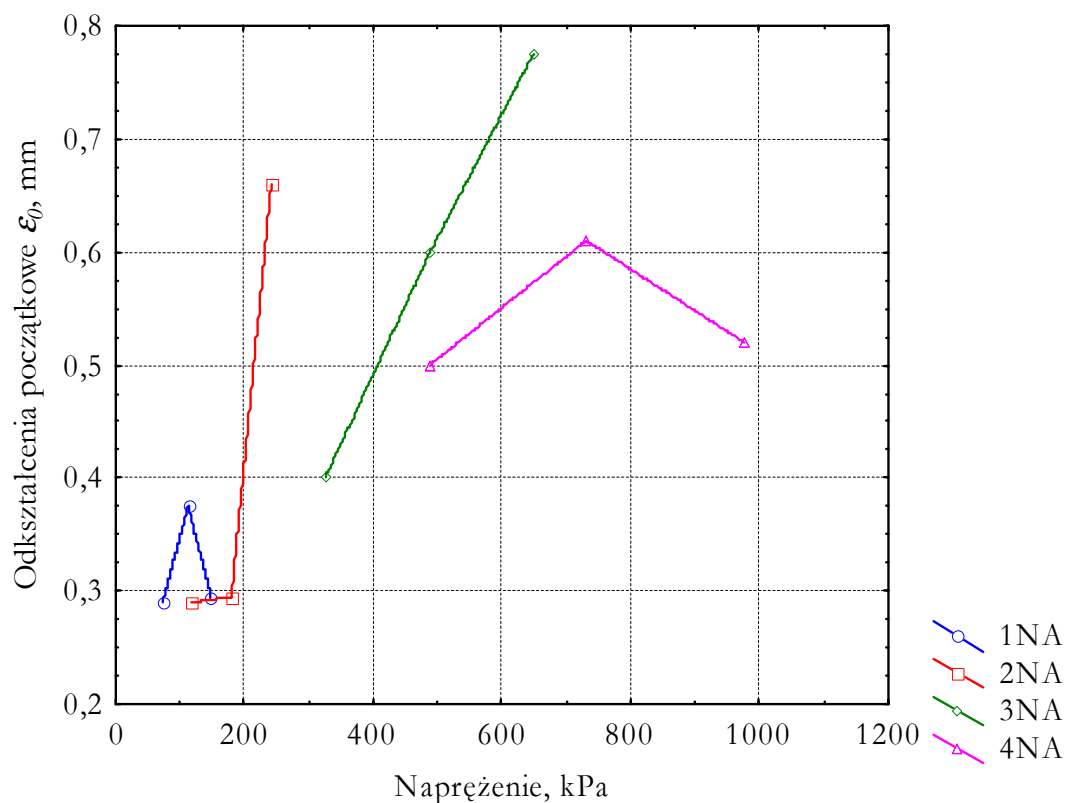
Receptura	Czas obciążania, min	Obciążenie 20% f_c	Obciążenie 30% f_c	Obciążenie 40% f_c
		701,0 kPa	1051,5 kPa	1402,0 kPa
		Odkształcenie, mm		
1	2	3	4	5
4PZA	1	0,005	0,005	0,005
	2	0,010	0,010	0,010
	5	0,015	0,015	0,015
	10	0,020	0,015	0,020
	15	0,025	0,020	0,025
	30	0,030	0,020	0,025
	60	0,035	0,025	0,030
	120	0,040	0,030	0,035
	240	0,045	0,030	0,035
	1380	0,055	0,040	0,045
	3135	0,060	0,040	0,055
	4260	0,060	0,045	0,055
	5735	0,065	0,045	0,055
	11520	0,070	0,045	0,055

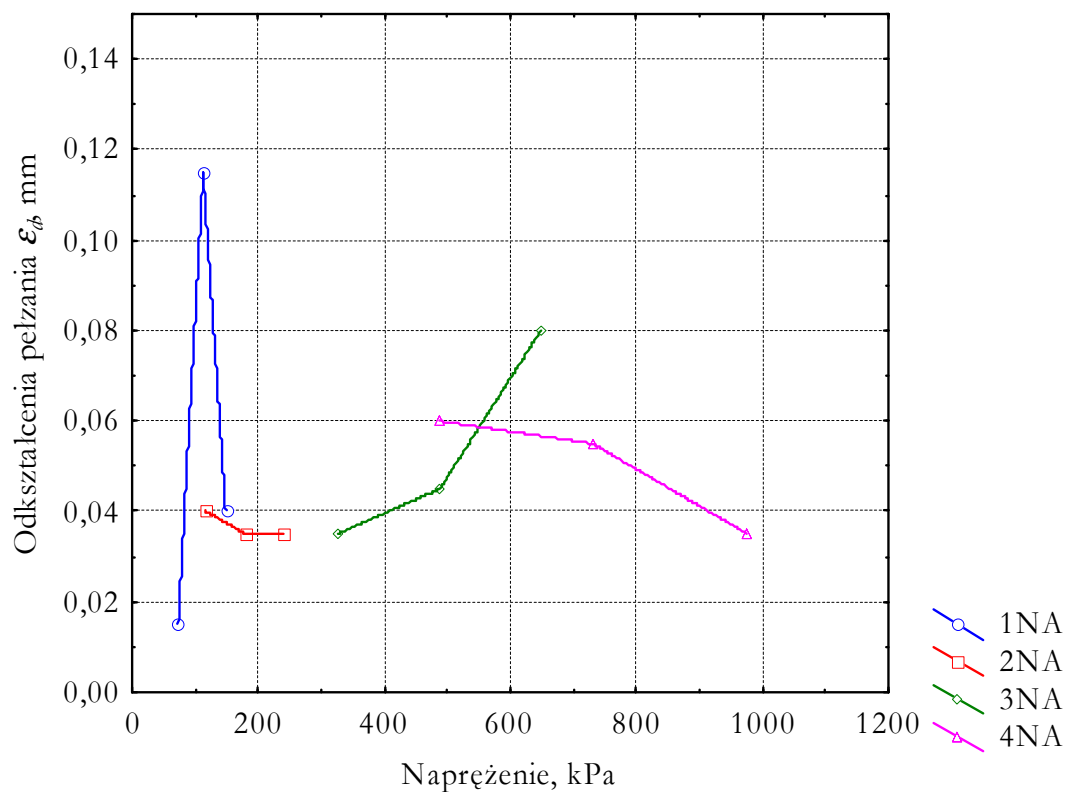


Rys. 5.58. Odkształcenie w czasie próbki 4PZA po 90 dniach twardnienia przy obciążeniach odpowiednio 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

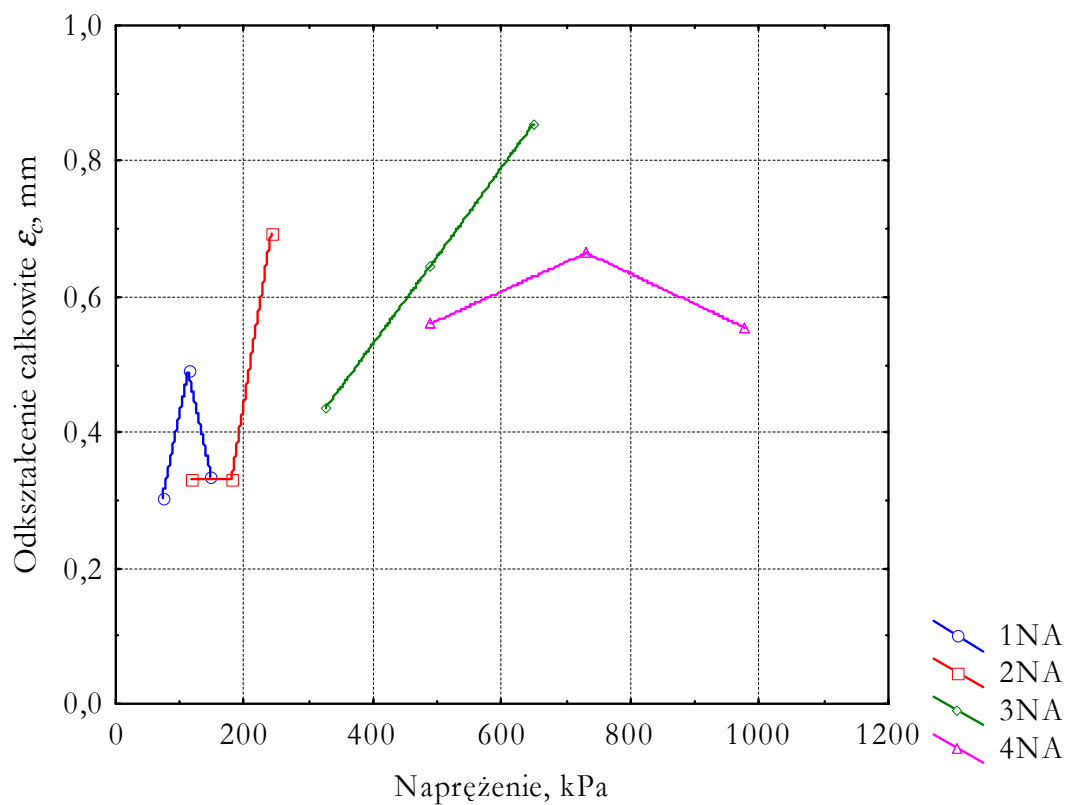
Tabela 5.29. Odształcenia początkowe ε_0 , całkowite ε i pelzania ε_d próbek 1–4NA po 28 dniach twardnienia, poddanych obciążeniu 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Receptura	Wiek, dni	Obciążenie		Napężenie, kPa	ε_0 , mm	ε_d , mm	ε_c , mm
		% f_c	kN				
1	2	3	4	5	6	7	8
1NA/1	28	20	0,37	73,0	0,290	0,015	0,305
1NA/2	28	30	0,55	112,5	0,375	0,115	0,490
1NA/3	28	40	0,73	148,4	0,295	0,040	0,335
2NA/1	28	20	0,61	117,2	0,290	0,040	0,330
2NA/2	28	30	0,91	179,7	0,295	0,035	0,330
2NA/3	28	40	1,21	241,4	0,660	0,035	0,695
3NA/1	28	20	1,62	325,0	0,400	0,035	0,435
3NA/2	28	30	2,43	488,3	0,600	0,045	0,645
3NA/3	28	40	3,24	648,4	0,775	0,080	0,855
4NA/1	28	20	2,46	488,3	0,500	0,060	0,560
4NA/2	28	30	3,69	730,5	0,610	0,055	0,665
4NA/3	28	40	4,92	976,6	0,520	0,035	0,555

Rys. 5.59. Wykres odkształceń początkowych ε_0 w funkcji napężenia próbek 1–4NA po 28 dniach twardnienia



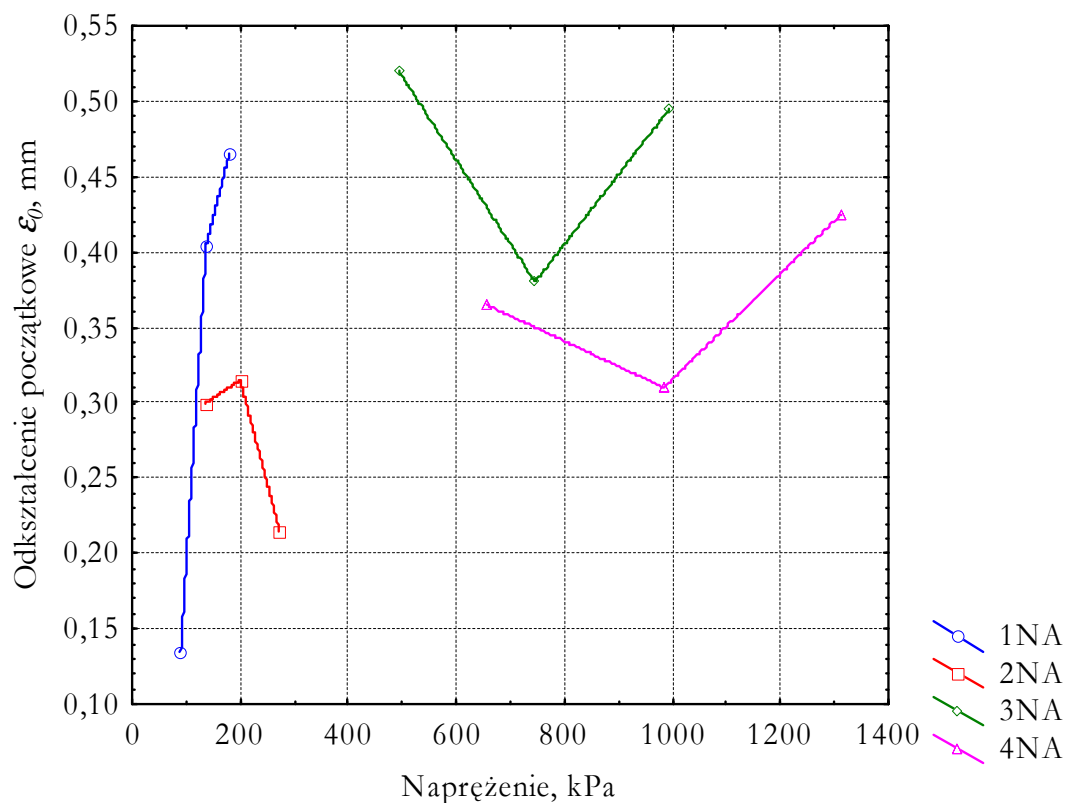
Rys. 5.60. Wykres odkształceń pelzania ε_d w funkcji naprężenia próbek 1–4NA po 28 dniach twardnienia

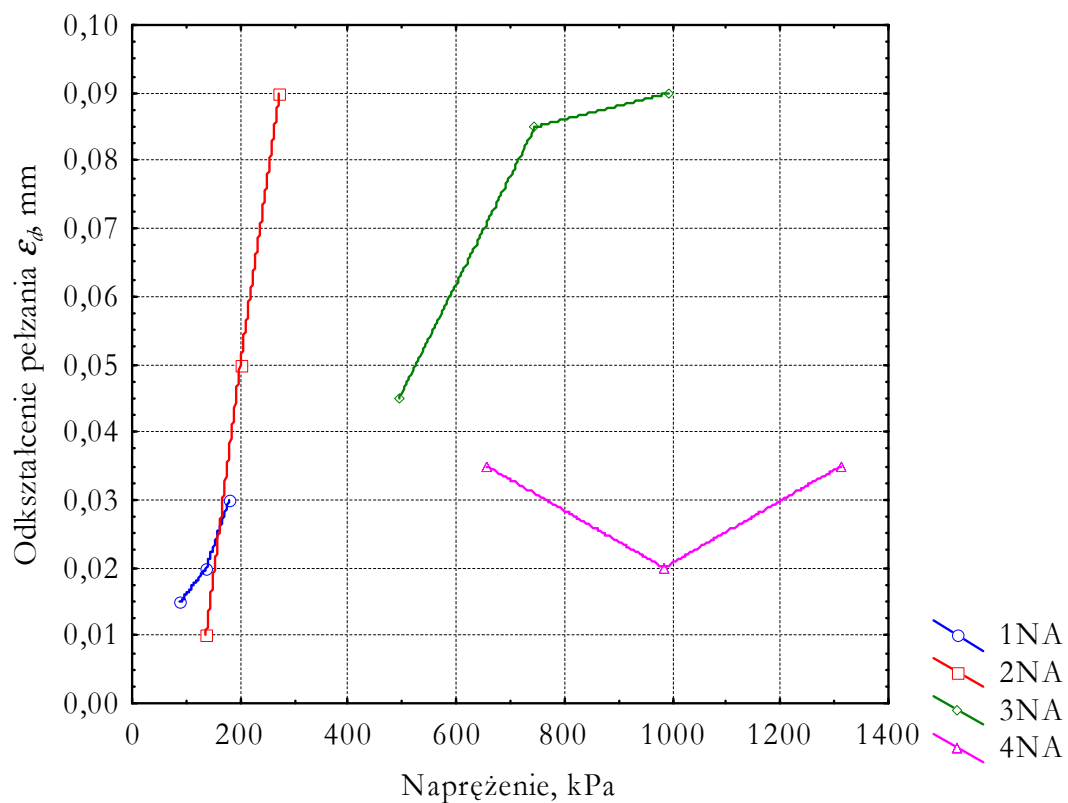


Rys. 5.61. Wykres odkształceń całkowitych ε_c w funkcji naprężenia próbek 1–4NA po 28 dniach twardnienia

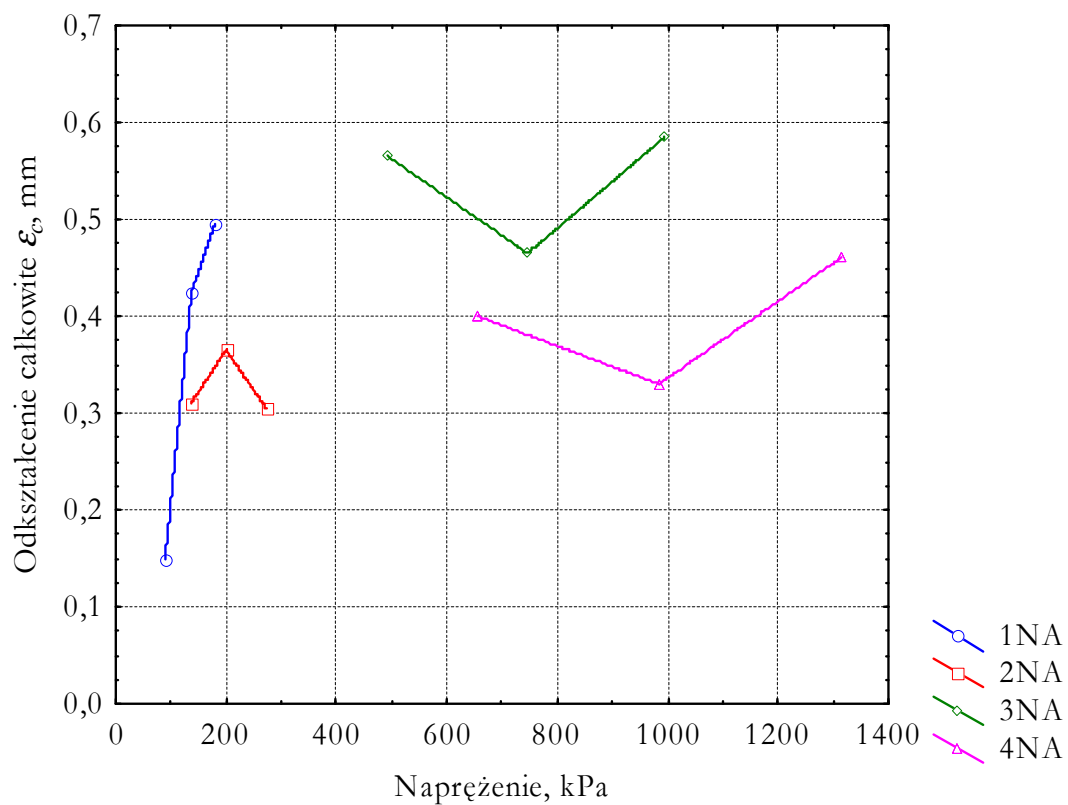
Tabela 5.30. Odształcenia początkowe ϵ_0 , całkowite ϵ i pelzania ϵ_d próbek 1–4NA po 90 dniach twardnienia, poddanych obciążeniu 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Receptura	Wiek, dni	Obciążenie		Napężenie, kPa	ϵ_0 , mm	ϵ_d , mm	ϵ_c , mm
		% f_c	kN				
1	2	3	4	5	6	7	8
1NA/1	90	20	0,45	89,8	0,135	0,015	0,150
1NA/2	90	30	0,68	137,5	0,405	0,020	0,425
1NA/3	90	40	0,91	179,6	0,465	0,030	0,495
2NA/1	90	20	0,63	136,3	0,300	0,010	0,310
2NA/2	90	30	0,95	200,0	0,315	0,050	0,365
2NA/3	90	40	1,27	273,1	0,215	0,090	0,305
3NA/1	90	20	2,48	493,6	0,520	0,045	0,565
3NA/2	90	30	3,72	745,8	0,380	0,085	0,465
3NA/3	90	40	4,96	994,4	0,495	0,090	0,585
4NA/1	90	20	3,23	656,0	0,365	0,035	0,400
4NA/2	90	30	4,99	984,4	0,310	0,020	0,330
4NA/3	90	40	6,65	1312,8	0,425	0,035	0,460

Rys. 5.62. Wykres odkształceń początkowych ϵ_0 w funkcji napężenia próbek 1–4NA po 90 dniach twardnienia



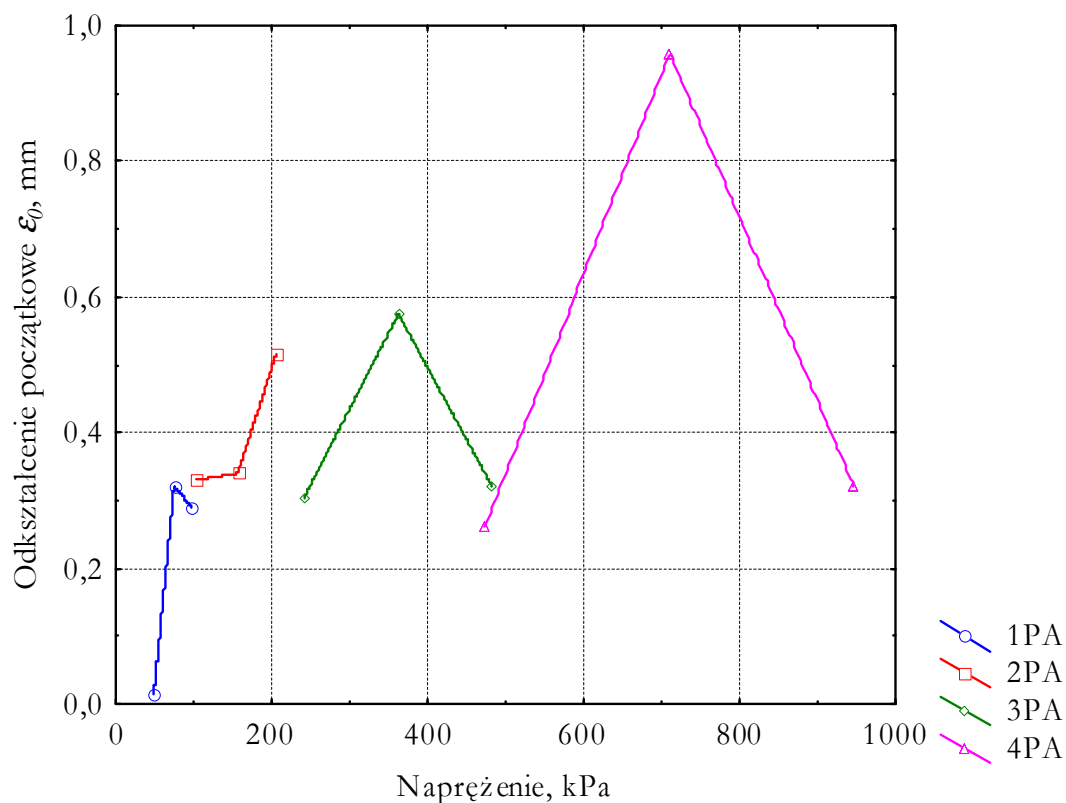
Rys. 5.63. Wykres odkształceń pelzania ε_d w funkcji naprężenia próbek 1–4NA po 90 dniach twardnienia

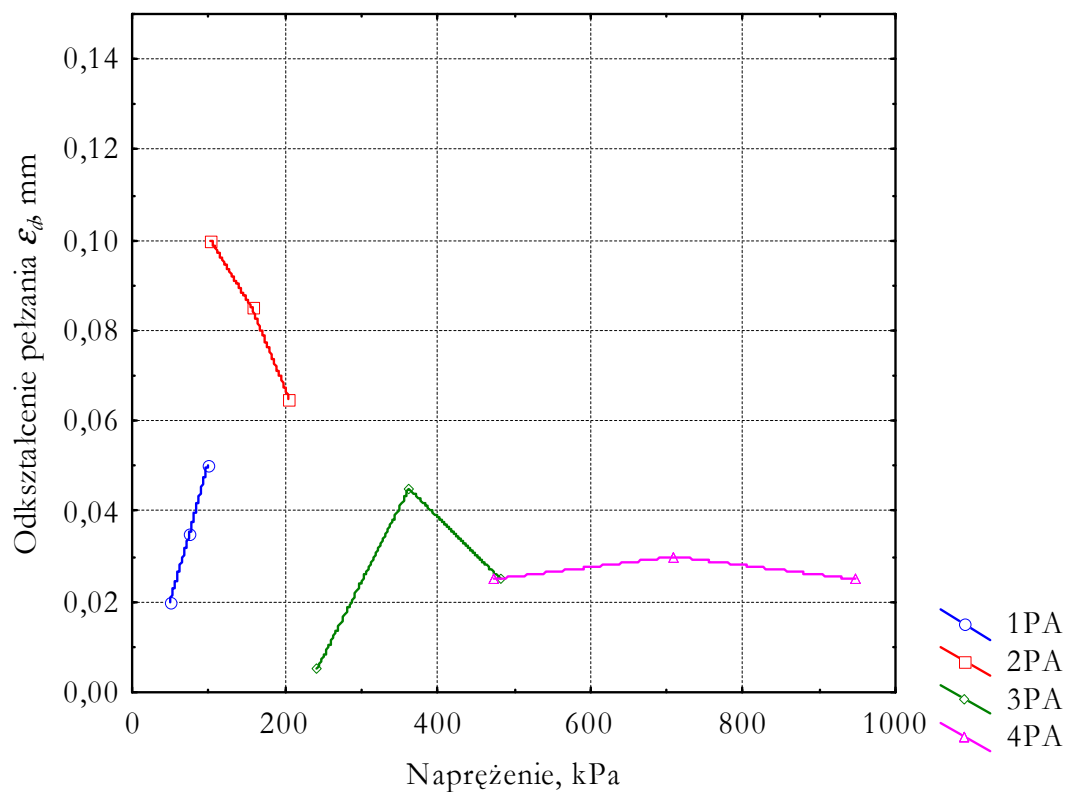


Rys. 5.64. Wykres odkształceń całkowitych ε_c w funkcji naprężenia próbek 1–4NA po 90 dniach twardnienia

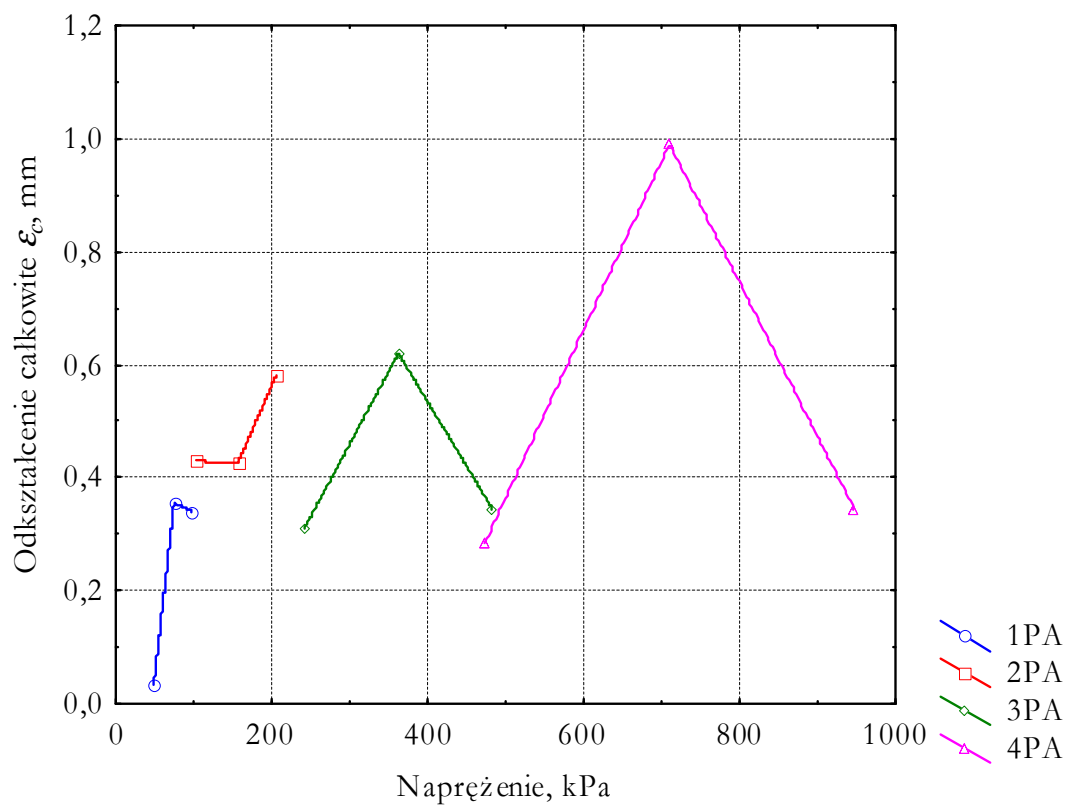
Tabela 5.31. Odształcenia początkowe ϵ_0 , całkowite ϵ i pelzania ϵ_d próbek 1–4PA po 28 dniach twardnienia, poddanych obciążeniu 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Receptura	Wiek, dni	Obciążenie		Napężenie, kPa	ϵ_0 , mm	ϵ_d , mm	ϵ_c , mm
		% f_c	kN				
1	2	3	4	5	6	7	8
1PA/1	28	20	0,25	49,0	0,015	0,020	0,035
1PA/2	28	30	0,37	75,0	0,320	0,035	0,355
1PA/3	28	40	0,49	98,0	0,290	0,050	0,340
2PA/1	28	20	0,50	102,8	0,330	0,100	0,430
2PA/2	28	30	0,75	156,5	0,340	0,085	0,425
2PA/3	28	40	1,00	205,6	0,515	0,065	0,580
3PA/1	28	20	1,21	241,6	0,305	0,005	0,310
3PA/2	28	30	1,82	362,4	0,575	0,045	0,620
3PA/3	28	40	2,43	483,2	0,320	0,025	0,345
4PA/1	28	20	2,36	473,4	0,260	0,025	0,285
4PA/2	28	30	3,54	710,1	0,960	0,030	0,990
4PA/3	28	40	4,72	946,8	0,320	0,025	0,345

Rys. 5.65. Wykres odkształceń początkowych ϵ_0 w funkcji napężenia próbek 1–4PA po 28 dniach twardnienia



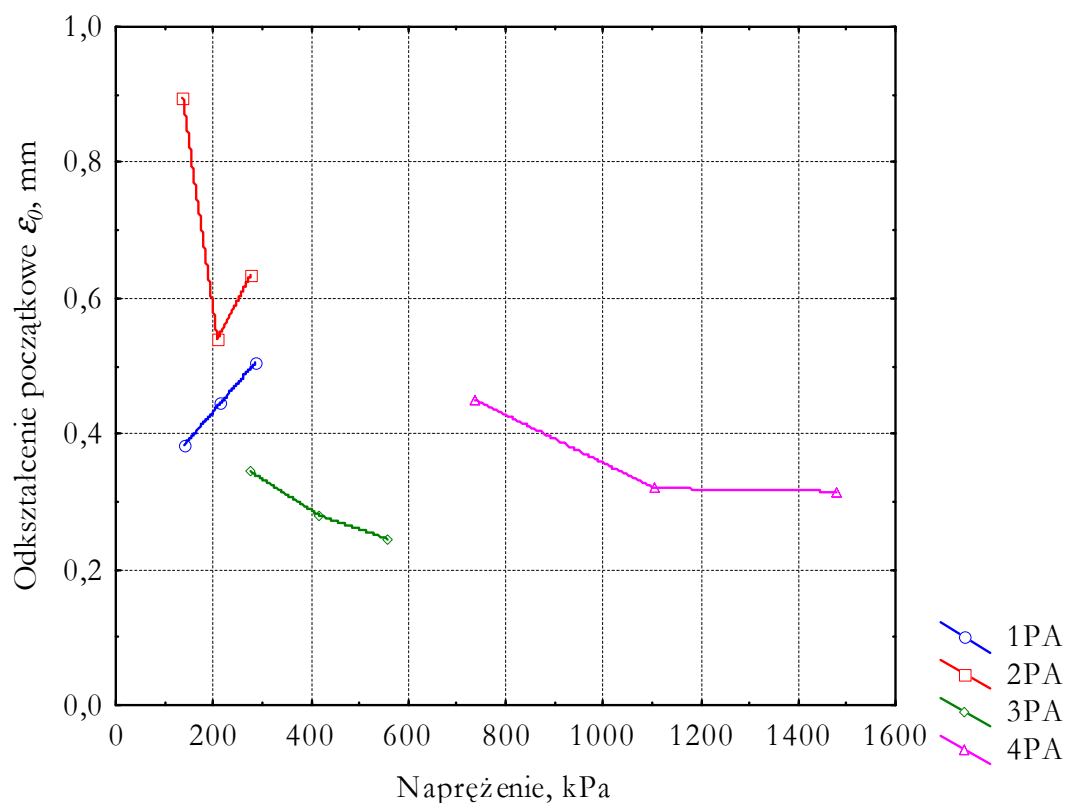
Rys. 5.66. Wykres odkształceń pelzania ε_d w funkcji naprężenia próbek 1–4PA po 28 dniach twardnienia

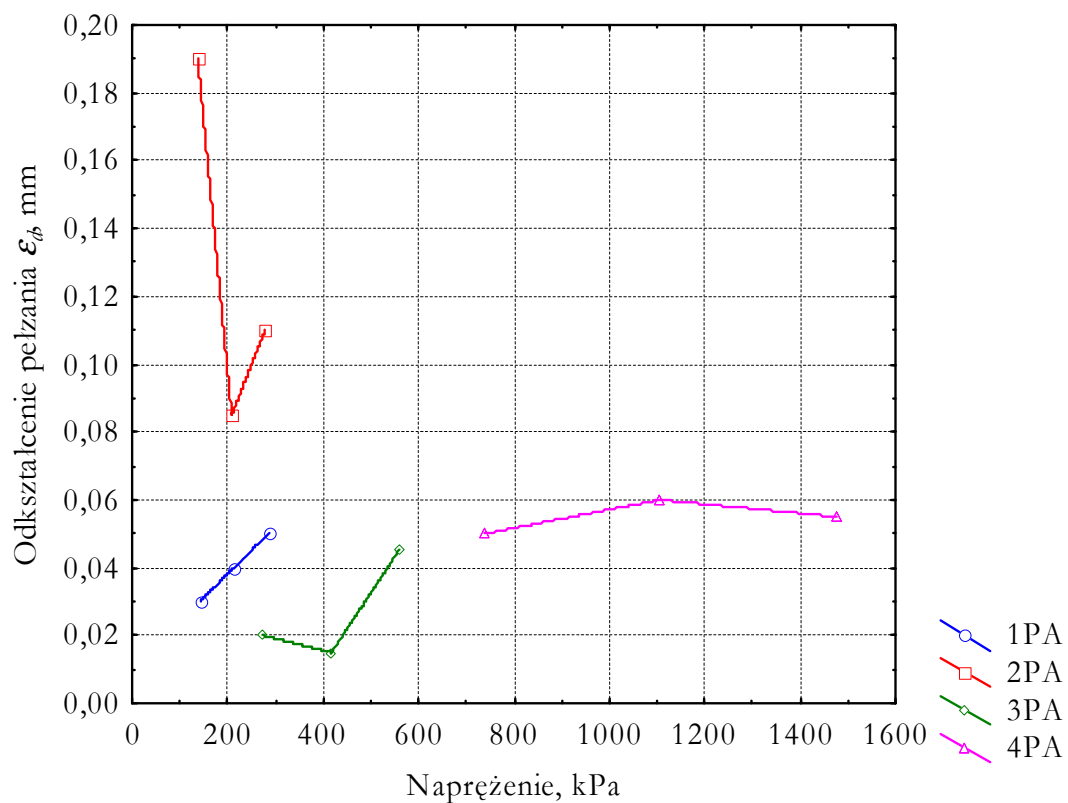


Rys. 5.67. Wykres odkształceń całkowitych ε_c w funkcji naprężenia próbek 1–4PA po 28 dniach twardnienia

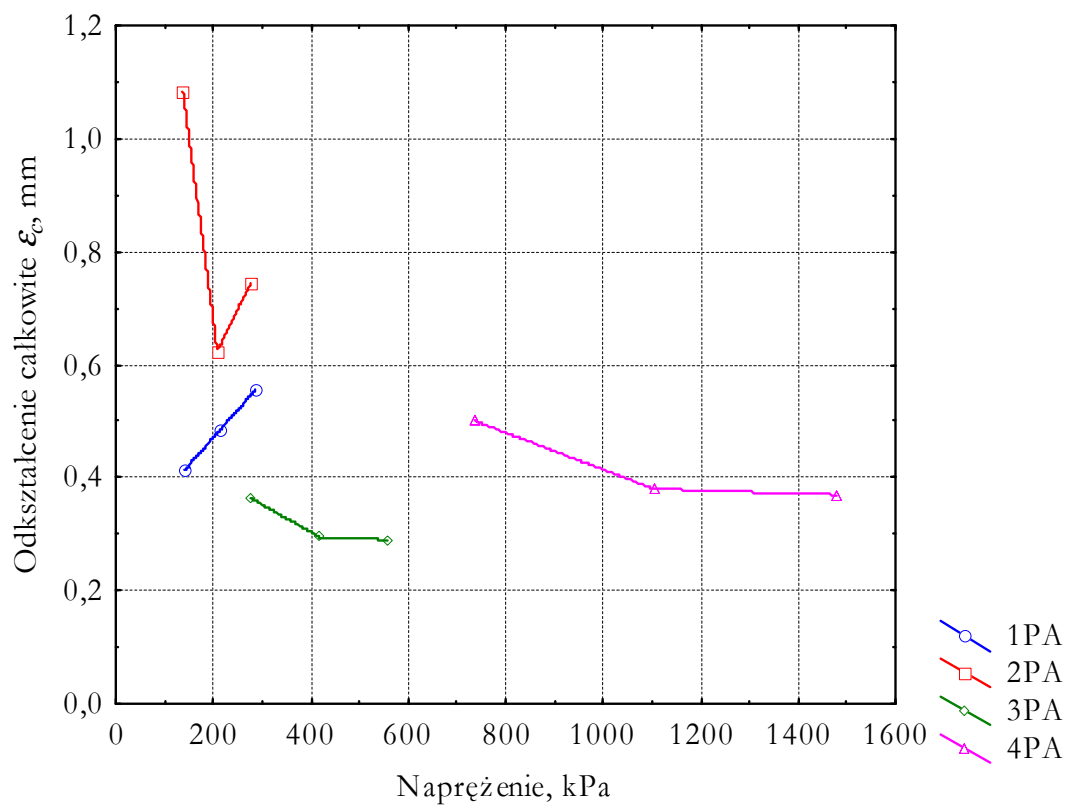
Tabela 5.31. Odształcenia początkowe ϵ_0 , całkowite ϵ i pelzania ϵ_d próbek 1–4PA po 90 dniach twardnienia, poddanych obciążeniu 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Receptura	Wiek, dni	Obciążenie		Napężenie, kPa	ϵ_0 , mm	ϵ_d , mm	ϵ_c , mm
		% f_c	kN				
1	2	3	4	5	6	7	8
1PA/1	90	20	143,0	143,0	0,385	0,030	0,415
1PA/2	90	30	214,5	214,5	0,445	0,040	0,485
1PA/3	90	40	286,0	286,0	0,505	0,050	0,555
2PA/1	90	20	139,0	137,5	0,895	0,190	1,085
2PA/2	90	30	208,5	208,5	0,540	0,085	0,625
2PA/3	90	40	278,0	278,0	0,635	0,110	0,745
3PA/1	90	20	241,6	275,0	0,345	0,020	0,365
3PA/2	90	30	362,4	417,9	0,280	0,015	0,295
3PA/3	90	40	483,2	558,6	0,245	0,045	0,290
4PA/1	90	20	473,4	738,3	0,450	0,050	0,500
4PA/2	90	30	710,1	1105,5	0,320	0,060	0,380
4PA/3	90	40	946,8	1476,6	0,315	0,055	0,370

Rys. 5.68. Wykres odkształceń początkowych ϵ_0 w funkcji napężenia próbek 1–4PA po 90 dniach twardnienia



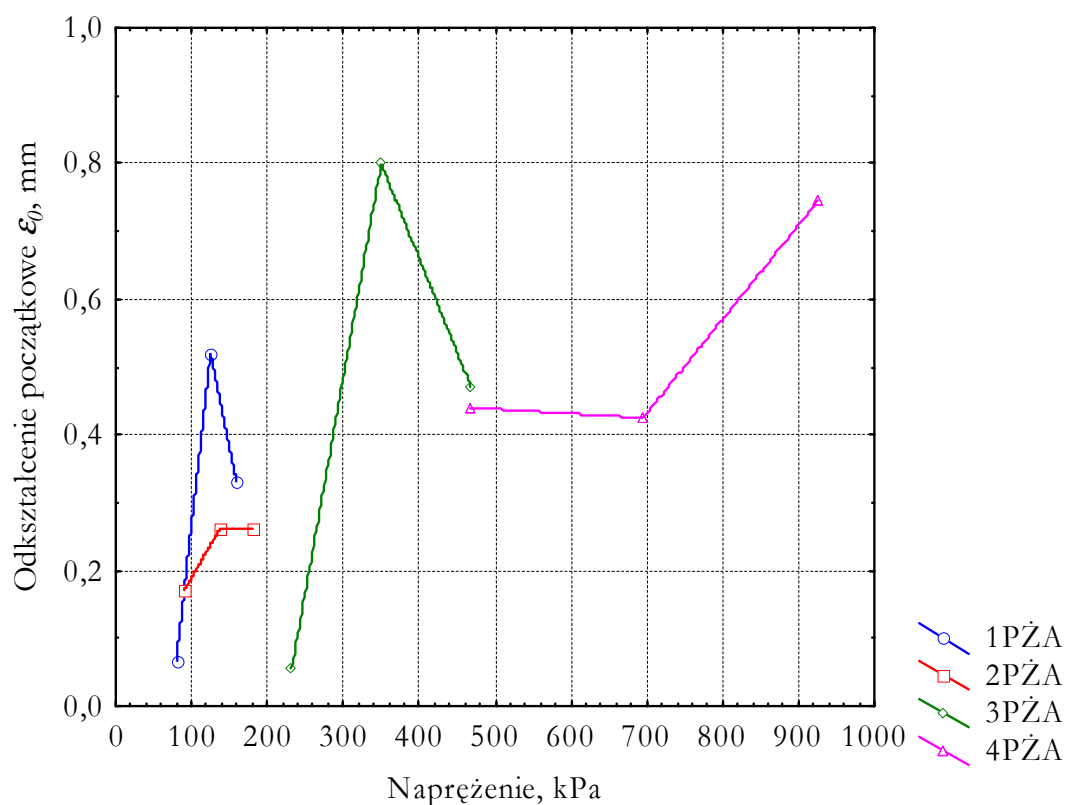
Rys. 5.69. Wykres odkształceń pelzania ϵ_d w funkcji naprężenia próbek 1–4PA po 90 dniach twardnienia

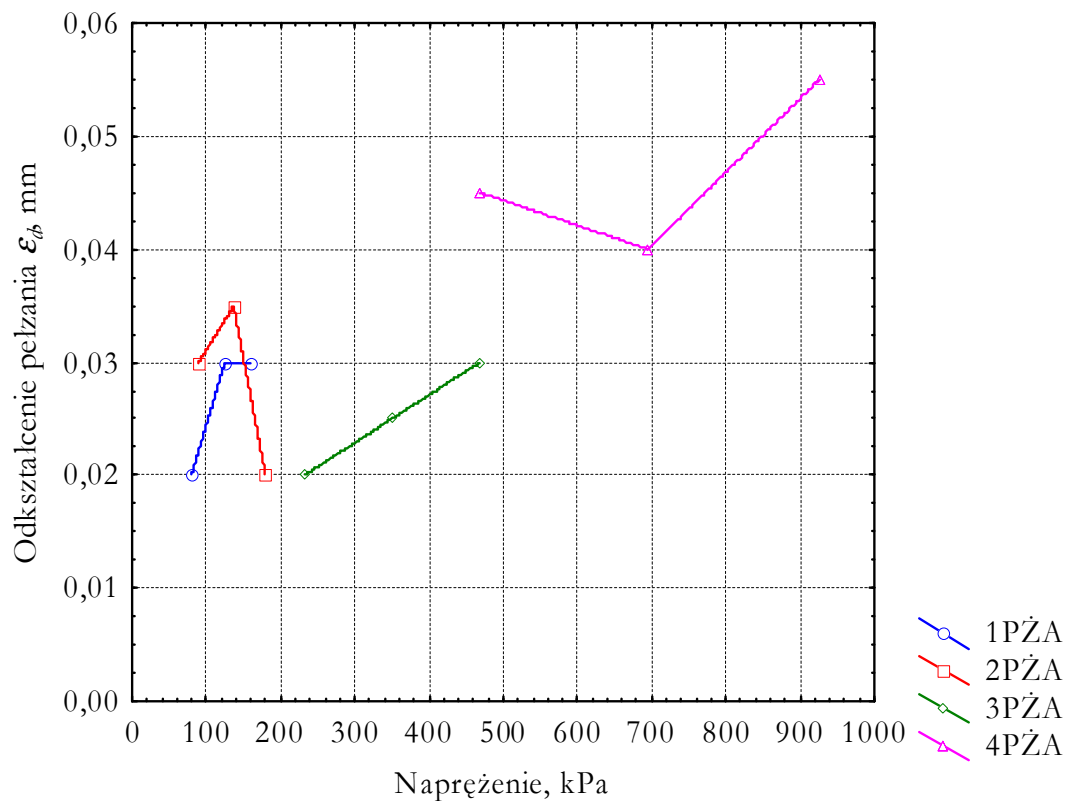


Rys. 5.70. Wykres odkształceń całkowitych ϵ_c w funkcji naprężenia próbek 1–4PA po 90 dniach twardnienia

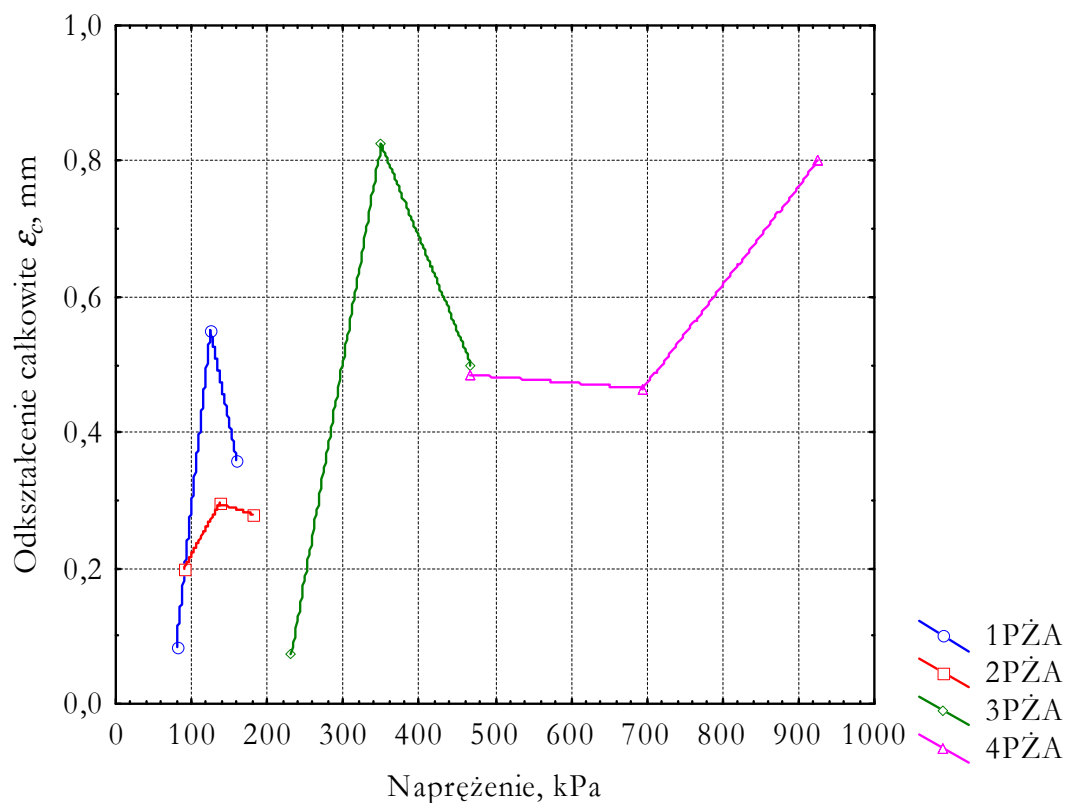
Tabela 5.32. Odształcenia początkowe ε_0 , całkowite ε_c i pełzania ε_d próbek 1–4PŻA po 28 dniach twardnienia, poddanych obciążeniu 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Receptura	Wiek, dni	Obciążenie		Napężenie, kPa	ε_0 , mm	ε_d , mm	ε_c , mm
		% f_c	kN				
1	2	3	4	5	6	7	8
1PŻA/1	28	20	0,40	79,8	0,065	0,020	0,085
1PŻA/2	28	30	0,60	125,0	0,520	0,030	0,550
1PŻA/3	28	40	0,80	159,4	0,330	0,030	0,360
2PŻA/1	28	20	0,44	89,8	0,170	0,030	0,200
2PŻA/2	28	30	0,66	136,7	0,260	0,035	0,295
2PŻA/3	28	40	0,88	179,7	0,260	0,020	0,280
3PŻA/1	28	20	1,17	232,2	0,055	0,020	0,075
3PŻA/2	28	30	1,75	350,0	0,800	0,025	0,825
3PŻA/3	28	40	2,33	468,8	0,470	0,030	0,500
4PŻA/1	28	20	2,33	468,8	0,440	0,045	0,485
4PŻA/2	28	30	3,49	695,3	0,425	0,040	0,465
4PŻA/3	28	40	4,65	925,8	0,745	0,055	0,800

Rys. 5.71. Wykres odkształceń początkowych ε_0 w funkcji napężenia próbek 1–4PŻA po 28 dniach twardnienia



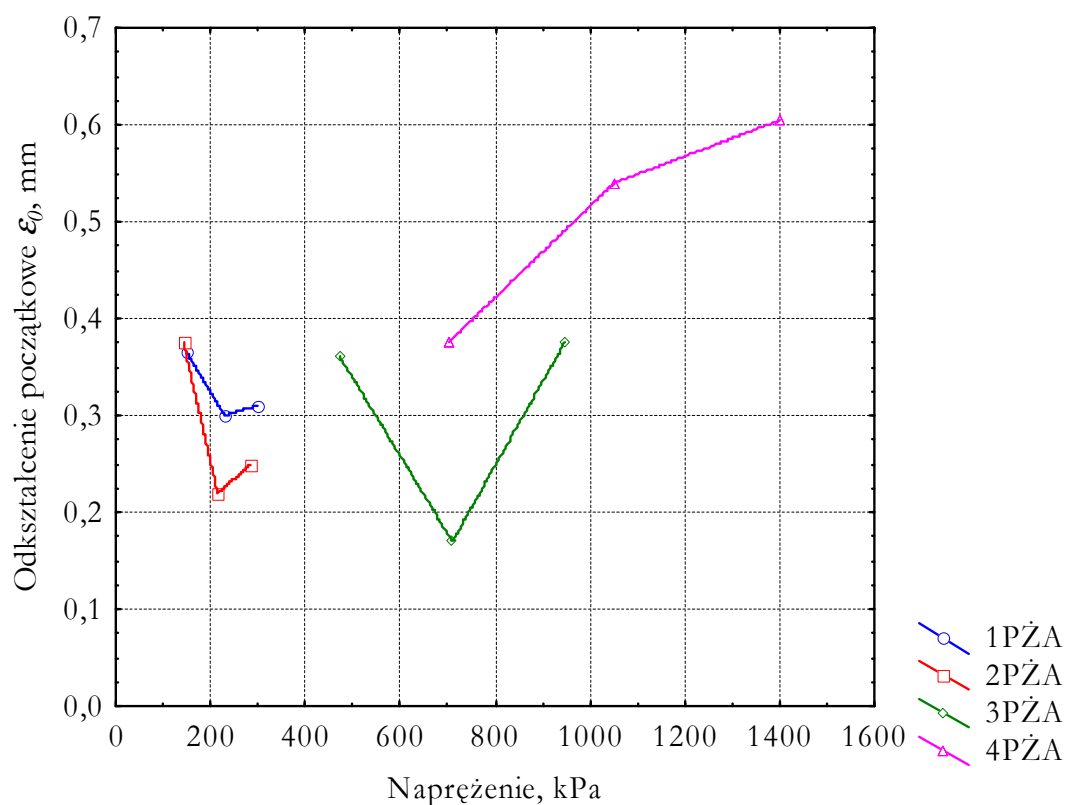
Rys. 5.72. Wykres odkształceń pelzania ε_d w funkcji naprężenia próbek 1–4PZA po 28 dniach twardnienia

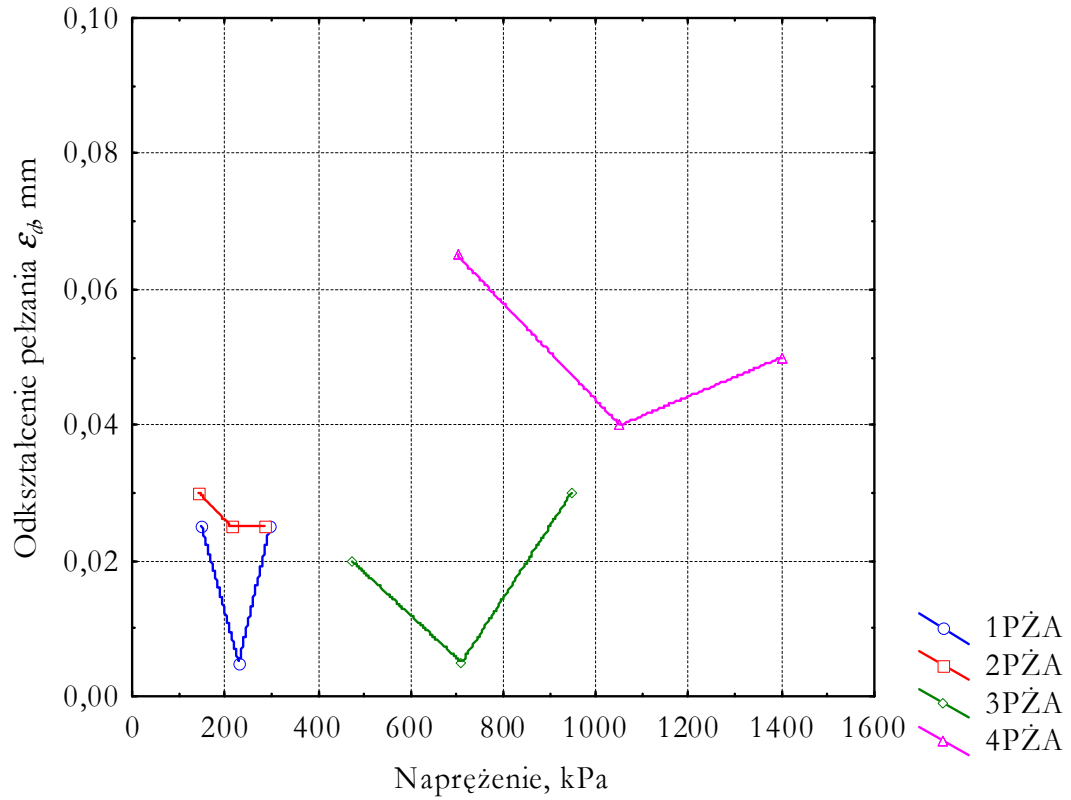


Rys. 5.73. Wykres odkształceń całkowitych ε_c w funkcji naprężenia próbek 1–4PZA po 28 dniach twardnienia

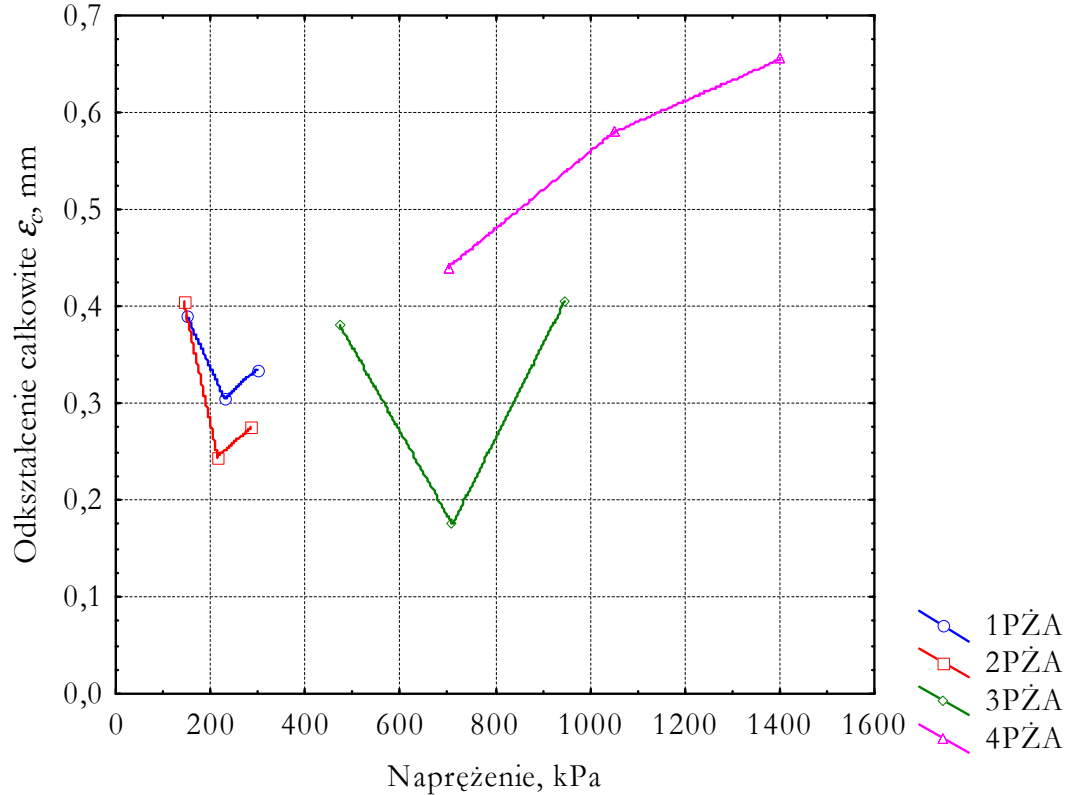
Tabela 5.33. Odkształcenia początkowe ε_0 , całkowite ε_c i pełzania ε_d próbek 1–4PŻA po 90 dniach twardnienia, poddanych obciążeniu 20, 30 i 40% rzeczywistej wytrzymałości na ściskanie

Receptura	Wiek, dni	Obciążenie		Napężenie, kPa	ε_0 , mm	ε_d , mm	ε_c , mm
		% f_c	kN				
1	2	3	4	5	6	7	8
1PŻA/1	90	20	0,76	150,0	0,365	0,025	0,390
1PŻA/2	90	30	1,14	229,6	0,300	0,005	0,305
1PŻA/3	90	40	1,52	297,2	0,310	0,025	0,335
2PŻA/1	90	20	0,72	143,2	0,375	0,030	0,405
2PŻA/2	90	30	1,08	214,8	0,220	0,025	0,245
2PŻA/3	90	40	1,44	286,4	0,250	0,025	0,275
3PŻA/1	90	20	2,34	473,4	0,360	0,020	0,380
3PŻA/2	90	30	3,51	710,1	0,170	0,005	0,175
3PŻA/3	90	40	4,68	946,8	0,375	0,030	0,405
4PŻA/1	90	20	3,49	701,0	0,375	0,065	0,440
4PŻA/2	90	30	5,24	1051,5	0,540	0,040	0,580
4PŻA/3	90	40	6,99	1402,0	0,605	0,050	0,655

Rys. 5.74. Wykres odkształceń początkowych ε_0 w funkcji napężenia próbek 1–4PŻA po 90 dniach twardnienia



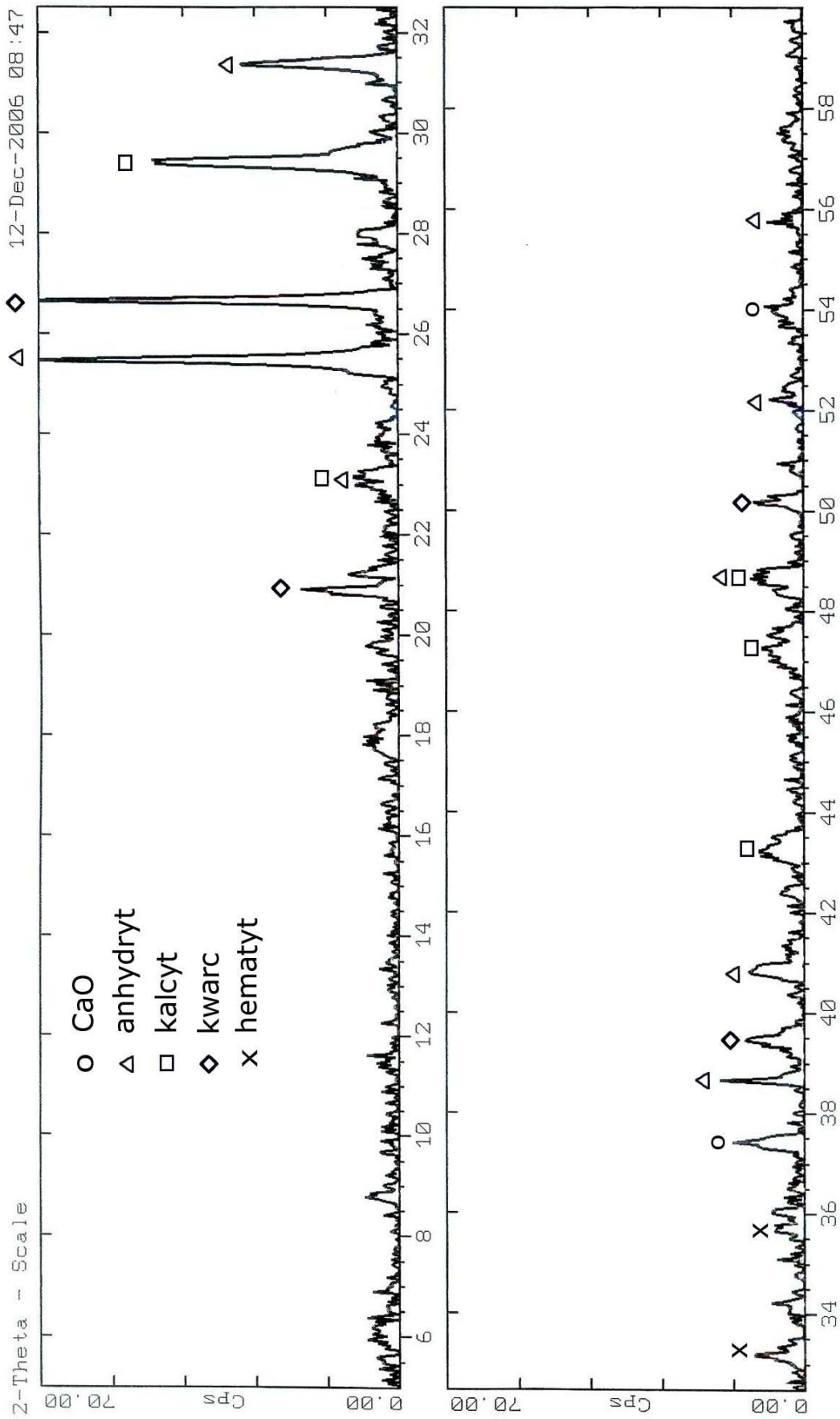
Rys. 5.75. Wykres odkształceń pelzania ε_d w funkcji naprężenia próbek 1–4PZA po 90 dniach twardnienia



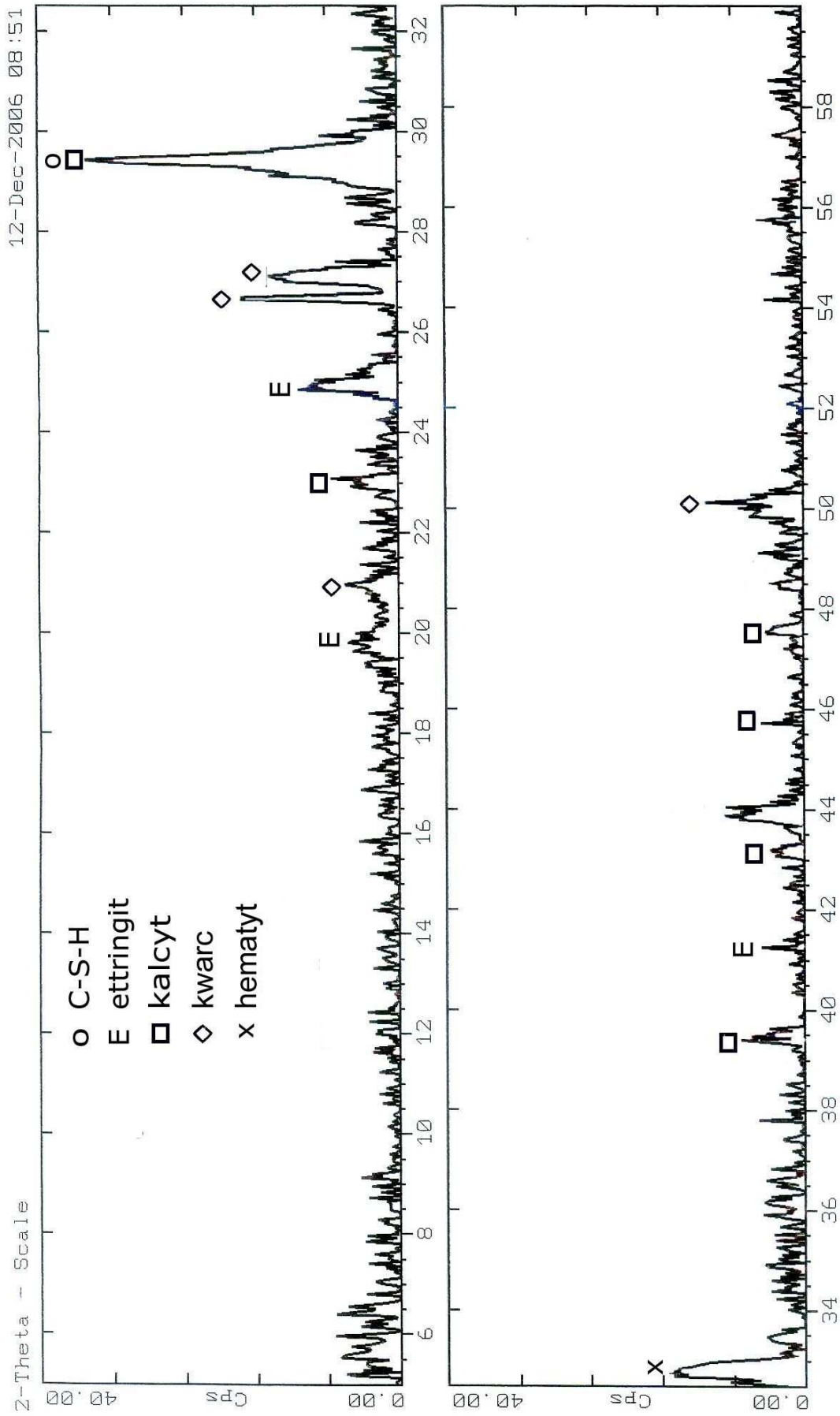
Rys. 5.76. Wykres odkształceń całkowitych ε_c w funkcji naprężenia próbek 1–4PZA po 90 dniach twardnienia

Załącznik 3

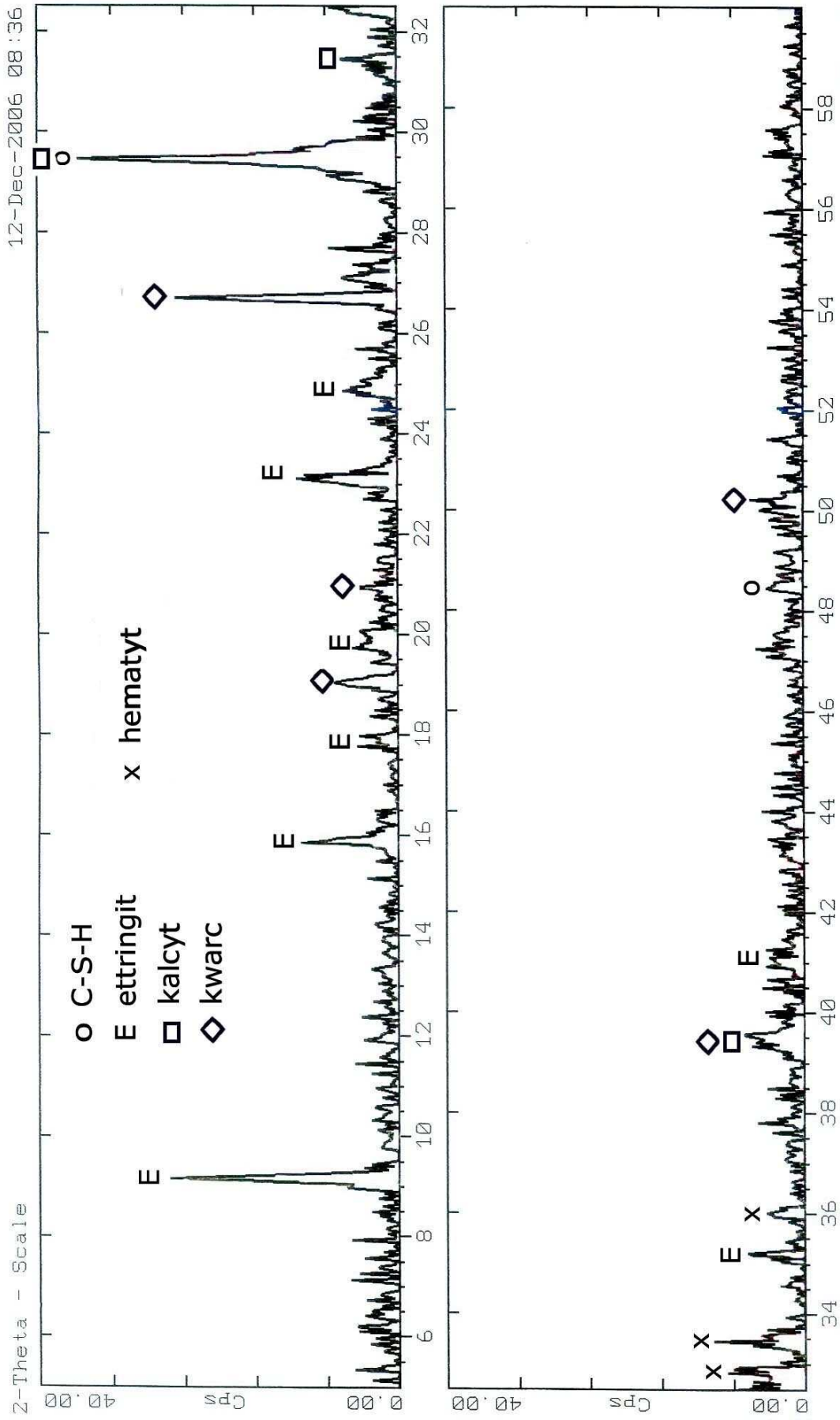
**Wyniki badań składu fazowego
i mikrostruktury zawiesiny stwardniałej**



Rys. 5.77. Dyfraktoqram fluidalnego popiołu lotnego z węgla brunatnego



Rys. 5.78. Dyfraktoqram próbki 2NA po 28 dniach twardnienia



Rys. 5.79. Dyfraktoqram próbki 4NA po 28 dniach twardnienia

Tabela 5.34. Parametry badania metodą analizy termicznej (DTA, TG) próbki 2NA po 28 dniach twardnienia

PARAMETERS OF TEST

LABORATORY	ISiC	SAMPLE	168.60 mg
OPERATOR	Z.Kaszuba	REFERENCE	0.00 mg
DATE	24 Nov 2006	CRUCIBLE(sample)	1466.90 mg
IDENTITY No.	011	CRUCIBLE(refer.)	1470.25 mg
SAMPLE	bentonit 2NA	CRUCIBLE+SAMPLE	1635.50 mg
REFERENCE	air	CRUCIBLE+REFERENCE	1470.25 mg
ATMOSPHERE	air	FLOW RATE	0.00 ccm/min
CRUCIBLE	Al2O3	REMARK	08/IV/163/06
		Name: --->	M11
TC: CONTROL	S: Pt_10	TC: SAMPLE	S: Pt_10
SAMPLE CARRIER	DTA/TG 1	RANGE: TG	1000.00 mg
		RANGE: DTA	400.00 uV

TEMPERATURE PROGRAM:

START TEMPERATURE / °C	20						
SEGMENT NUMBER --->	1	2	3	4	5	6	
HEATING RATE / K/min	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
END TEMPERATURE / °C	990	0	0	0	0	0	0
CONSTANT TIME / hh.mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TRACK: 1-2-3	000	000	000	000	000	000	000
SAMPLING TIME / sec	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ACQ. RATE / points/K	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TIME / hh.mm	1.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EMERG.RESET TEMP. / °C	995						
TOTAL TIME / hh.mm	1.37						

Tabela 5.35. Parametry badania metodą analizy termicznej (DTA, TG) próbki 2NA po 28 dniach twardnienia

EVALUATION :

Sample	Ident. no.	Date	File
bentonit 2NA	011	24 Nov 2006	M11

Buoyancy correction:

#	S.Carrier	Crucible	Wgth.	Range	Rate	Atmosp.	Flow	Remark
1	DTA/TG 1	Al2O3	0.0	0...1400	10.0	air	0	pusta

Baseline subtraction:

#	S.Carrier	Crucible	Wgth.	Range	Rate	Atmosp.	Flow	Remark
1	DTA/TG 1	Al2O3	0.0	0...1350	10.0	air	0	pustall.06

RESULTS :

Segment 1: 20 °C /10.00 / 990 °C
24 Nov 2006 /bentonit 2NA /011

/Z.Kaszuba

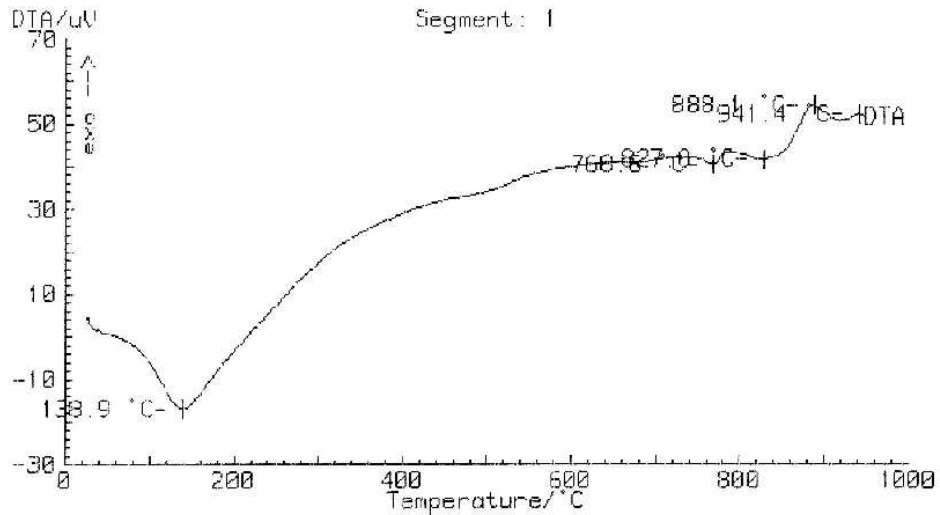
/08/IV/163/06

TG-steps:

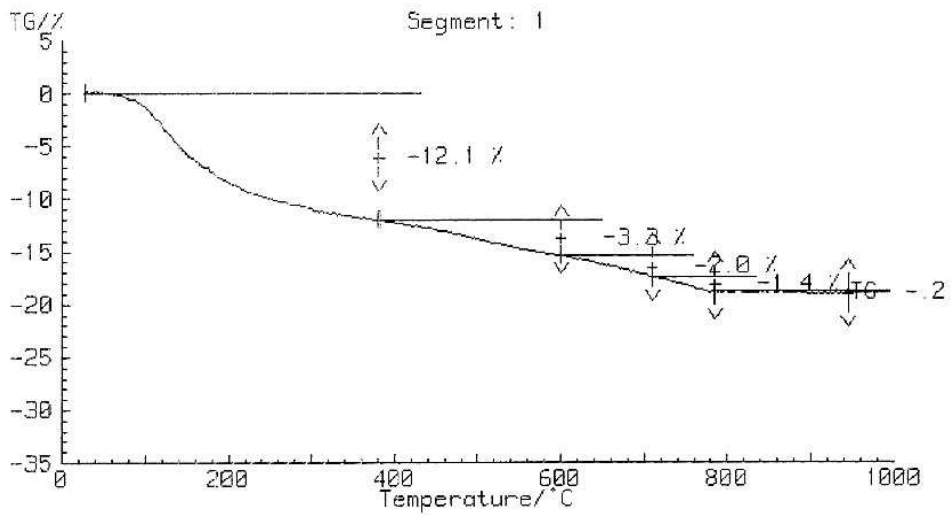
STEP	Tmin/ °C	Tmax/ °C	delta TG/ mg	delta TG/ %	RATIO
1	26.0	380.9	-2.033E+01	-012.06	-65.3
2	381.6	599.9	-5.611E+00	-003.33	-18.0
3	599.9	709.8	-3.428E+00	-002.03	-11.0
4	709.8	784.9	-2.330E+00	-001.38	-7.5
5	784.9	945.4	-3.115E-01	-000.18	-1.0
Total	26.0	945.4	3.202E+01	018.99	102.8
Residue	0.0	0.0	1.366E+02	081.01	0.0

Characteristic data: DTA

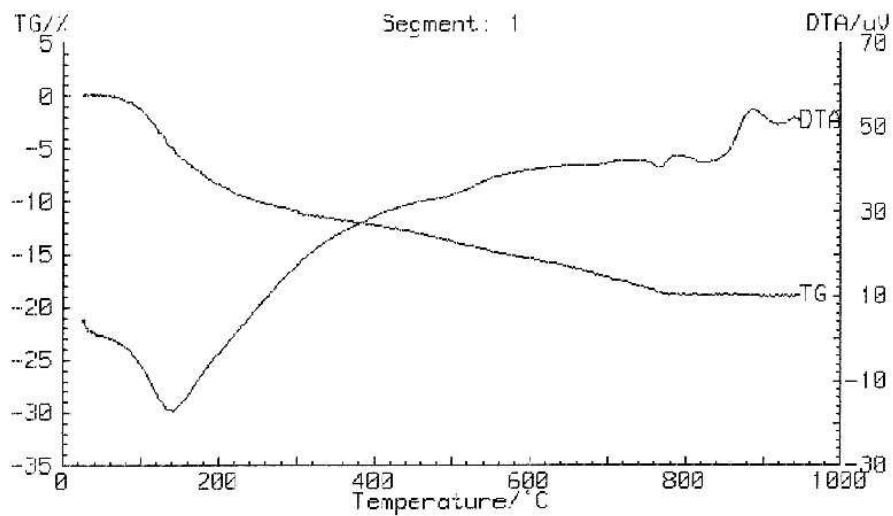
EVALUATION	RESULT/ °C	RANGE/ °C	RESULT/ min	RANGE/ min
T_minimum	138.9	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0
T_minimum	768.6	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0
T_minimum	827.8	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0
T_maximum	888.1	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0
T_maximum	941.4	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0



Rys. 5.80. Krzywa DTA próbki 2NA po 28 dniach twardnienia



Rys. 5.81. Krzywa TG próbki 2NA po 28 dniach twardnienia



Rys. 5.82. Krzywa DTA i TG próbki 2NA po 28 dniach twardnienia

Tabela 5.36. Parametry badania metodą analizy termicznej (DTA, TG) próbki 4NA po 28 dniach twardnienia

PARAMETERS OF TEST

LABORATORY	ISiC	SAMPLE	94.55 mg
OPERATOR	Z.Kaszuba	REFERENCE	0.00 mg
DATE	4 Dec 2006	CRUCIBLE(sample)	1466.85 mg
IDENTITY No.	012	CRUCIBLE(refer.)	1470.20 mg
SAMPLE	bentonit 4NA	CRUCIBLE+SAMPLE	1561.40 mg
REFERENCE	air	CRUCIBLE+REFERENCE	1470.20 mg
ATMOSPHERE	air	FLOW RATE	0.00 ccm/min
CRUCIBLE	Al2O3	REMARK	08/IV/163/06
		Name: --->	M12
TC: CONTROL	S: Pt_10	TC: SAMPLE	S: Pt_10
SAMPLE CARRIER	DTA/TG 1	RANGE: TG	100.00 mg
		RANGE: DTA	400.00 uV

TEMPERATURE PROGRAM:

START TEMPERATURE / °C	20						
SEGMENT NUMBER --->	1	2	3	4	5	6	
HEATING RATE / K/min	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
END TEMPERATURE / °C	990	0	0	0	0	0	0
CONSTANT TIME / hh.mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TRACK: 1-2-3	000	000	000	000	000	000	000
SAMPLING TIME / sec	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ACQ. RATE / points/K	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TIME / hh.mm	1.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EMERG.RESET TEMP. / °C	995						
TOTAL TIME / hh.mm	1.37						

Tabela 5.37. Parametry badania metodą analizy termicznej (DTA, TG) próbki 4NA po 28 dniach twardnienia

EVALUATION :

Sample	Ident. no.	Date	File
bentonit 4NA	012	4 Dec 2006	M12

Buoyancy correction:

#	S.Carrier	Crucible	Wgth.	Range	Rate	Atmosp.	Flow	Remark
1	DTA/TG 1	Al2O3	0.0	0...1400	10.0	air	0	pusta

Baseline subtraction:

#	S.Carrier	Crucible	Wgth.	Range	Rate	Atmosp.	Flow	Remark
1	DTA/TG 1	Al2O3	0.0	0...1350	10.0	air	0	pustall.06

RESULTS :

Segment 1: 20°C /10,00 / 990 °C

4 Dec 2006 /bentonit 4NA /012

/Z.Kaszuba

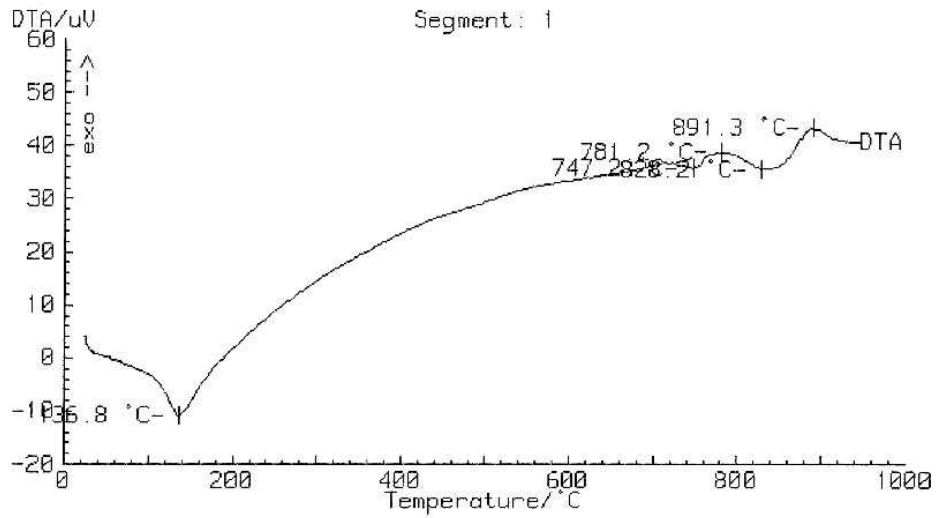
/08/IV/163/06

TG-steps:

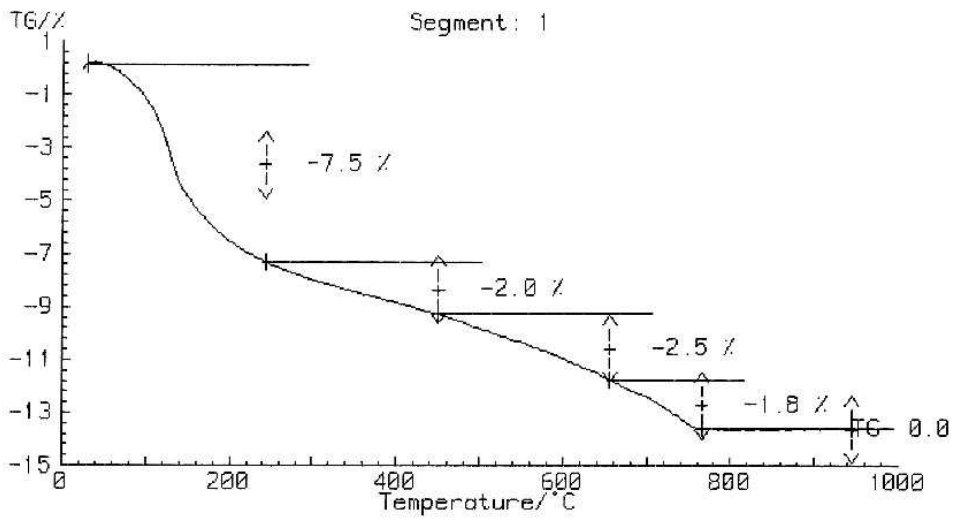
STEP	Tmin/ °C	Tmax/ °C	delta TG/ mg	delta TG/ %	RATIO
1	29.0	242.1	-7.061E+00	-007.47	-1070.5
2	242.8	450.1	-1.849E+00	-001.96	-280.3
3	450.1	655.4	-2.361E+00	-002.50	-357.9
4	655.4	765.8	-1.701E+00	-001.80	-257.9
5	765.8	945.3	6.596E-03	000.01	1.0
Total	29.0	765.8	1.297E+01	013.72	1966.7
Residue	0.0	0.0	8.170E+01	086.41	0.0

Characteristic data: DTA

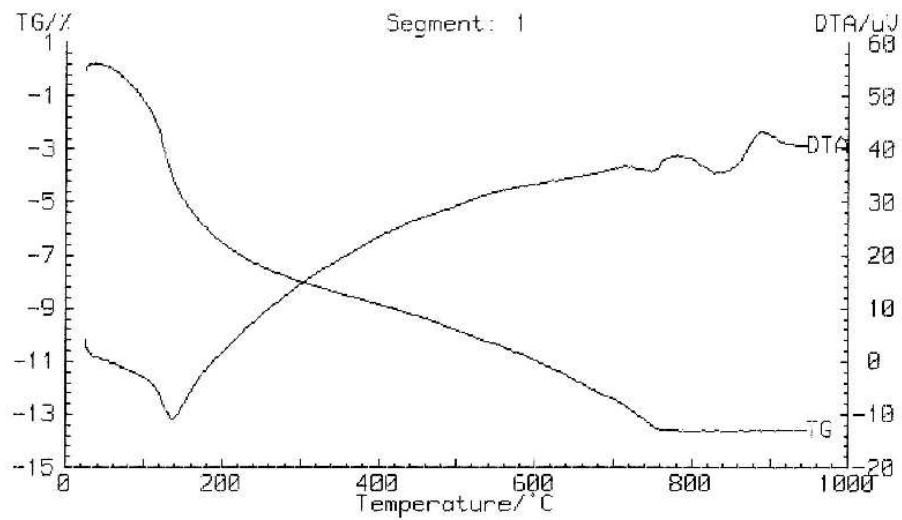
EVALUATION	RESULT/ °C	RANGE/ °C	RESULT/ min	RANGE/ min
T_minimum	136.8	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0
T_minimum	747.2	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0
T_maximum	781.2	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0
T_minimum	828.2	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0
T_maximum	891.3	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0



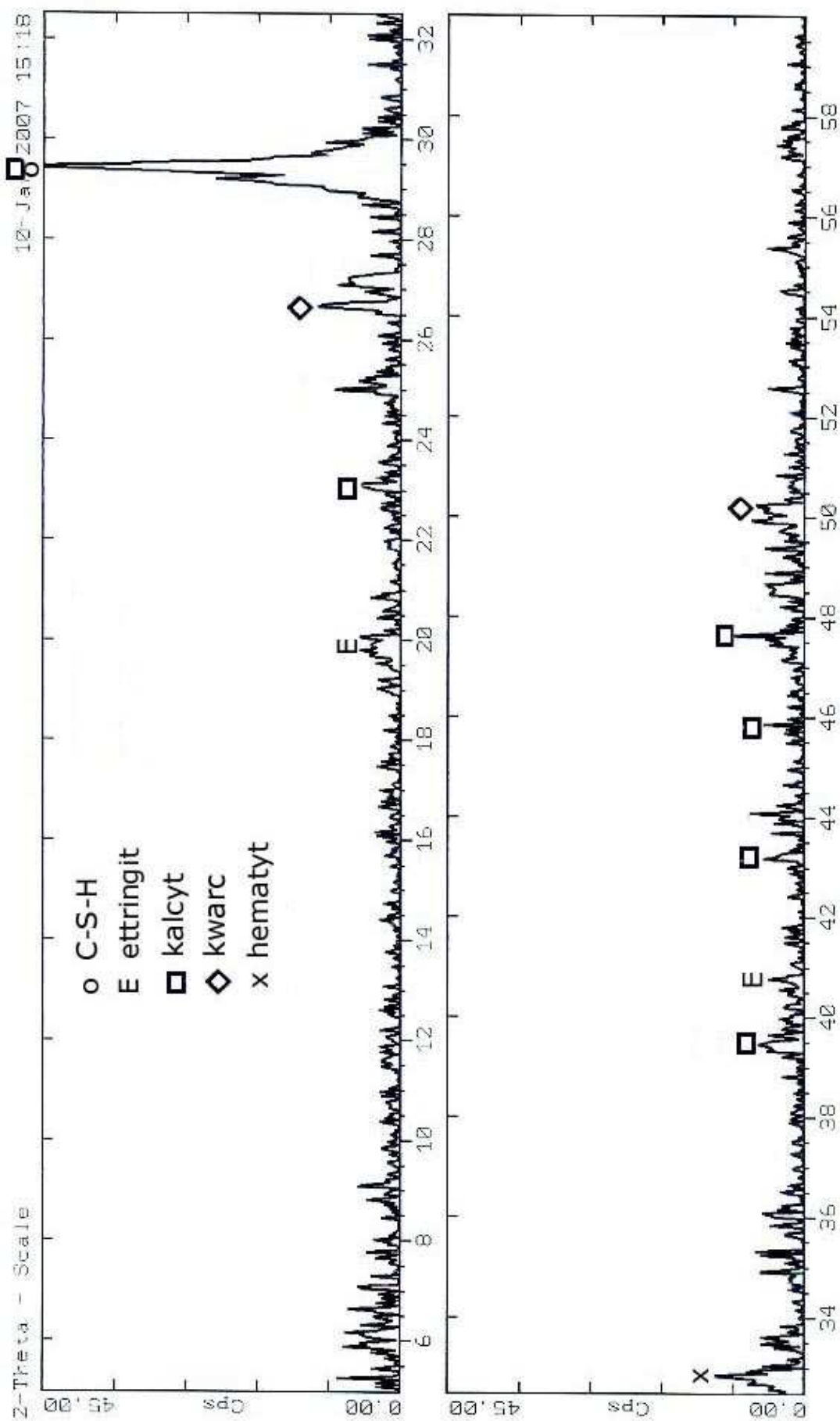
Rys. 5.83. Krzywa DTA próbki 4NA po 28 dniach twardnienia



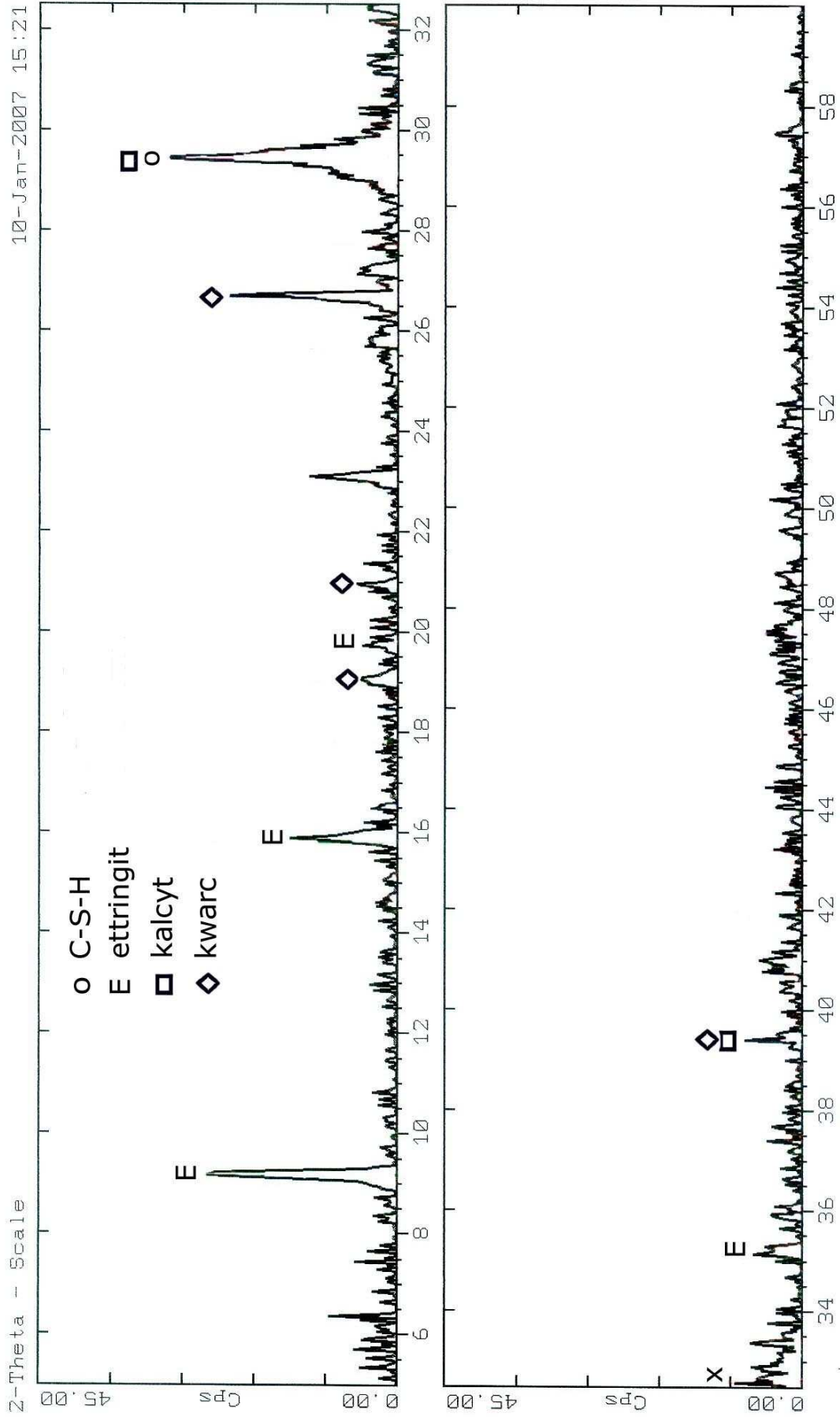
Rys. 5.84. Krzywa TG próbki 4NA po 28 dniach twardnienia



Rys. 5.85. Krzywa DTA i TG próbki 4NA po 28 dniach twardnienia



Rys. 5.86. Dyfraktogram próbki 2NA po 90 dniach twardnienia



Rys. 5.87. Dyfraktogram próbki 4NA po 90 dniach twardnienia

Tabela 5.38. Parametry badania metodą analizy termicznej (DTA, TG) próbki 2NA po 90 dniach twardnienia

PARAMETERS OF TEST

LABORATORY	ISiC	SAMPLE	182.80 mg
OPERATOR	Z.Kaszuba	REFERENCE	0.00 mg
DATE	8 Jan 2007	CRUCIBLE(sample)	1474.25 mg
IDENTITY No.	014	CRUCIBLE(refer.)	1470.20 mg
SAMPLE	2NA 90dni	CRUCIBLE+SAMPLE	1657.05 mg
REFERENCE	air	CRUCIBLE+REFERENCE	1470.20 mg
ATMOSPHERE	air	FLOW RATE	0.00 ccm/min
CRUCIBLE	Al2O3	REMARK	08/IV/163/06
		Name: --->	M14
TC: CONTROL	S: Pt_10	TC: SAMPLE	S: Pt_10
SAMPLE CARRIER	DTA/TG 1	RANGE: TG	1000.00 mg
		RANGE: DTA	400.00 uV

TEMPERATURE PROGRAM:

START TEMPERATURE / °C	20						
SEGMENT NUMBER --->	1	2	3	4	5	6	
HEATING RATE / K/min	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
END TEMPERATURE / °C	990	0	0	0	0	0	0
CONSTANT TIME / hh.mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TRACK: 1-2-3	000	000	000	000	000	000	000
SAMPLING TIME / sec	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ACQ. RATE / points/K	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TIME / hh.mm	1.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EMERG.RESET TEMP. / °C	995						
TOTAL TIME / hh.mm	1.37						

Tabela 5.39. Parametry badania metodą analizy termicznej (DTA, TG) próbki 2NA po 90 dniach twardnienia

EVALUATION :

Sample	Ident. no.	Date	File
2NA 90dni	014	8 Jan 2007	M14

Buoyancy correction:

#	S.Carrier	Crucible	Wgth.	Range	Rate	Atmosp.	Flow	Remark
1	DTA/TG 1	Al2O3	0.0	0...1400	10.0	air	0	pusta

Baseline subtraction:

#	S.Carrier	Crucible	Wgth.	Range	Rate	Atmosp.	Flow	Remark
1	DTA/TG 1	Al2O3	0.0	0...1350	10.0	air	0	pustall.06

RESULTS :

Segment 1: 20°C /10.00 / 990 °C
8 Jan 2007 /2NA 90dni /014

/Z.Kaszuba

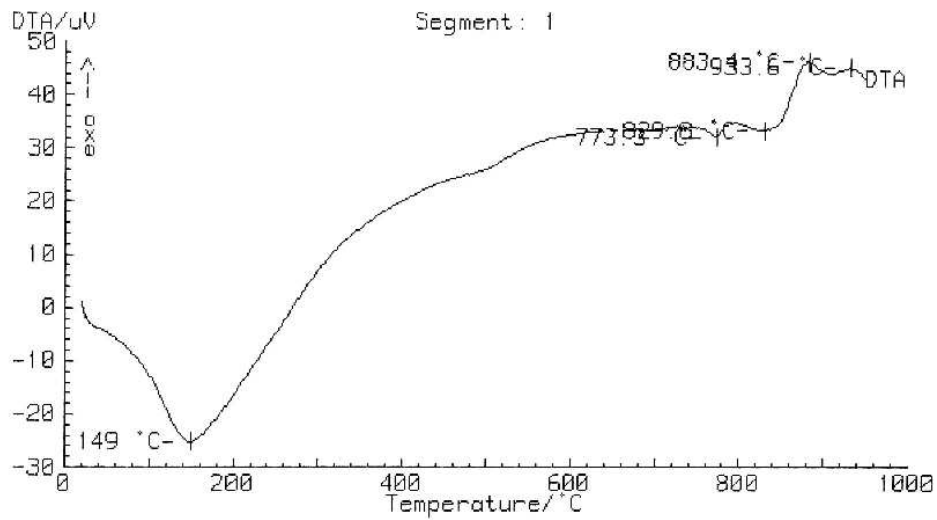
/08/IV/163/06

TG-steps:

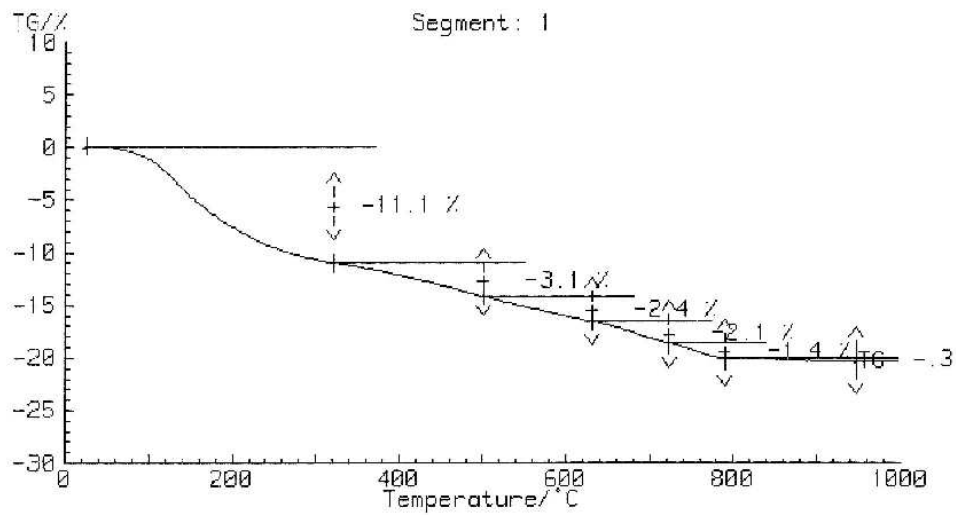
STEP	Tmin/ °C	Tmax/ °C	delta TG/ mg	delta TG/ %	RATIO
1	25.1	320.9	-2.028E+01	-011.09	-42.4
2	321.6	500.2	-5.719E+00	-003.13	-12.0
3	500.2	630.2	-4.456E+00	-002.44	-9.3
4	630.2	723.2	-3.756E+00	-002.05	-7.9
5	723.2	789.8	-2.497E+00	-001.37	-5.2
6	789.8	947.4	-4.782E-01	-000.26	-1.0
Total	25.1	947.4	3.718E+01	020.34	77.8
Residue	0.0	0.0	1.458E+02	079.75	0.0

Characteristic data: DTA

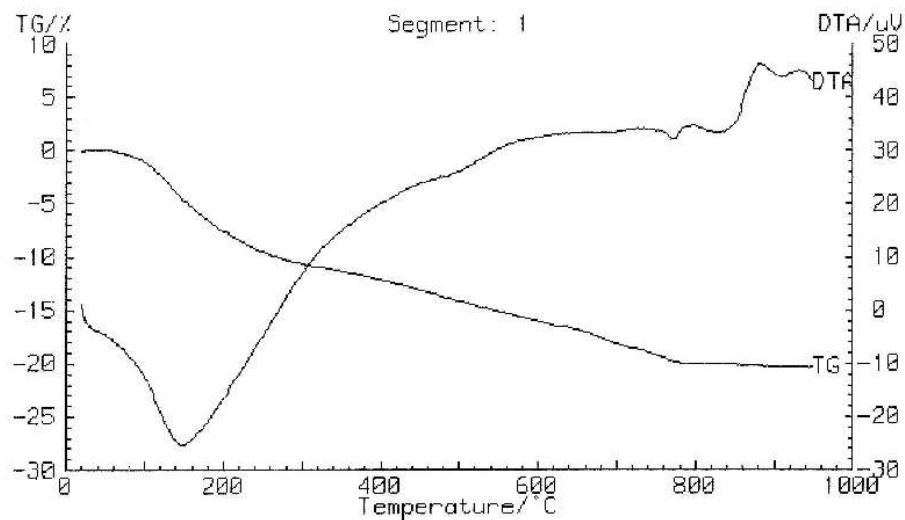
EVALUATION	RESULT/ °C	RANGE/ °C	RESULT/ min	RANGE/ min
T_minimum	149.0	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0
T_minimum	773.3	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0
T_minimum	829.8	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0
T_maximum	883.4	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0
T_maximum	933.6	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0



Rys. 5.88. Krzywa DTA próbki 2NA po 90 dniach twardnienia



Rys. 5.89. Krzywa TG próbki 2NA po 90 dniach twardnienia



Rys. 5.90. Krzywa DTA i TG próbki 2NA po 90 dniach twardnienia

Tabela 5.40. Parametry badania metodą analizy termicznej (DTA, TG) próbki 4NA po 90 dniach twardnienia

PARAMETERS OF TEST

LABORATORY	ISiC	SAMPLE	176.05 mg
OPERATOR	Z.Kaszuba	REFERENCE	0.00 mg
DATE	9 Jan 2007	CRUCIBLE(sample)	1480.00 mg
IDENTITY No.	015	CRUCIBLE(refer.)	1470.20 mg
SAMPLE	4NA 90 dni	CRUCIBLE+SAMPLE	1656.05 mg
REFERENCE	air	CRUCIBLE+REFERENCE	1470.20 mg
ATMOSPHERE	air	FLOW RATE	0.00 ccm/min
CRUCIBLE	Al2O3	REMARK	08/IV/163/06
		Name: --->	M15
TC: CONTROL	S: Pt_10	TC: SAMPLE	S: Pt_10
SAMPLE CARRIER	DTA/TG 1	RANGE: TG	1000.00 mg
		RANGE: DTA	400.00 uV

TEMPERATURE PROGRAM:

START TEMPERATURE / °C	20						
SEGMENT NUMBER --->	1	2	3	4	5	6	
HEATING RATE / K/min	10.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
END TEMPERATURE / °C	990	0	0	0	0	0	0
CONSTANT TIME / hh.mm	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TRACK: 1-2-3	000	000	000	000	000	000	000
SAMPLING TIME / sec	4.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
ACQ. RATE / points/K	1.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
TIME / hh.mm	1.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
EMERG.RESET TEMP. / °C	995						
TOTAL TIME / hh.mm	1.37						

Tabela 5.41. Parametry badania metodą analizy termicznej (DTA, TG) próbki 4NA po 90 dniach twardnienia

EVALUATION :

Sample	Ident. no.	Date	File
4NA 90 dni	015	9 Jan 2007	M15

Buoyancy correction:

#	S.Carrier	Crucible	Wgth.	Range	Rate	Atmosp.	Flow	Remark
1	DTA/TG 1	Al2O3	0.0	0...1400	10.0	air	0	pusta

Baseline subtraction:

#	S.Carrier	Crucible	Wgth.	Range	Rate	Atmosp.	Flow	Remark
1	DTA/TG 1	Al2O3	0.0	0...1350	10.0	air	0	pusta11.06

RESULTS :

Segment 1: 20°C /10.00 / 990 °C
9 Jan 2007 /4NA 90 dni /015

/Z.Kaszuba

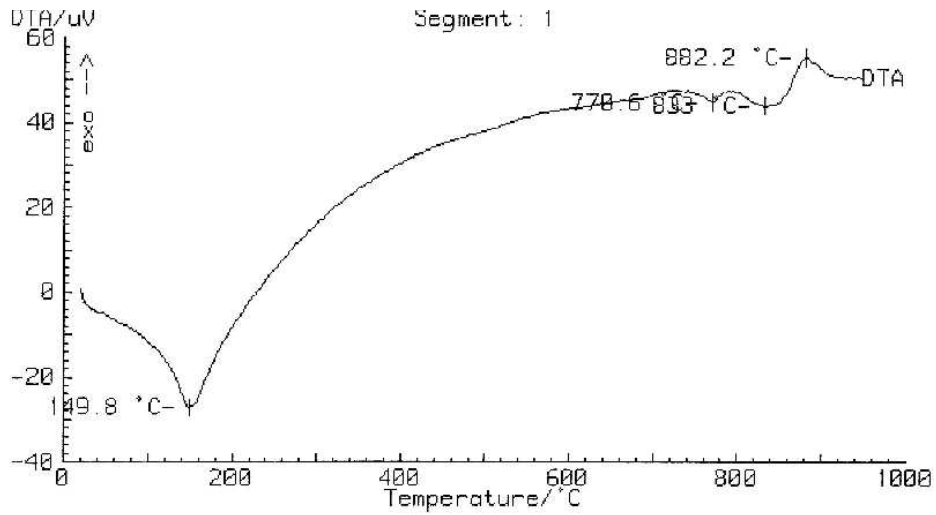
/08/IV/163/06

TG-steps:

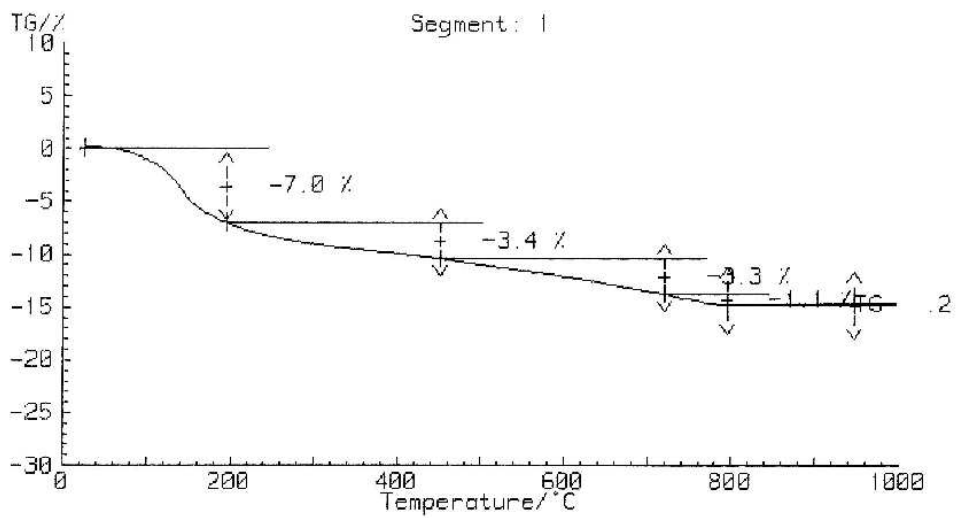
STEP	Tmin/ °C	Tmax/ °C	delta TG/ mg	delta TG/ %	RATIO
1	25.1	195.0	-1.236E+01	-007.02	-45.6
2	195.0	451.0	-6.031E+00	-003.43	-22.2
3	451.0	720.1	-5.822E+00	-003.31	-21.5
4	720.8	794.8	-1.996E+00	-001.13	-7.4
5	794.8	947.3	2.713E-01	000.15	1.0
Total	25.1	794.8	2.621E+01	014.89	96.6
Residue	0.0	0.0	1.503E+02	085.36	0.0

Characteristic data: DTA

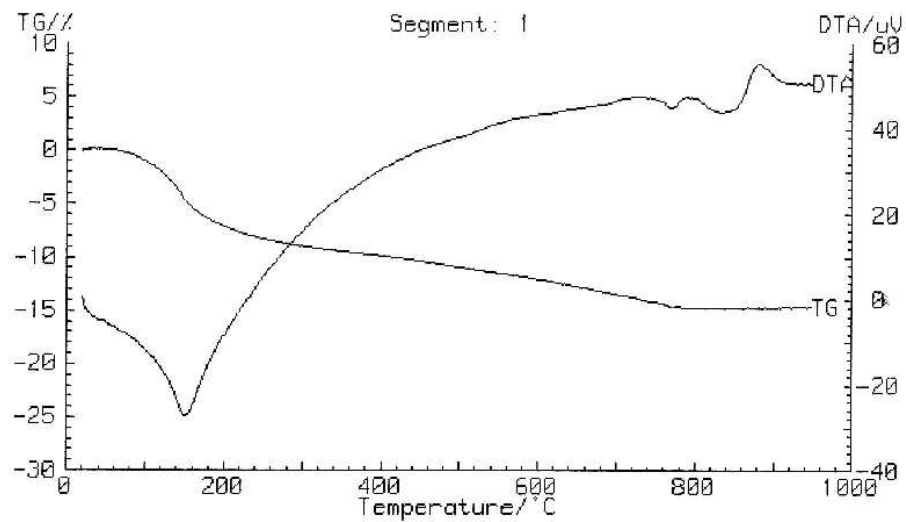
EVALUATION	RESULT/ °C	RANGE/ °C	RESULT/ min	RANGE/ min
T_minimum	149.8	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0
T_minimum	770.6	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0
T_minimum	833.0	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0
T_maximum	882.2	0.0 .. 0.0	0.0	0.0 .. 0.0



Rys. 5.91. Krzywa DTA próbki 4NA po 90 dniach twardnienia



Rys. 5.92. Krzywa TG próbki 4NA po 90 dniach twardnienia



Rys. 5.93. Krzywa DTA i TG próbki 4NA po 90 dniach twardnienia

Załącznik 4

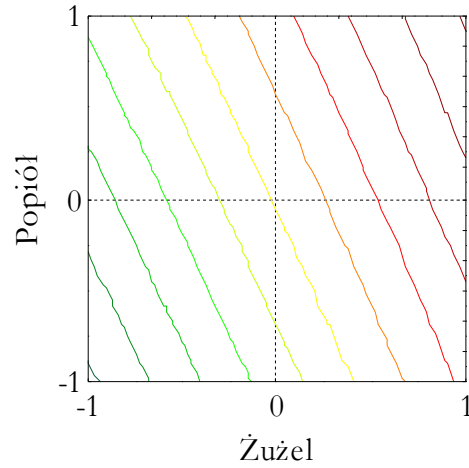
**Wyniki eksperymentu: funkcje regresji
i plany warstwiczne**

Tabela 6.1. Funkcje regresji dla poszczególnych parametrów zawiesiny płynnej

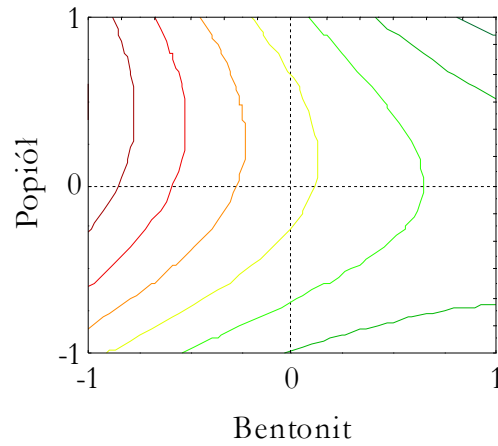
Parametr	Funkcja regresji
1	2
Gęstość objętościowa	$\rho=1,282+0,005\cdot x_1+0,070\cdot x_2+0,040\cdot x_3+0,004\cdot x_1^2-0,001\cdot x_2^2-0,001\cdot x_3^2-0,013\cdot x_1\cdot x_2+0,003\cdot x_1\cdot x_3-0,008\cdot x_2\cdot x_3$
Lepkość	$L=38,601+3,000\cdot x_1+0,500\cdot x_2+2,500\cdot x_3-0,449\cdot x_1^2+0,051\cdot x_2^2+2,051\cdot x_3^2-0,750\cdot x_1\cdot x_2+0,750\cdot x_1\cdot x_3-0,250\cdot x_2\cdot x_3$
Odstój dobowy wody	$O_d=4,047-3,000\cdot x_1+1,000\cdot x_2-0,500\cdot x_3+0,697\cdot x_1^2+0,697\cdot x_2^2-1,804\cdot x_3^2+1,750\cdot x_1\cdot x_2+0,000\cdot x_1\cdot x_3+0,750\cdot x_2\cdot x_3$
Przesącz filtracyjny	$\% \text{-ony ubytek masy}=61,744-3,450\cdot x_1-4,600\cdot x_2-2,300\cdot x_3-2,127\cdot x_1^2-0,977\cdot x_2^2-0,977\cdot x_3^2+0,025\cdot x_1\cdot x_2+3,475\cdot x_1\cdot x_3-1,125\cdot x_2\cdot x_3$
Wytrzymałość strukturalna τ_s po 1 min.	$\tau_{s1min.}=25,243+14,501\cdot x_1+2,500\cdot x_2+19,502\cdot x_3-3,017\cdot x_1^2-2,017\cdot x_2^2+8,984\cdot x_3^2-16,501\cdot x_1\cdot x_2+7,001\cdot x_1\cdot x_3-5,000\cdot x_2\cdot x_3$
Wytrzymałość strukturalna τ_s po 10 min.	$\tau_{s10min.}=14,632+11,001\cdot x_1+5,000\cdot x_2+6,001\cdot x_3+0,743\cdot x_1^2+5,743\cdot x_2^2+8,743\cdot x_3^2+2,000\cdot x_1\cdot x_2+6,001\cdot x_1\cdot x_3+9,501\cdot x_2\cdot x_3$

Tabela 6.2. Wyniki weryfikacji wpływu poszczególnych składników wielomianu

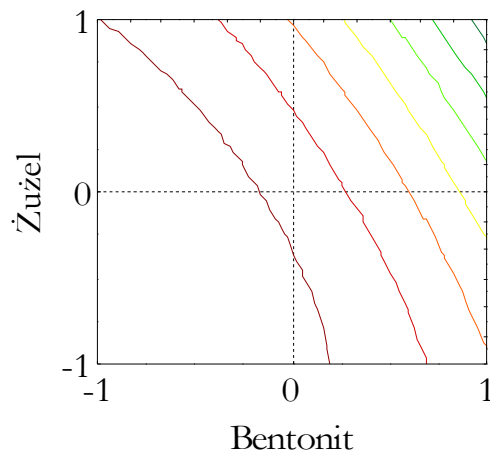
Parametr	Funkcja regresji
1	2
Gęstość objętościowa	$\rho=1,282+0,070\cdot x_2+0,040\cdot x_3$
Lepkość	$L=38,601+3,000\cdot x_1+2,500\cdot x_3$
Odstój dobowy wody	$O_d=4,047-3,000\cdot x_1$
Przesącz filtracyjny	$\% \text{-ony ubytek masy}=61,744-3,450\cdot x_1-4,600\cdot x_2$
Wytrzymałość strukturalna τ_s po 1 min.	$\tau_{s1min.}=25,243+14,501\cdot x_1+19,502\cdot x_3+8,984\cdot x_3^2-16,501\cdot x_1\cdot x_2+7,001\cdot x_1\cdot x_3-5,000\cdot x_2\cdot x_3$
Wytrzymałość strukturalna τ_s po 10 min.	$\tau_{s10min.}=14,632+11,001\cdot x_1+5,000\cdot x_2+6,001\cdot x_3+5,743\cdot x_2^2+8,743\cdot x_3^2+2,000\cdot x_1\cdot x_2+6,001\cdot x_1\cdot x_3+9,501\cdot x_2\cdot x_3$



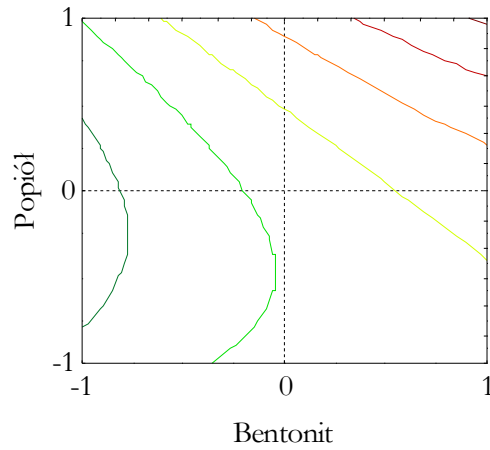
Rys. 6.1. Zależność gęstości objętościowej ρ zawiesiny plynnej od dozowania żużla wielkopieczowego (ozn. x_2 według planu statystycznego) i popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (ozn. x_3)



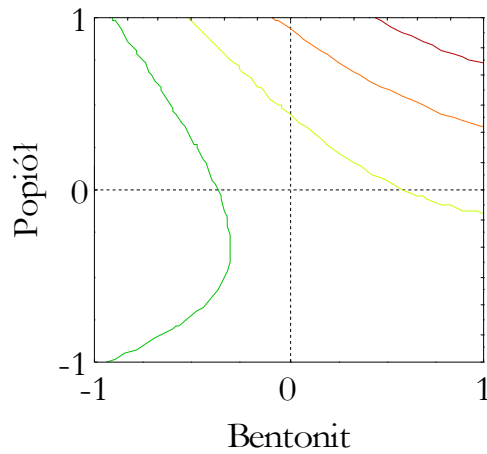
Rys. 6.2. Zależność odstoju dobowego wody O_d zawiesiny plynnej od dozowania bentonitu (x_1) i popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (x_3)



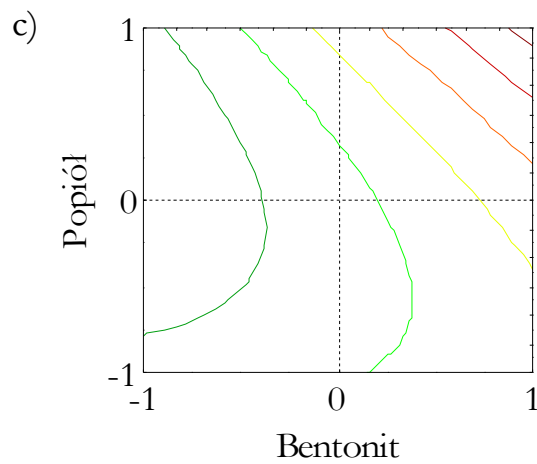
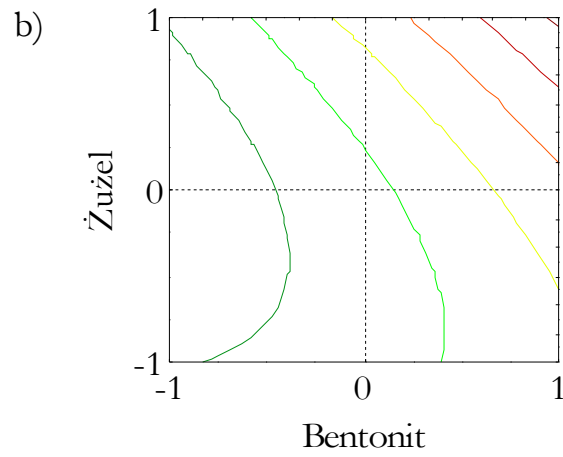
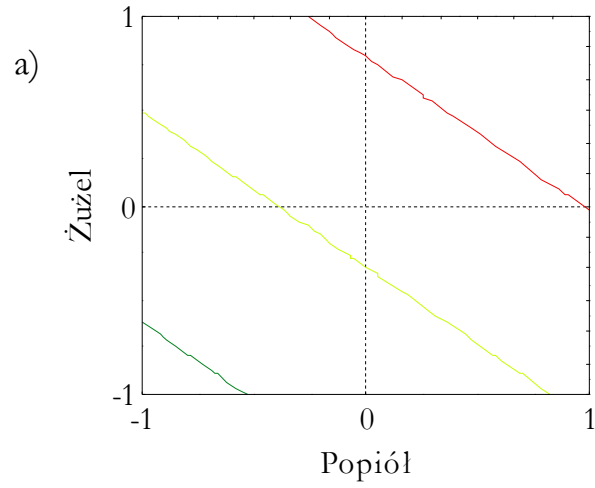
Rys. 6.3. Zależność ubytku masy (w %) zawiesiny plynnej pod wpływem działającego ciśnienia od dozowania bentonitu (x_1) i żużla (x_2)



Rys. 6.4. Zależność lepkości umownej L zawiesiny płynnej od dozowania bentonitu (x_1) i popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (x_3)



Rys. 6.5. Zależność wytrzymałości strukturalnej zawiesiny płynnej po 1 min od pozostawienia jej w bezruchu od dozowania bentonitu (x_1) i popiołu fluidalnego z węgla brunatnego (x_3)



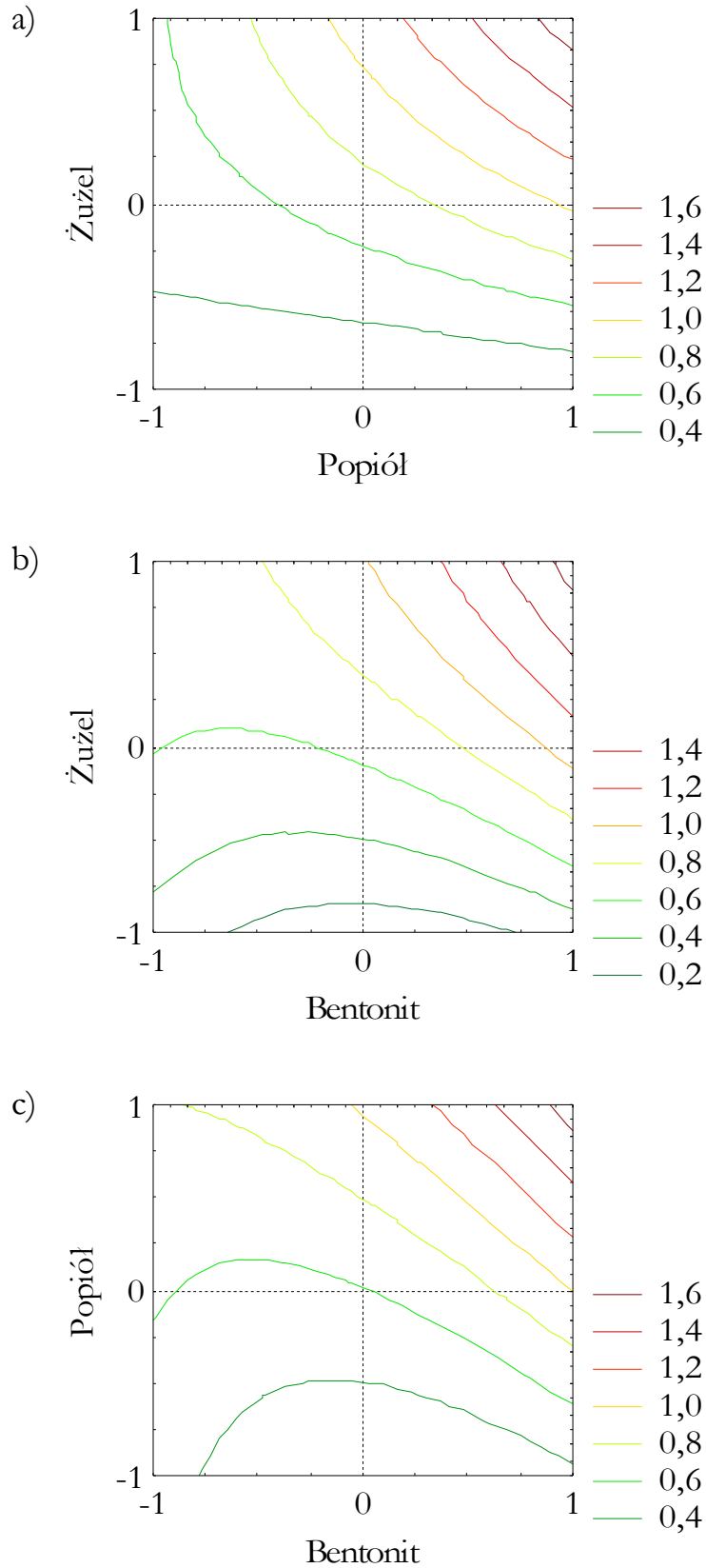
Rys. 6.6. Zależność wytrzymałości strukturalnej zawiesiny płynnej po 10 min od pozostawienia jej w bezruchu od dozowania poszczególnych składników; a) żużla (x_2) i popiołu (x_3), b) bentonitu (x_1) i żużla (x_2), c) bentonitu (x_1) i popiołu (x_3)

Tabela 6.3. Funkcje regresji dla poszczególnych parametrów zawiesiny stwardniałej

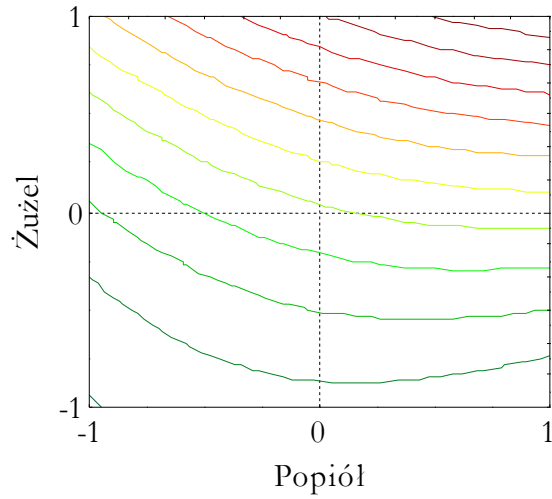
Parametr	Funkcja regresji
1	2
$f_c(14)$	$f_c(14)=0,641+0,115 \cdot x_1+0,405 \cdot x_2+0,310 \cdot x_3+0,202 \cdot x_1^2-0,098 \cdot x_2^2+0,007 \cdot x_3^2-0,055 \cdot x_1 \cdot x_2+0,055 \cdot x_1 \cdot x_3+0,185 \cdot x_2 \cdot x_3$
$f_c(28)$	$f_c(28)=1,110+0,095 \cdot x_1+0,890 \cdot x_2+0,430 \cdot x_3+0,191 \cdot x_1^2+0,156 \cdot x_2^2-0,184 \cdot x_3^2-0,260 \cdot x_1 \cdot x_2-0,095 \cdot x_1 \cdot x_3+0,150 \cdot x_2 \cdot x_3$
$f_c(60)$	$f_c(60)=1,474+0,195 \cdot x_1+1,035 \cdot x_2+0,455 \cdot x_3-0,141 \cdot x_1^2-0,149 \cdot x_2^2+0,089 \cdot x_3^2-0,213 \cdot x_1 \cdot x_2+0,078 \cdot x_1 \cdot x_3+0,133 \cdot x_2 \cdot x_3$
$f_c(120)$	$f_c(120)=1,854-0,040 \cdot x_1+1,090 \cdot x_2+0,700 \cdot x_3-0,358 \cdot x_1^2-0,008 \cdot x_2^2+0,292 \cdot x_3^2-0,560 \cdot x_1 \cdot x_2+0,130 \cdot x_1 \cdot x_3+0,315 \cdot x_2 \cdot x_3$
$f_i(14)$	$f_i(14)=0,104-0,020 \cdot x_1+0,065 \cdot x_2+0,045 \cdot x_3+0,033 \cdot x_1^2-0,022 \cdot x_2^2-0,002 \cdot x_3^2-0,015 \cdot x_1 \cdot x_2+0,000 \cdot x_1 \cdot x_3+0,055 \cdot x_2 \cdot x_3$
$f_i(28)$	$f_i(28)=0,176+0,030 \cdot x_1+0,115 \cdot x_2+0,030 \cdot x_3+0,067 \cdot x_1^2-0,008 \cdot x_2^2-0,043 \cdot x_3^2-0,015 \cdot x_1 \cdot x_2-0,035 \cdot x_1 \cdot x_3+0,000 \cdot x_2 \cdot x_3$
$f_i(60)$	$f_i(60)=0,214+0,025 \cdot x_1+0,170 \cdot x_2+0,060 \cdot x_3+0,038 \cdot x_1^2+0,053 \cdot x_2^2-0,087 \cdot x_3^2-0,080 \cdot x_1 \cdot x_2-0,075 \cdot x_1 \cdot x_3-0,010 \cdot x_2 \cdot x_3$
$f_i(120)$	$f_i(120)=0,278+0,020 \cdot x_1+0,70 \cdot x_2+0,035 \cdot x_3+0,083 \cdot x_1^2+0,003 \cdot x_2^2-0,122 \cdot x_3^2-0,033 \cdot x_1 \cdot x_2-0,098 \cdot x_1 \cdot x_3-0,002 \cdot x_2 \cdot x_3$
$k_{10}(14)$	$k_{10}(14)=-6,94 \cdot 10^{-9}-1,75 \cdot 10^{-9} \cdot x_1-2,80 \cdot 10^{-8} \cdot x_2-2,23 \cdot 10^{-9} \cdot x_3+1,22 \cdot 10^{-8} \cdot x_1^2+3,77 \cdot 10^{-8} \cdot x_2^2+1,56 \cdot 10^{-8} \cdot x_3^2+2,22 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_2-2,79 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_3-1,89 \cdot 10^{-8} \cdot x_2 \cdot x_3$
$k_{10}(28)$	$k_{10}(28)=4,78 \cdot 10^{-9}+3,41 \cdot 10^{-10} \cdot x_1-4,40 \cdot 10^{-8} \cdot x_2-2,13 \cdot 10^{-9} \cdot x_3-4,32 \cdot 10^{-9} \cdot x_1^2+4,02 \cdot 10^{-9} \cdot x_2^2-5,60 \cdot 10^{-10} \cdot x_3^2+4,08 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_2+5,00 \cdot 10^{-9} \cdot x_1 \cdot x_3-3,91 \cdot 10^{-8} \cdot x_2 \cdot x_3$
$k_{10}(60)$	$k_{10}(60)=-9,47 \cdot 10^{-9}-1,27 \cdot 10^{-9} \cdot x_1-1,04 \cdot 10^{-10} \cdot x_2-6,20 \cdot 10^{-10} \cdot x_3+1,48 \cdot 10^{-8} \cdot x_1^2+1,32 \cdot 10^{-8} \cdot x_2^2+1,42 \cdot 10^{-8} \cdot x_3^2+3,35 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_2-3,37 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_3-3,18 \cdot 10^{-8} \cdot x_2 \cdot x_3$
$k_{10}(120)$	$k_{10}(120)=-8,31 \cdot 10^{-9}-9,50 \cdot 10^{-12} \cdot x_1-2,10 \cdot 10^{-10} \cdot x_2-9,18 \cdot 10^{-10} \cdot x_3+1,10 \cdot 10^{-8} \cdot x_1^2+1,17 \cdot 10^{-8} \cdot x_2^2+1,23 \cdot 10^{-8} \cdot x_3^2+2,79 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_2-2,68 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_3-2,72 \cdot 10^{-8} \cdot x_2 \cdot x_3$

Tabela 6.4. Wyniki weryfikacji wpływu poszczególnych składników wielomianu

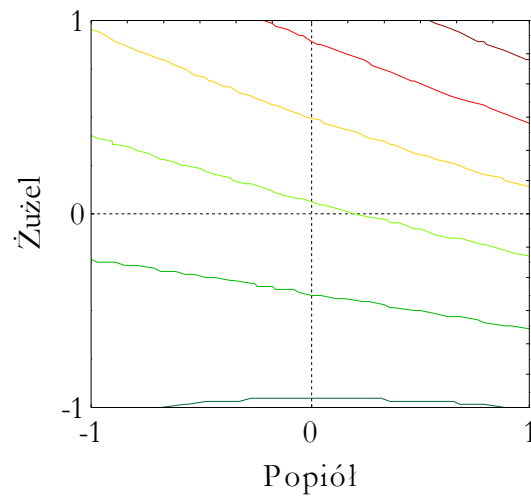
Parametr	Funkcja regresji
1	2
$f_c(14)$	$f_c(14)=0,641+0,115 \cdot x_1+0,405 \cdot x_2+0,310 \cdot x_3+0,202 \cdot x_1^2-0,098 \cdot x_2^2+0,185 \cdot x_2 \cdot x_3$
$f_c(28)$	$f_c(28)=1,110+0,890 \cdot x_2+0,430 \cdot x_3$
$f_c(60)$	$f_c(60)=1,474+1,035 \cdot x_2$
$f_c(120)$	$f_c(120)=1,854+1,090 \cdot x_2$
$f_i(14)$	$f_i(14)=0,104$
$f_i(28)$	$f_i(28)=0,176+0,115 \cdot x_2$
$f_i(60)$	$f_i(60)=0,214+0,170 \cdot x_2$
$f_i(120)$	$f_i(120)=0,278$
$k_{10}(14)$	$k_{10}(14)=-6,94 \cdot 10^{-9}-2,80 \cdot 10^{-8} \cdot x_2+1,22 \cdot 10^{-8} \cdot x_1^2+3,77 \cdot 10^{-8} \cdot x_2^2+1,56 \cdot 10^{-8} \cdot x_3^2+2,22 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_2-2,79 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_3-1,89 \cdot 10^{-8} \cdot x_2 \cdot x_3$
$k_{10}(28)$	$k_{10}(28)=4,78 \cdot 10^{-9}-4,40 \cdot 10^{-8} \cdot x_2-4,32 \cdot 10^{-9} \cdot x_1^2+4,02 \cdot 10^{-9} \cdot x_2^2+4,08 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_2+5,00 \cdot 10^{-9} \cdot x_1 \cdot x_3-3,91 \cdot 10^{-8} \cdot x_2 \cdot x_3$
$k_{10}(60)$	$k_{10}(60)=-9,47 \cdot 10^{-9}+1,48 \cdot 10^{-8} \cdot x_1^2+1,32 \cdot 10^{-8} \cdot x_2^2+1,42 \cdot 10^{-8} \cdot x_3^2+3,35 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_2-3,37 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_3-3,18 \cdot 10^{-8} \cdot x_2 \cdot x_3$
$k_{10}(120)$	$k_{10}(120)=-8,31 \cdot 10^{-9}+1,10 \cdot 10^{-8} \cdot x_1^2+1,17 \cdot 10^{-8} \cdot x_2^2+1,23 \cdot 10^{-8} \cdot x_3^2+2,79 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_2-2,68 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 \cdot x_3-2,72 \cdot 10^{-8} \cdot x_2 \cdot x_3$



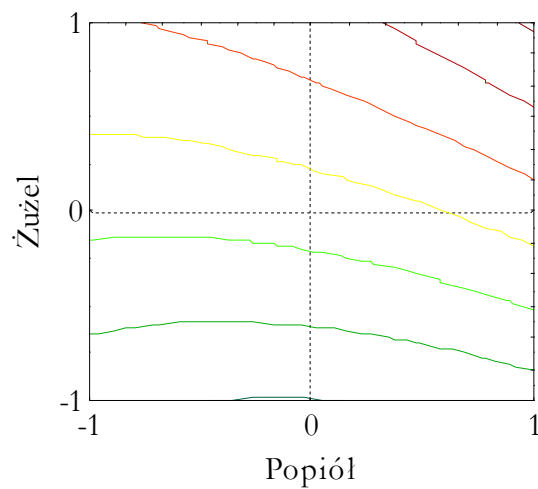
Rys. 6.7. Zależność wytrzymałości na ściskanie zawiesziny po 14 dniach twardnienia od dozowania składników; a) żużla (x_2) i popiołu (x_3), b) bentonitu (x_1) i żużla (x_2), c) bentonitu (x_1) i popiołu (x_3)



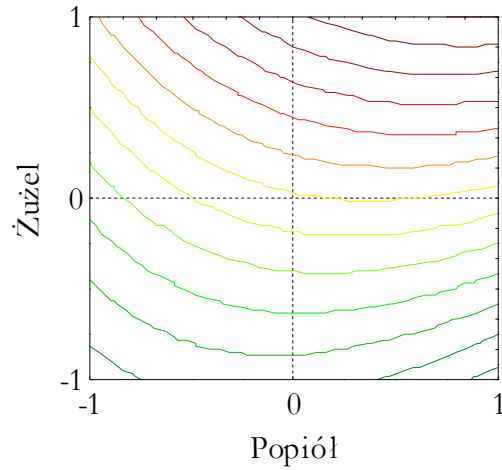
Rys. 6.8. Zależność wytrzymałości na ściskanie zawiesziny po 28 dniach twardnienia od dozowania żużla (x_2) i popiołu (x_3)



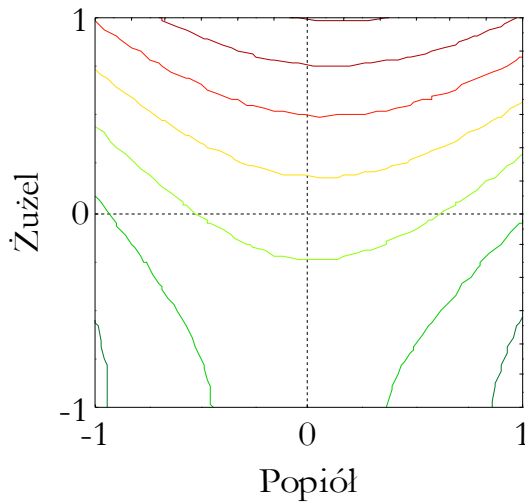
Rys. 6.9. Zależność wytrzymałości na ściskanie zawiesziny po 60 dniach twardnienia od dozowania żużla (x_2)



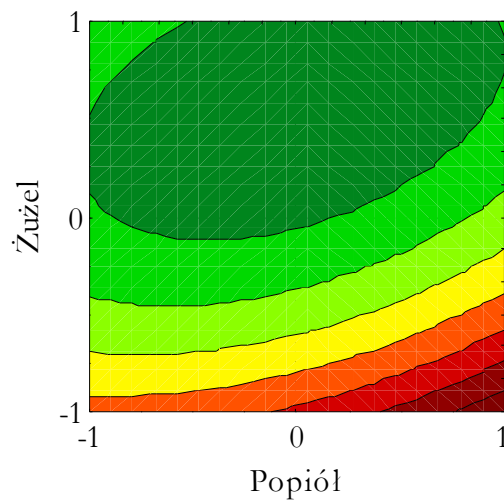
Rys. 6.10. Zależność wytrzymałości na ściskanie zawiesziny po 120 dniach twardnienia od dozowania żużla (x_2)



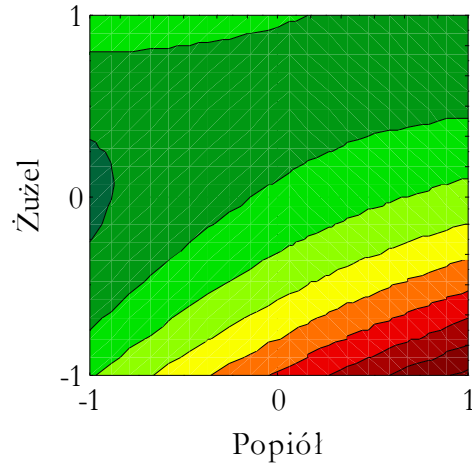
Rys. 6.11. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy rozlupywaniu zawiesiny po 28 dniach twardnienia od dozowania żużla (x_2)



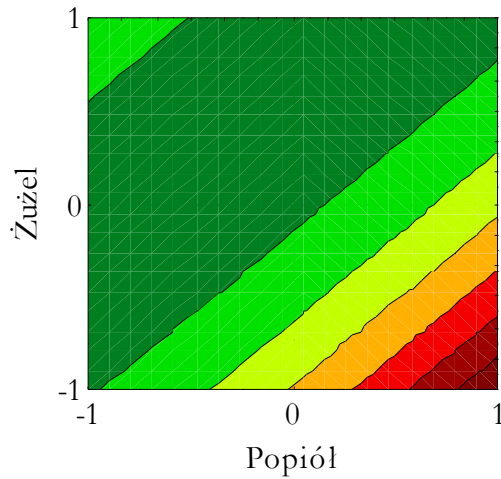
Rys. 6.12. Zależność wytrzymałości na rozciąganie przy rozlupywaniu zawiesiny po 60 dniach twardnienia od dozowania żużla (x_2)



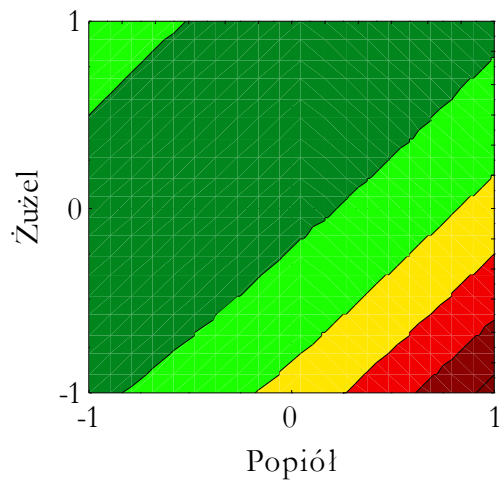
Rys. 6.13. Zależność przepuszczalności hydraulicznej zawiesiny po 14 dniach twardnienia od dozowania żużla (x_2) i popiołu (x_1)



Rys. 6.14. Zależność przepuszczalności hydraulicznej zawiesiny po 28 dniach twardnienia od dozowania żużla (x_2) i popiołu (x_1)



Rys. 6.15. Zależność przepuszczalności hydraulicznej zawiesiny po 60 dniach twardnienia od dozowania żużla (x_2) i popiołu (x_1)



Rys. 6.16. Zależność przepuszczalności hydraulicznej zawiesiny po 120 dniach twardnienia od dozowania żużla (x_2) i popiołu (x_1)

STRESZCZENIE

Rozprawa dotyczy określenia właściwości, w stanie płynnym i po stwardnieniu, oryginalnego materiału, tj. wysokowodnej zawiesiny bentonitu i spoiwa: mielonego żużla wielkopieczowego skojarzonego z nietypowym aktywatorem – lotnym popiołem fluidalnym z węgla brunatnego. Celem pracy było wykazanie, że możliwe jest unieszkodliwianie wymienionych odpadów mineralnych przez wykorzystanie ich w wykonawstwie przesłon przeciwfiltracyjnych.

Pierwsza część rozprawy obejmuje określenie materiału i zakresu zastosowań zawiesin twardniejących oraz przegląd stanu wiedzy o składnikach wykorzystanych do komponowania składów zawiesin będących przedmiotem pracy.

Zasadniczą część rozprawy stanowią badania własne właściwości zawiesiny płynnej i stwardniałej (w czterech terminach twardnienia: 14, 28, 60 i 120 dni). W ramach prac laboratoryjnych wykonano badania gęstości objętościowej, odstoju dobowego wody i objętości przesączu filtracyjnego uzyskanego przez poddanie zawiesiny działaniu ciśnienia w zakresie od 0,1 do 0,5 MPa. W celu sprawdzenia czy zawiesina płynna spełnia wymagania technologiczne poddano ją badaniu lepkości umownej za pomocą lejka Marsha. Porównano również stabilność poszczególnych receptur zawiesiny płynnej skomponowanej według wybranego planu eksperymentu na podstawie oznaczenia wytrzymałości strukturalnej. W ostatniej części badań określono zachowanie reologiczne płynnej zawiesiny wykonanej według wybranych receptur (krzywe płynięcia).

W ramach prac laboratoryjnych mających na celu określenie właściwości mechanicznych i filtracyjnych zawiesiny w czterech terminach twardnienia wykonano badania wytrzymałości na ściskanie, wytrzymałości na rozciąganie przy rozlupywaniu oraz przepuszczalności hydraulicznej. Wykonano badania odkształcalności wybranych próbek zawiesiny po 28 i 90 dniach twardnienia. Na podstawie wyników badań określono odkształcenia początkowe, opóźnione i całkowite zawiesiny stwardniałej. Wykonano badania składu fazowego i mikrostruktury wyselekcjonowanych próbek zawiesiny po 28 i 90 dniach twardnienia, wykorzystując do tego celu metody termicznej analizy różnicowej, dyfrakcji rentgenowskiej oraz skaningowej mikroskopii elektronowej.

Uzyskane wyniki badań uogólniono i podsumowano wnioskami.

Do rozprawy dołączono tabele zawierające szczegółowe wyniki pomiarów oraz wykresy przedstawiające graficzną ich interpretację.