



foto: Archiwum BASF

# Gazoport w Świnoujściu – betonowe zbiorniki na ciekły gaz

Prognozowany przez ekspertów ciągły wzrost zapotrzebowania na surowiec energetyczny, jakim jest gaz, oraz konieczność zapewnienia bezpieczeństwa energetycznego kraju poprzez uniezależnienie się od monopolu jednego dostawcy przyczyniły się do tego, że 19 sierpnia 2008 r. Rada Ministrów RP podjęła uchwałę, w której budowa gazoportu w Świnoujściu uznana została za inwestycję strategiczną dla interesu naszego kraju, zgodną z planami dywersyfikacji źródeł i dróg dostaw gazu ziemnego oraz zagwarantowania bezpieczeństwa energetycznego Polski.

Budowa gazoportu to ogromna inwestycja obejmująca:

- budowę portu zewnętrznego wraz z falochronem
- budowę nadbrzeży
- budowę terminalu LNG wraz z siecią przyłączeniową.

Powyższy projekt, którego wizualizację przedstawia rys. 1, jest realizowany przez PLNG SA (budowa terminalu LNG), Operatora Gazociągów Przesyłowych Gaz-System SA (budowa gazociągu Świnoujście – Szczecin, łączącego terminal z systemem przesyłowym), Urząd Morski w Szczecinie (budowa infrastruktury zapewniającej dostęp do

portu zewnętrznego) oraz Zarząd Portów Morskich Szczecin i Świnoujście (infrastruktura portowa, w tym budowa stanowiska statkowego).

LNG jest paliwem produkowanym z gazu ziemnego poprzez usuwanie zanieczyszczeń, a następnie skroplenie go pod wpływem ciśnienia i bardzo niskiej temperatury – około minus 160°C. Skroplony gaz ma objętość około 600 razy mniejszą niż w stanie naturalnym, co czyni go bardziej ekonomicznym w magazynowaniu, a następnie transporcie, np. morskim. Po dostarczeniu na miejsce przeznaczenia LNG jest poddawany procesowi regazyfikacji, czyli ponownego przekształcenia w gaz poprzez ogrzanie ciekłego surowca. Na system dostawczy w łańcuchu LNG składają się rurociągi doprowadzające gaz ziemny ze złoża do instalacji skraplających gaz, terminal załadunkowy (eksportowy), tankowce (metanowce) i terminal rozładunkowy (importowy). Po przetransportowaniu ładunku drogą morską do instalacji odbiorczej (terminalu importowego regazyfikującego) ciekłe paliwo jest przesyłane do specjalnych zbiorników kriogenicznych. Mogą one być metalowe, żelbetonowe lub podziemne – w zamrożonym gruncie lub kawernach podziemnych. W terminalu importowym LNG jest poddawany procesowi regazyfikacji, a następnie przesyłany dalej gazociągami lub cysternami (transport kolejowy lub drogowy) [1, 2]. Zatem zbiorniki na LNG nie są przewidziane do magazynowania tego surowca, a jedynie pełnią rolę buforową, umożliwiającą sprawny odbiór kolejnych dostaw.

Zdecydowana większość budowli powstających w ostatnim czasie to budowle wykonywane przy użyciu betonu jako podstawowego materiału konstrukcyjnego. Wzrost stopnia skomplikowania niektórych konstrukcji, przewidywanie ich eksploatacji w nowych, niesklasyfikowanych przez dokumenty normatywne warunkach, wymaga od producenta betonu odpowiednich działań, mających na celu wykazanie najlepszego spośród możliwych materiałowo rozwiązań. Często przy tego typu działaniach sięga się po mniej standardowe meto-

Rys. 1. Wizualizacja gazoportu [1]





dy badań, jak również tworzy się nowe, pozwalające na dokonanie właściwego wyboru. Wydaje się, że budowę zbiorników na ciekły gaz w gazoporcie w Świnoujściu należy zaliczyć z technologicznego punktu widzenia do pewnego rodzaju wyzwań o charakterze konstrukcyjnym oraz materiałowym, mając na uwadze właściwości surowca w nich magazynowanego, szczególnie w sytuacjach o charakterze awaryjnym.

Zbiorniki na LNG dla gazoportu w Świnoujściu zaprojektowano w konstrukcji warstwowej, składającej się ze zbiornika właściwego – wewnętrznego – służącego do magazynowania gazu i wykonanego ze specjalnej stali odpornej na stały kontakt z płynnym gazem o temperaturze  $-163^{\circ}\text{C}$  oraz izolacji termicznej i żelbetowego zbiornika osłonowego – zewnętrznego. Szczegóły konstrukcyjne są poufne i stanowią własność biura projektowego. Żelbetowy zbiornik zewnętrzny jest podstawowym elementem konstrukcyjnym składającym się z płyty fundamentowej, ścian pionowych części cylindrycznej zbiornika oraz dachu zaprojektowanego w kształcie kopuły. Ściany zbiorników wysokości około 42 m i grubości 0,8 m przewidziano jako elementy sprężane w kierunku poziomym i pionowym. Wykonywano je w technologii ślizgowej ciągłego betonowania, tak aby wyeliminować możliwość powstania „zimnych spoin”. Na betonowy zbiornik zewnętrzny, obok obciążeń eksploatacyjnych, przewidziane jest między innymi oddziaływanie obciążeń wyjątkowych, do których zaliczyć można np. uszkodzenia zbiornika wewnętrznego, prowadzącego do wycieku ciekłego gazu do warstwy izolacyjnej, a tym samym jego kontakt z powierzchnią betonu.

W oparciu o charakterystykę obciążeń wynikających z przewidzianej pracy konstrukcji zbiornika zewnętrznego, jego wstępny projekt przewidywał zastosowanie betonów o właściwościach przedstawionych w tabelicy 1.

Za obciążenie wyjątkowe o istotnym znaczeniu uważana jest wspomniana sytuacja awaryjna związana z możliwością rozszczelnienia zbiornika wewnętrznego, w wyniku czego warstwa termicznej izolacji wewnętrznej oraz konstrukcja betonowa w sposób nagły zostanie poddana działaniu medium o temperaturze ok.  $-160^{\circ}\text{C}$ . Mając na uwadze możliwość oddziaływania na beton medium o tak niskiej temperaturze, konieczne było ustalenie niektórych wła-

Tab. 1. Wstępne założenia projektowe dla betonu na zbiorniki LNG

Element	Klasa wytrzymałości	Klasa ekspozycji wg PN -EN 206-1	Klasa zawartości chlorków	Maksymalne w/c	Maksymalny wymiar ziarna kruszywa, mm	Min. zawartość spoiwa w betonie, $\text{kg/m}^3$
PŁYTA	C40/50	XF3	Cl 0,1	0,45	$D_{\max} \leq 25$	$\frac{700}{\sqrt{D}}$
ŚCIANA	C40/50	XF2	Cl 0,1	0,45	$D_{\max} \leq 25$	$\frac{700}{\sqrt{D}}$
DACH	C40/50	XF3	Cl 0,1	0,45	$D_{\max} \leq 25$	$\frac{700}{\sqrt{D}}$

ściwości betonu mających wpływ na zachowanie się konstrukcji w przypadku zaistnienia takiej sytuacji. Przydatnym w ocenie zachowania się konstrukcji w przypadku takiego zdarzenia było przeprowadzenie m.in. następujących badań:

- oceny wytrzymałości na ściskanie po jednym cyklu zanurzenia próbek betonowych w ciekłym azocie na czas 1 h, zatem w temperaturze  $-196^{\circ}\text{C}$  oraz
- oceny wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej w przyjętym, możliwym do oceny zakresie temperatur.

Dodatkowo, dla celów projektowych i potwierdzających wymagane właściwości stwardniałych betonów, przeprowadzono także badania w zakresie:

- oceny dynamicznego modułu sprężystości
- oceny odporności na zamrażanie i rozmrażanie betonu klasyczną metodą, uwzględniającą wykonanie 250 cykli
- zmian wytrzymałości na ściskanie w czasie.

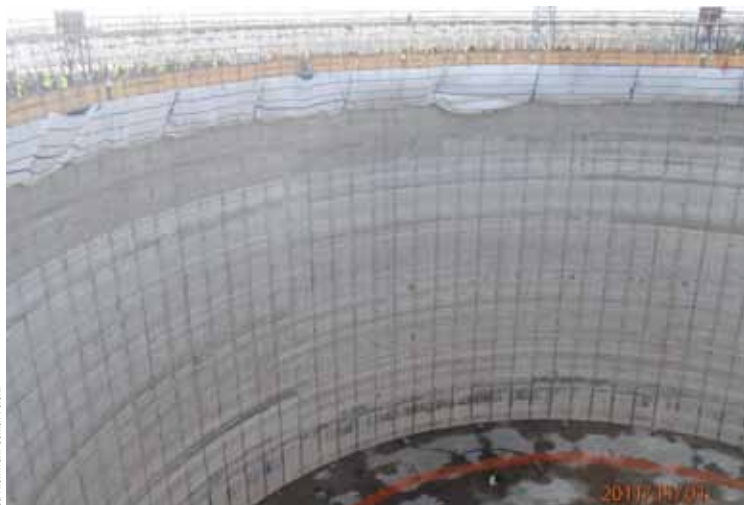
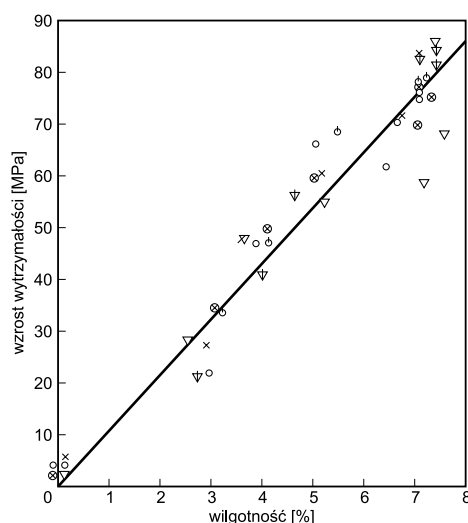


foto: Archiwum Cemex Polska

Rys. 2. Zależność wzrostu wytrzymałości betonu od jego wilgotności [4]



Przed przystąpieniem do prac projektowych zapoznano się z literaturą w zakresie właściwości betonów narażonych na działanie skrajnie niskich temperatur. Wynika z niej między innymi pewna prawidłowość polegająca na tym, że wytrzymałość na ściskanie betonu zamrożonego, schłodzonego do temperatury z zakresu 0°C do -200°C, jest znacznie wyższa niż wytrzymałość, gdy ma on tradycyjnie temperaturę około 20°C. Szczególnie poddanie zamrożeniu do bardzo niskich temperatur betonu wilgotnego może spowodować podniesienie się wytrzymałości na ściskanie nawet dwu- lub trzykrotnie. Ze spadkiem wilgotności betonu, wzrost jego wytrzymałości spowodowany zamrożeniem obserwowany jest już w znacznie niższym zakresie. Opisane powyżej różnice we wzroście wytrzymałości betonów o różnym stopniu wilgotności są związane z tworzeniem się lodu w porach stwardniałego zaczynu cementowego. Ponieważ lód zajmuje głównie obszar porów kapilarnych i potrafi przenosić naprężenia, to zamrożony beton można traktować jako materiał o istotnie obniżonej porowatości – i stąd znacząco wyższej wytrzymałości niż w temperaturze pokojowej [4]. Zależność tę oddaje wykres prezentowany na rysunku 2.

Na etapie przygotowania się producenta betonu



fol. Archiwum BASF

do realizacji inwestycji nie było wiadome, w jakich warunkach pogodowych, głównie temperaturowych, będą prowadzone prace budowlane. Mając na uwadze przyjętą metodę wykonawstwa – ciągłego betonowania, był to niebagatelny problem. Dlatego też między innymi przewidziano, że beton może być wykonany zarówno na spoiwach o niskim cieple hydratacji i stosunkowo wolnym przyroście wytrzymałości, jak również i takim, gdzie szybkość przyrostu cech wytrzymałościowych jest odpowiednio wysoka, co byłoby konieczne w sytuacji prowadzenia prac w okresie zimowym. Podjęte badania miały za cel głównie scharakteryzowanie właściwości betonów przewidzianych do wykorzystania w pracach betoniarskich, potwierdzenia zgodności ich właściwości z wymaganiami inwestora, a ponadto dostarczenie danych do projektowania konstrukcji zbiorników. Niejako przy okazji podjęte badania dały możliwość porównania pewnych właściwości betonów dedykowanych dla tego typu inwestycji, z uwzględnieniem zależności od rodzaju zastosowanego spoiwa. Ostatecznie, uzyskane wyniki badań zostały wykorzystane do zaprojektowania betonu o jeszcze innym składzie spoiwa, który ustalono w momencie rozpoczęcia badań kwalifikujących beton do dedykowanego rozwiązania i odpowiednio do technologii wykonania zbiorników oraz panujących warunków pogodowych, ale też uzyskanego już doświadczenia. W grupie przeprowadzonych badań uwzględniono także ocenę wpływu schłodzenia betonu ciekłym gazem, charakterystycznym dla sytuacji awaryjnej, na zmianę wytrzymałości betonów na ściskanie. Przygotowane do badań betony zostały wykonane w oparciu o raz ustalony skład mieszanki betonowej, z różnicami polegającymi na rodzaju zastosowanego cementu oraz ilości domieszek. Ustalony skład betonu był w tym przypadku efektem wykonania wielu prób laboratoryjnych i uzyskania oczekiwanych właściwości mieszanki betonowej, jak również stwardniałego betonu. W przypadku jednego z betonów dodatkowo wprowadzono krzemionkowy popiół lotny kat. A (tab. 2), a we wszystkich przypadkach zastosowano kruszywo łamane frakcji do 22 mm, na które składał się płukany piasek naturalny oraz kruszywo łamane gnejsowe pochodzące z Norwegii frakcji 2/8 mm, 8/16 mm oraz 16/22 mm. Kruszywo łamane spełniało m.in. wymagania

Tab. 2. Rodzaj cementów, ich ilość i wielkość wskaźnika W/C w betonach poddanych badaniom laboratoryjnym

Oznaczenie	Rodzaj spoiwa	Zawartość cementu w 1 m <sup>3</sup> , kg	W/C, -
Seria I	CEM III/A 42.5 R-NA	390	0,40
Seria II	CEM III/A 42.5 R-NA + popiół lotny	370 + 60	0,42
Seria III	CEM III/B 42.5N HSR/NA	390	0,40
Seria IV	CEM I 42.5 R	390	0,40
Seria V	CEM II/B-S 32.5 R	390	0,40

Tab. 3. Właściwości mieszanek betonowych, z których wykonywano próbki do badań betonu stwardniałego

Oznaczenie	Konsystencja – opad stożka, mm		Zawartość powietrza – metoda ciśnieniowa, %		Parametry powietrza w mieszance betonowej – w oparciu o badania metodą AVA	
	t=10 min	t=60 min	t=10 min	t=60 min	Sf, mm	A300, %
Seria I	180	180	5,4	6,3	0,222	1,8
Seria II	190	210	6,2	6,8	0,199	2,8
Seria III	200	210	6,8	6,8	0,207	2,4
Seria IV	180	140	6,5	6,0	0,215	1,7
Seria V	190	150	7,0	5,5	0,281	1,1

Parametr opisujący właściwości cementu	Jedn.	CEM III/A 42,5 R	CEM III/B 42,5 N	CEM II/B-S 32,5 R	CEM I 42,5 R	
Zawartość żużla wielkopiecowego	%	39	68	32	0	
Początek wiązania	min	165	215	160	130	
Koniec wiązania	min	215	270	210	170	
H <sub>2</sub> O dla zaczynu o normowej konsystencji	%	28,3	29,6	27,0	28,7	
Powierzchnia właściwa (Blaine)	cm <sup>2</sup> /g	5215	5180	3560	4195	
Wytrzymałość na ściskanie:	2 d	MPa	23,2	14,6	20,1	36,8
	28 d		58,4	59,9	49,9	58,7
Elementy składu chemicznego	SO <sub>3</sub>	%	2,58	1,88	2,06	3,32
	Cl		0,080	0,060	0,080	0,080
	Na <sub>2</sub> O <sub>eq</sub>		0,84	0,82	0,85	0,90

Tab. 4. Podstawowe informacje na temat składu i właściwości zastosowanych cementów

kategorii LA<sub>25</sub>, f<sub>1,5</sub>, oraz posiadało deklarację na nasiąkliwość WA<sub>24</sub> = 1%. Punkt piaskowy mieszaniny kruszyw wynosił 37%. W związku z koniecznością uzyskania klasy ekspozycji XF3 mieszanki betonowe były napowietrzane, właściwie stosowano układ domieszek: superplastyfikator PCE i domieszka napowietrzająca, a uzyskanie klasy wytrzymałości betonu C40/50 wymagało przyjęcia stosunkowo niskiego stosunku W/C, który doświadczalnie ustalono na poziomie 0,40. Przyjęcie stałych parametrów składu przy różnych rodzajach cementu, ale też i ich cechach wytrzymałościowych, spowodowało uzyskanie betonów o różniących się wartościach wytrzymałości na ściskanie. W przyjętej koncepcji badań uznano to za konieczność, aby możliwa była także ocena wpływu rodzaju cementu na pewne właściwości stwardniałego betonu.

Wybrane do badań betony charakteryzowały się spełnieniem normowych kryteriów zawartości powietrza [5], zarówno po wymieszaniu składników – dokładnie po 10 min od zakończenia mieszania, jak również po czasie 60 min. Dla mieszanek wykonano badania konsystencji, w tym jej zachowania po 60 minutach od zakończenia mieszania oraz oznaczono parametry „napowietżenia” – parametr rozkładu porów oraz udziału porów wielkości < 300 μm. Dla oceny stanu napowietżenia mieszanki betonowej – zawartości mikroporów oraz ich rozstawu, użyto urządzenia AVA (Air Void Analyzer). Wyniki pomiarów w tym zakresie przedstawia tablica 3. Napowietrzony stwardniały beton powinien wykazywać spełnienie kryterium 0,200 mm w zakresie parametru SF (spacing factor) oraz zawartość mikroporów wielkości < 300 μm na poziomie min. 1,5%, w świetle kryteriów stawianych przez normę PN-EN 480-11 [6]. Choć wykorzystana metoda pomiaru wielkości i rozkładu porów powietrznych nie odpowiada metodzie, dla której ustanowiono kry-

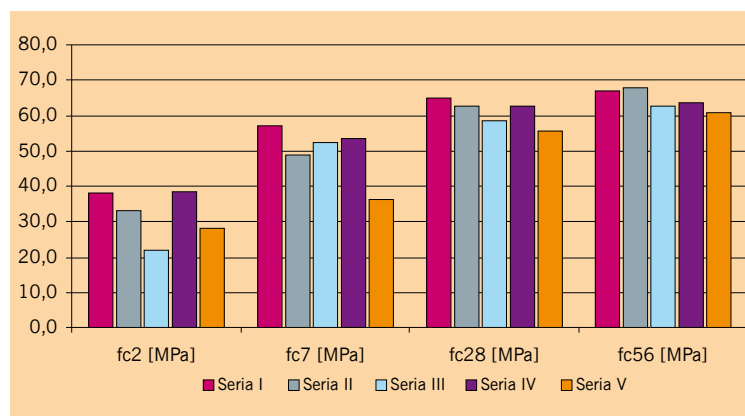
teria oceny betonu właściwie napowietrzonego, to daje się zauważyć, że jedynie w przypadku betonu serii V uzyskano gorsze napowietrzenie. Mieszanka ta, z uwagi na obecność pęcherzyków o „większej” średnicy, wykazuje także najmniejszą stabilność w zawartości powietrza oraz mniejszą stałość konsystencji niż mieszanki z pozostałych serii. Podobny brak zachowania stałości konsystencji wykazuje mieszanka wykonana na bazie cementu CEM I, choć wielkość porów i ich rozkład gwarantuje w tym przypadku zachowanie stałego poziomu zawartości powietrza w mieszance betonowej.

Podstawowe właściwości wykorzystanych cementów przedstawiono w tablicy 4.

Stwardniałe betony zostały poddane serii oznaczeń wynikających z oczekiwanych właściwości oraz oznaczeń mających na celu scharakteryzowanie ich dodatkowych cech. Wyniki oceny szybkości narastania wytrzymałości na ściskanie w czasie przedstawiono w formie graficznej na rysunku 3. Rysunek wyraźnie pokazuje różnice w szybkości narastania cech wytrzymałościowych betonów w początkowym okresie twardnienia, wynikające z rodzaju zastosowanego cementu. Mając na uwadze konieczność prowadzenia prac metodą ślizgową przy przyjętym wskaźniku W/C, uzyskano w ten sposób pole dla możliwości uzyskiwania pożądanych wytrzymałości w początkowym okresie dojrzewania. Rysunek pokazuje, że wymaganie osiągnięcia przez beton projektowanej wstępnie klasy wytrzymałości C40/50 będzie spełnione praktycznie w każdym badanym przypadku, zatem z każdym z użytych rodzajów cementu.

W tablicy 5 przedstawiono wyniki badań o charakterze trwałościowym, związanym z możliwością pracy betonu w trudnych warunkach eksploatacji, uwzględniających podwyższoną wilgotność powietrza oraz właściwości magazynowanego su-

Rys. 3. Wytrzymałości na ściskanie betonów (wartości podane na rysunku w MPa) po 2, 7, 28 i 56 dniach dojrzewania



Tab. 5. Odporność betonów na cykliczne zamrażanie i rozmrażanie

Oznaczenie	Parametry odporności na zamrażanie i rozmrażanie po 250 cyklach w zakresie temp. -18°C / +18°C	
	Ubytek masy, %	Spadek wytrzymałości na ściskanie, %
Seria I	0,08	2,3
Seria II	0,10	4,0
Seria III	0,23	2,8
Seria IV	0,17	6,3
Seria V	0,24	12,5

rowka – LNG. Stąd wyniki badań zestawione w tabeli obejmują ocenę mrozoodporności wykonanej tzw. metodą klasyczną, czyli cyklicznego zamrażania i rozmrażania nasyconych wodą próbek betonowych w zakresie temp. -18°C/+ 18°C. Każdy z betonów poddano 250 cyklom zamrażania i rozmrażania, po zakończeniu których próbki oceniono pod kątem ubytku masy oraz zmiany wytrzymałości na ściskanie w stosunku do próbek odniesienia, którymi były próbki przechowywane w wodzie przez cały czas prowadzenia badań cyklicznego zamrażania i rozmrażania. Ze względu na użycie cementów z dodatkami mineralnymi, odstępstwem od procedury normowej [7] było poddanie ocenie próbek betonowych nie po 28 dniach, lecz po 56 dniach dojrzewania. Wyniki badań wskazują, że niezależnie od rodzaju użytego cementu, wszystkie betony wykazują zachowanie mrozoodporności i to na bardzo dobrym poziomie. Gorszy efekt napowietrzenia mieszanki oznaczonej jako beton serii V wskazuje na nieco gorszą trwałość, lecz wynik ten dla mrozoodporności zwykłej należy traktować jako pozytywny.

Wyniki badań w zakresie oceny wpływu na wytrzymałość betonu jednokrotnego zamrożenia w tempe-



Źródło: Archiwum Camer Polska

raturze wrzenia ciekłego azotu, tj. -196°C, przedstawiono w tablicy 6. Próbkę do badań miały formę walców o średnicy i wysokości około 80 mm, powstałych przez wycięcie wiertnicą z próbek betonowych w postaci belek. Stan wilgotnościowy próbek w momencie zamrażania można ocenić jako powierzchniowo-suchy – po 24-godzinym nasyceniu wodą próbki przechowywano nad powierzchnią wody przez 14 dni. Po zamrożeniu i rozmrożeniu próbki przechowywano nad wodą jeszcze przez 7 dni, zanim przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie. Prezentowane w tablicy wyniki oznaczeń obok wytrzymałości na ściskanie poszczególnych próbek obejmują także wyrażony w procentach spadek wytrzymałości na ściskanie w stosunku do próbki świadka. Żaden z przygotowanych betonów nie wykazuje na tyle istotnego spadku wytrzymałości, że można by wynik oznaczenia uznać za negatywny. Oznacza to, że niska wartość stosunku W/C, towarzyszący temu wysoki poziom cech wytrzymałościowych, jak również odpowiedni stopień napowietrzenia są głównymi czynnikami zapewniającymi odporność na zamrożenie w tak skrajnych warunkach temperaturowych. Rodzaj użytego cementu lub też zawartość w cemencie żużla wielkopieczowego wydaje się być nieistotny z punktu widzenia tej cechy.

Narażenie każdego ciała stałego na zmiany temperatury powoduje zmianę jego wymiarów. Na wielkość współczynnika rozszerzalności cieplnej w betonach składa się rodzaj zastosowanego kruszywa, jak również rodzaj produktów hydratacji występujących w przestrzeniach międzyziarnowych. Wielkość współczynnika rozszerzalności cieplnej ma wpływ na wielkość naprężeń związanych ze zmianą temperatury, dlatego też dla elementów o dużych wymiarach korzystnie jest, gdy wartość współczynnika rozszerzalności cieplnej nie jest zbyt duża. Oznaczenia współczynnika rozszerzalności cieplnej w zakresie temp. +70°C/-30°C przeprowadzono na próbkach suszonych przez 7 dni w temperaturze +70°C, tak, aby uniknąć wpływu nadmiernej zawartości wilgoci podczas zamrożenia do temperatury -30°C. Uzyskane wyniki badań przedstawiono w tablicy 7, jako średnie wartości oznaczeń. Uzyskane wyniki wskazują na korzystny efekt wykorzystania cementów rodzaju CEM III, choć poza przypadkiem betonu serii II – zawierającego dodatek popiołu lotnego, wyniki nie wykazują istotnie dużych różnic. W tablicy 7 zaprezentowano również wyniki oznaczeń dynamicznego modułu sprężystości betonów pozostających w stanie wilgotnym, ocenionego przy pewnych statycznych założeniach. Zwraca uwagę fakt, że wielkość tego parametru jest niższa w przypadku zastosowania cementów rodzaju CEM III i rośnie z udziałem

Tab. 6. Wyniki badań w zakresie oceny wpływu jednokrotnego zamrożenia betonów do temp. -196°C na ich wytrzymałość na ściskanie

Oznaczenie	Wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek referencyjnych oraz ich wartość średnia, $f_{SR}$ , MPa	Wyniki wytrzymałości na ściskanie próbek poddanych zamrożeniu w temperaturze -196°C przez 1h oraz ich wartość średnia, $f_{s-19}$ , MPa	Spadek wytrzymałości na ściskanie próbek zamrożonych w stosunku do wytrzymałości próbek referencyjnych, $\frac{f_{sR} - f_{s-196}}{f_{sR}} \cdot 100$ , %
Seria I	81,2 89,0 88,7	77,9 84,7 83,2	5,1
	86,3 ± 5,1	81,9 ± 4,1	
Seria II	70,1 72,3 70,9	67,8 66,9 65,3	6,2
	71,1 ± 1,4	66,7 ± 1,6	
Seria III	71,4 72,7 73,4	71,4 72,2 75,1	-0,6 (wzrost wytrzymałości)
	72,5 ± 1,3	72,9 ± 2,3	
Seria IV	57,6 58,1 58,0	60,0 52,3 57,6	2,2
	57,9 ± 0,6	56,6 ± 4,6	
Seria V	71,5 68,4 67,1	67,8 61,3 65,7	5,9
	69,0 ± 2,7	64,9 ± 3,9	



foto: Archiwum CEMEX Polska

klinkieru cementowego w masie spoiwa, a więc ze zmniejszeniem ilości żużla.

Prezentowane powyżej wyniki badań, jak również konieczność sprostania wymogom dla betonowania metodą ślizgową, były podstawą do wyboru rozwiązania recepturowego opartego na bazie cementu CEM III bez dodatku krzemionkowych popiołów lotnych. Dodatkowym czynnikiem przemawiającym za takim właśnie wyborem była znaczna grubość ścian zbiorników od 0,8 m do 1,2 m w miejscu pilastrów, a więc istniała konieczność zminimalizowania termicznego wpływu procesu hydratacji. Jednak wprowadzenie przez inwestora dodatkowej specyfikacji dla betonu (tab. 8), a szczególnie podniesienie pierwotnie postawionych wymagań w zakresie klasy wytrzymałości betonu: z C40/50 do C50/60, jak również postawienie dodatkowego wymogu – konieczności zastosowania cementu siarczanoodpornego, spowodowało konieczność przygotowania nowego składu receptury. Bazując na uzyskanym doświadczeniu, jak również po przeprowadzeniu szeregu dodatkowych badań laboratoryjnych, pożądane właściwości betonu, zgodne ze specyfiką producenta uzyskano przy zastosowaniu cementu CEM III/A 32.5 N LH/HSR/N zawierającego około 59% żużla. W porównaniu do sprawdzanych w projekcie badawczym rozwiązań, ze względu na klasę wytrzymałości wykorzystanego ostatecznie cementu oraz konieczność uzyskania wyższej klasy wytrzymałości betonu, obniżono stosunek W/C do poziomu 0,34, natomiast udział procentowy poszczególnych frakcji i rodzaj kruszyw pozostał taki sam jak w badaniach pilotażowych. W celu uzyskania wymagań w zakresie konsystencji, zawartości powietrza oraz oczekiwanej wytrzymałości po 10 h zastosowano układ domieszek: PCE – jako silną domieszkę upłynniającą, domieszkę na bazie lignosulfonianów do regulacji czasu wiązania oraz domieszkę napowietrzającą, sprawdzając wcześniej ich współdziałanie dla uzyskania oczekiwanych właściwości mieszanki i betonu.

Tab. 7. Wyniki badań betonów w zakresie współczynnika rozszerzalności cieplnej oraz dynamicznego modułu sprężystości

Oznaczenie	Badane właściwości	
	Współczynnik rozszerzalności cieplnej betonu, $\alpha$ , 1/K	Dynamiczny moduł sprężystości, E, GPa
Seria I	$0,94 \pm 0,07 \times 10^{-5}$	$39,3 \pm 0,6$
Seria II	$1,27 \pm 0,04 \times 10^{-5}$	$41,5 \pm 0,3$
Seria III	$0,96 \pm 0,03 \times 10^{-5}$	$39,5 \pm 0,8$
Seria IV	$1,03 \pm 0,10 \times 10^{-5}$	$50,5 \pm 1,0$
Seria V	$1,10 \pm 0,04 \times 10^{-5}$	$44,6 \pm 0,4$

Tab. 8. Ostatecznie wskazane wymagania właściwości betonu przeznaczonego do budowy zbiorników

Rodzaj cechy	Wymagania
Klasa wytrzymałości	C50/60
Klasa ekspozycji	XF 2
Klasa zawartości chlorków	Cl 0,1
Klasa konsystencji	F4 / F5
Czas zachowania urabialności	2 h (rozplyw minimum 40 cm)
Napowietrzenie	min. 4%
Wytrzymałość po 10h	0,8-1,0 MPa
Zawartość siarczanów w mieszance betonowej	nie więcej niż 4% SO <sub>3</sub> w stosunku do masy cementu
Wymagania dodatkowe:	konieczność użycia cementu odpornego na siarczany

Efektem końcowym całego projektu badawczego oraz dodatkowo wykonanych badań, koniecznych do implementacji rozwiązania pierwotnego w wyniku zmienionych kryteriów początkowych, było wykonanie metodą ciągłego betonowania ścian dwóch zbiorników na ciekły gaz o wysokości 40 m i średnicy 80 m, które zostały przeprowadzone w październiku i listopadzie 2011 roku. Majestatycznie wznoszące się na świnoujskim wybrzeżu Bałtyku „betonowe cylindry” są świadectwem wykorzystania w praktyce innowacyjnego podejścia i potencjału badawczego producenta betonu (CEMEX), dostawcy domieszek (BASF Polska) i ośrodka naukowego (AGH).

**mgr inż. Piotr Górak – CEMEX**  
**dr inż. Artur Łagosz – AGH**

#### Literatura

1. Materiały informacyjne Polskie LNG SA
2. Materiały informacyjne GAZ-SYSTEM SA
3. BS EN 14620-3:2006 - Design and manufacture of site built, vertical, cylindrical, flat-bottomed steel tanks for the storage of refrigerated, liquefied gases with operating temperatures between 0 °C and p165 °C – Part 3: Concrete components
4. A.M. Neville, Właściwości betonu
5. PN-EN 206-1 2003 „Beton – Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność”
6. PN-EN 480-11 „Domieszki do betonu, zaprawy i zaprawy – Metody badań – Część 11: Oznaczanie charakterystyki porów powietrznych w stwardniałym betonie”
7. PN-88/B-06250 „Beton zwykły”



foto: Archiwum BASF