

dr inż. Tomasz Piotrowski*

Betony nowej generacji do budowy elektrowni jądrowej w Polsce

Głównym celem Programu Polskiej Energetyki Jądrowej (PPEJ) z 16.12.2010 r., skierowanego pod obrady Komitetu Stałego Rady Ministrów, jest wdrożenie w Polsce energetyki jądrowej, co przyczyni się do zapewnienia dostaw odpowiedniej ilości energii elektrycznej po rozsądnych cenach przy równoczesnym zachowaniu wymagań ochrony środowiska. Rzeczywistą realizacją celu głównego i pierwszego etapu harmonogramu jest m.in. uchwalenie dwóch ustaw, które weszły w życie 1 lipca 2011 r.:

- Ustawy z 13 maja 2011 r. o zmianie ustawy – Prawo atomowe oraz niektórych innych ustaw (Dz.U. 2011 nr 132 poz. 766);
- Ustawy z 29 czerwca 2011 r. o przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie obiektów energetyki jądrowej oraz inwestycji towarzyszących (Dz.U. 2011 nr 135 poz. 789).

Kolejne etapy przedstawione w PPEJ harmonogramu to:

- **etap II** – 1.07.2011 – 31.12.2013: ustalenie lokalizacji i zawarcie kontraktu na budowę pierwszej elektrowni jądrowej;
- **etap III** – 1.01.2014 – 31.12.2015: wykonanie projektu technicznego i uzyskanie wymaganych prawem uzgodnień;
- **etap IV** – 1.01.2016 – 31.12.2020: pozwolenie na budowę i budowa pierwszego bloku pierwszej elektrowni jądrowej, rozpoczęcie budowy kolejnych bloków/elektrowni jądrowych;
- **etap V** – 1.01.2021 – 31.12.2030: konsytuacja i rozpoczęcie budowy kolejnych bloków/elektrowni jądrowych.

W proponowanym przez inwestora harmonogramie budowy pierwszej elektrowni jądrowej dostawy betonu przewidywane są w 2016 r. Przed tym terminem należy jednak wiedzieć, jaki beton należy zastosować. Powinno to być szczegółowo określone w projekcie technicznym, który będzie przygotowywany już od 1.01.2014 r. Harmonogram PPEJ jest ambitny. Zakłada, że wybór partnera i technologii nastąpi w ciągu 2,5 roku, przygotowanie budowy w ciągu kolejnych 2,5 roku oraz budowa (do oddania do komercyjnej eksploatacji) w okresie 4,5 roku, co daje łącznie 9,5 roku od wdrożenia przepisów prawa.

Z punktu widzenia budownictwa istotne jest, aby powstający obiekt energetyki jądrowej był przede wszystkim bezpieczny, ale także by jego budowa przebiegła sprawnie, bez opóźnień. Oczywiście sercem elektrowni jądrowej jest reaktor, ale to serce powinno się znaleźć w zdrowym i bezpiecznym ciele – betonowym budynku reaktora. O tym jak istotny jest beton w budowie elektrowni jądrowej, przekonano się m.in. w Finlandii, gdzie kontrakt Olkiluoto 3 o wartości 3 mld € został podpisany z konsorcjum Areva-Siemens w 2003 r., a budowa trwa od 2005 r. Obecnie przewidywany termin rozruchu to 2015 r., wobec wstępnie planowanego uruchomienia w 2009 r. Cała budowa będzie zatem trwać co najmniej 10 lat (wobec planowanych 4 lat), co spowodowało niemal trzykrotne przekroczenie jej kosztów (z 3 mld € na 8,5 mld €). Pierwsze problemy z betonem pojawiły się już na etapie wykonywania płyty fundamentowej. Ruuska i in. [1] w 2009 r., na podstawie STUK Investigation Report 1/06 [2], przeanalizowali przyczyny i sformułowali wnioski, iż powodem znacznego opóźnienia

w realizacji projektu, konieczności opracowania dużych przeróbek był nieprawidłowy schemat dostaw betonu, co przyczyniło się do powstania napięcia pomiędzy firmami uczestniczącymi i pociągnęło za sobą poważne straty finansowe. Podobną konkluzję formułują inni autorzy analizujący ten projekt [3-4].

Beton w elektrowni jądrowej

Projekt budowy pierwszych elektrowni jądrowych będzie wyjątkowy, zarówno ze względu na pionierski charakter realizacji takiej inwestycji w Polsce, jak i konieczność przygotowania całego otoczenia budowy, eksploatacji oraz późniejszej likwidacji obiektów jądrowych. Strategiczne znaczenie inwestycji sprawiło, że na organizatora inwestycji pierwszych elektrowni jądrowych wyznaczono Polską Grupę Energetyczną S.A. (PGE), jako spółkę z bezpośrednim lub pośrednim większościowym udziałem Skarbu Państwa. Rozważana technologia to reaktory jądrowe generacji III/III+, których instalacje spełniają wymagania określone w europejskich European Utilities Requirements (EUR) [5] oraz amerykańskim Utility Requirements Document (URD) [6]. Reaktory III generacji charakteryzują się aktywnymi systemami bezpieczeństwa.

Dotychczas opublikowano osiem ocen EUR projektów generacji III/III+, wśród których są EPR (Evolutionary Power Reactor), ABWR (Advanced Boiling Water Reactor) oraz AP600/1000. Całkowita objętość betonu (tabela 1) wbudowana w EPR (1600 MWe) i ABWR (1380 MWe) to ok. 200 tys m³ [7]. Projekt AP600/1000 zapewnia zmniejszenie zużycia betonu o ponad 50% (tabela 2) do wartości poniżej 100 tys. m³ [8]. Choć są to nadal duże ilości, to jednak porównując obiektywny współczynnik wykorzystania betonu w całym cyklu eksploatacji elektrowni jądrowej, z uważaną powszechnie za bardzo ekonomiczną i ekologiczną farmą wiatrową, można jednoznacznie stwierdzić, że efektywność wykorzystania materiałowego, a więc jeden z głównych celów zrównoważonego rozwoju, jest 6,5 razy bardziej korzystna w przypadku elektrowni jądrowej. W przypadku, gdy weźmiemy pod uwagę również czas eksploatacji, to technologia jądrowa jest prawie 20 razy bardziej zrównoważonym sposobem pozyskiwania energii niż turbiny wiatrowe (tabela 3).

Betony nowej generacji

Od lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku obserwujemy stały postęp w technologii betonu, który w ostatnich latach znacznie przyspieszył m.in. dzięki zastosowaniu polimerów. Wzrost ten prezentuje krzywa życia betonu (rysunek) wielokrotnie przedstawiana przez prof. L. Czarnieckiego [9].

Betonami nowej generacji nazywane są przede wszystkim betony wysokowartościowe BWW, tj. betony cementowe o niskim wskaźniku wodno-cementowym ($w/c = 0,25 \div 0,35$) na kruszywach naturalnych z odpowiednimi dodatkami i domieszkami. Najczęściej stosowanym dodatkiem jest mikrokrzemionka, a domieszkami superplastyfikatorami. Mikrokrzemionka umożliwia uzyskanie wysokiej wytrzymałości i dużej trwałości betonu, natomiast superplastyfikator zapewnia wymaganą urabialność mieszanki przy niskim

* Politechnika Warszawska

Tabela 1. Objętość betonu wbudowanego przy budowie elektrowni jądrowych EPR i ABWR

Opis	EPR (1600 MWe)	ABWR (1380 MWe)
Cała elektrownia jądrowa	204497	191294
Część nuklearna (12+15+16+17+1/2•18+2)	118531	101722
Część nienuklearna (pozostałe)	46666	89572
Budynki i obiekty towarzyszące	183961	173402
Wzmocnienie podłoża	3649	3055
Budynek reaktora	91900	67540
Budynek turbin	9759	61149
Intake and discharge	8095	4630
Obiekty pomocnicze	24500	22070
Budynek przechowywania odpadów	12600	0
Budynek magazynowania paliwa	23000	8800
Inne budynki	10458	6158
Część reaktorowa	602	233
Wyposażenie reaktora	83	124
Główny system wymiany ciepła	449	49
System transportu paliwa	8	13
Inne wyposażenie reaktora	62	47
Część turbinowa	18880	16725
Turbiny i generatory prądu	7057	6251
System odprowadzania ciepła	9367	8297
System skraplania	785	696
Feed system grzewczy	67	60
Inne urządzenia	1604	1421
Wyposażenie części elektrycznej	774	686
Stacje obsługi sprzętu	79	70
Konstrukcje i obudowy	695	616
Różny sprzęt	280	248
Systemy wentylacyjne i wodociągowe	280	248

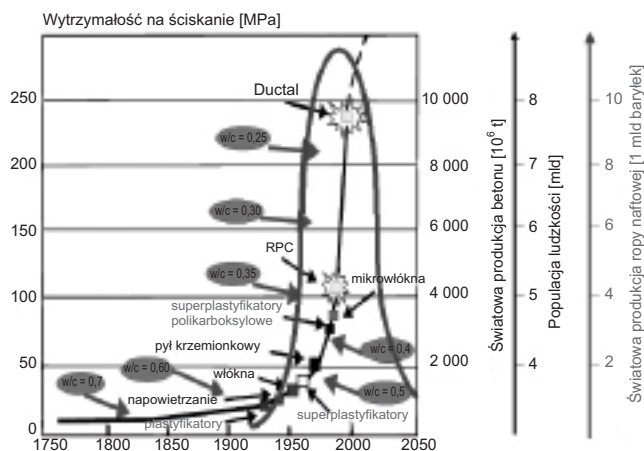
Tabela 2. Redukcja objętości betonu wbudowanego w elektrowni jądrowej AP600 wobec ABWR

	ABWR (1300 MWe)		AP600	
	Beton (2,2 t/m ³)	400 000 t	684 t/GWh	175 000 t
	181 818 m ³	311 m ³ /GWh	79 545 m ³	286 m ³ /GWh

Tabela 3. Porównanie efektywności wykorzystania materiałowego elektrowni jądrowej i turbiny wiatrowej

Parametry	Elektrownia jądrowa Areva EPR 1600	Turbina wiatrowa Vestas V80 (farma wiatrowa „Zagórze)
Liczba godzin w roku [h]	8760	8760
Średni stopień wykorzystania mocy [%]	90	25*)
Moc nominalna [MWe]	1600	2
Moc efektywna [MWe]	1408	0,5
Liczba elektrowni o porównywalnej mocy efektywnej [szt.]	1	2816
Ilość betonu/elektrownię [m ³]	200 000	450
Ilość betonu do uzyskania 1408 MWe [m ³]	200 000	1 267 200
Czas eksploatacji [lata]	60	20
Ilość betonu/r. [m ³ /r. eksploatacji]	3 333	63 360

* W przypadku terenów, gdzie średnioroczna prędkość wiatru wynosi od 4 m/s do 6 m/s, czyli terenów Polski, stopień wykorzystania mocy mieści się w granicach od 7% do ok. 25% (przyjęto poziom maksymalny)



Uogólniona krzywa życia betonu na tle piku naftowego [9]

współczynnika wodno-cementowym. Jedną z najważniejszych zalet betonu wysokowartościowego jest jego trwałość. Zdaniem prof. A. Neville’a do zapewniania właściwej trwałości konstrukcji betonowych niezbędne jest stosowanie odpowiednich składników betonu oraz bardzo dobre jego wykonanie, począwszy od dozowania, przez mieszanie, transport, wylewanie, zagęszczanie, wykończenie do pielęgnacji. W związku z tym, że trwałość betonu stosowanego w elektrowniach jądrowych powinna wynosić co najmniej 80 lat (tylko wynosi czas życia zbiornika reaktora w obecnie budowanych reaktorach generacji III+), beton konstrukcyjny stosowany przy jego budowie powinien być szczególnie trwały, wobec normowego okresu 50 lat użytkowania wg PN-EN 206-1. Beton taki należy zatem określać betonem wysokowartościowym, chociażby z uwagi na jego zwiększoną trwałość. Wymagania dotyczące betonu do elektrowni jądrowej zawarte są np. w ETC-C (EPR Technical Code For Civil Works) [10] i znacznie wykraczają ponad standardowe wymagania opisane w PN-EN 206-1. Szczegóły opisano w artykule „Wymagania dotyczące betonu w elektrowni jądrowej typu EPR wg ETC-C a normalizacja w Polsce” [11].

Współczesne betony nowej generacji to jednak nie tylko BWW, ale także betony będące obiektem badań wielu naukowców w Polsce i na świecie, określane mianem betonów specjalnych, w tym:

- beton samozagęszczalny (SCC) – stosowany tam, gdzie niemożliwe jest zastosowanie tradycyjnych metod zagęszczania mieszanki betonowej [12];
- beton zbrojony włóknami – przede wszystkim beton odporny na uderzenie;
- beton osłonowy, stosowany w konstrukcjach wymagających osłony przed promieniowaniem jonizującym [13-15];
- beton natryskowy wykorzystywany tam, gdzie tradycyjna metoda formowania elementów jest niemożliwa, ale również jako beton zabezpieczający przed agresywnym działaniem środowiska, np. w chłodni kominowej;
- beton żaroodporny, stosowany w miejscach, gdzie występuje podwyższona lub ekstremalnie wysoka temperatura;
- beton podwodny, np. na konstrukcje podwodne poboru wody chłodzącej;
- beton posadzkowy [16];
- beton do konstrukcji masywnych, np. fundamentów [17].

Na świecie trwają także prace nad zastosowaniem betonów BWW np. zawierających mikrokrzemionkę jako betonów specjalnych, np. osłonowych [18]. Wymagania dotyczące betonu opisane w PN-EN 206-1 tylko częściowo albo w ogóle nie odnoszą się

do wymienionych betonów. Należy podkreślić, że w Polsce stan normalizacji w tej tematyce jest raczej ubogi i ogranicza się do betonu samozagęszczalnego, zbrojonego włóknem oraz natryskowego:

- PN-EN 206-9:2010 *Beton – Część 9. Dodatkowe zasady dotyczące betonu samozagęszczalnego (SCC)*;
- PN-EN 1170-8:2009 *Metoda badania betonu zbrojonego włóknem szklanym – Część 8: Cykliczne badanie typu na starzenie w warunkach atmosferycznych*;
- PN-EN 1402-4:2005 *Nieformowane wyroby ogniotrwałe – Część 4: Oznaczanie konsystencji betonów*;
- PN-EN 14650:2005 *Prefabrykaty z betonu – Ogólne wymagania dla zakładowej kontroli produkcji betonu zbrojonego włóknem stalowym*;
- PN-EN 14651+A1:2007 *Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym – Pomiar wytrzymałości na rozciąganie przy zginaniu (granica proporcjonalności LOP)*;
- PN-EN 14721+A1:2007 *Metoda badania betonu zbrojonego włóknem stalowym – Pomiar zawartości zbrojenia w świeżym i stwardniałym betonie (oryg.)*;
- PN-EN 14845-1:2008 *Metody badania włókien w betonie – Część 1: Betony wzorcowe*;
- PN-EN 14845-2:2007 *Metody badania włókien w betonie – Część 2: Efekt oddziaływania na beton*;
- PN-EN 14488-1 do 7:2007-9 *Badania betonu natryskowego*;
- PN-EN 14889-1:2007 *Włókna do betonu – Część 1: Włókna stalowe – Definicje, wymagania i zgodność*;
- PN-EN 14889-2:2007 *Włókna do betonu – Część 2: Włókna polimerowe – Definicje, wymagania i zgodność*;
- PN-EN 15191:2010 *Prefabrykaty z betonu – Klasyfikacja właściwości użytkowych betonu z dodatkiem włókien szklanych*;
- PN-EN 15422:2008 *Prefabrykaty z betonu – Specyfikacja włókien szklanych do zbrojenia zapraw i betonów*.

Należy się spodziewać, że podczas budowy i eksploatacji współczesnej elektrowni jądrowej będzie zastosowanych wiele rodzajów betonów specjalnych. Wymagania zawarte we francuskim ETC-C [10], dotyczące tego typu betonów, ograniczają się jedynie do stwierdzenia, iż ich skład powinien zostać uzasadniony wynikami odpowiednich badań weryfikujących przydatność do danego zastosowania. Nie precyzuje się jednak tego, w jaki sposób poszczególne typy betonów powinny być weryfikowane. Wydaje się, że pozostawienie tego do decyzji inwestora i generalnego wykonawcy może spowodować, że jakość elementów wykonanych z betonu specjalnego będzie wątpliwa. Rozwiązanie problemu może przynieść dokładna specyfikacja betonów wraz z rodzajem badań i wymaganych wyników poszczególnych testów lub nadzór naukowy/jakościowy nad zaprojektowaniem i wykonaniem tego typu betonu prowadzony przez zewnętrznego ośrodek badawczy/naukowy zajmujący się daną tematyką i mający odpowiednie doświadczenie.

Przykład zastosowania betonów nowej generacji w elektrowni jądrowej

Jednym z najbardziej spektakularnych przykładów zastosowania betonu nowej generacji w elektrowni jądrowej jest naprawa podstawy chłodni kominowej w elektrowni Cattenom NPP Lorraine we Francji. W połowie lat dziewięćdziesiątych XX wieku operator – EDF musiał się zmierzyć z zwiększeniem wydajności tej chłodni. Poszukując rozwiązania trwałego (tj. odpornego na agresywne środowisko, w tym szczególnie na korozję mrozową), a jednocześnie takiego, które nie powodowałoby znacznego zwiększenia obciążenia istniejących fundamentów, postanowiono skorzy-

stać z elementów prefabrykowanych z betonu Ductal® wykonanego przez firmę Lafarge. W 1999 r. wykonano 2 600 belek i płyt podtrzymujących nową antresolę w istniejącej chłodni kominowej, co w znacznym stopniu zwiększyło efektywną jej powierzchnię. Badania przeprowadzone w 2008 r., tj. po dziesięciu latach eksploatacji i narażenia na strumień wody o temperaturze 35°C również w warunkach zimowych, wykazały, że Ductal® nie uległ degradacji, a jego właściwości mechaniczne są zbliżone do wyjściowych w momencie wbudowania.

Podsumowanie

Betony nowej generacji to obecnie podstawowy materiał konstrukcyjny elektrowni jądrowej. Aby zapewnić odpowiednią jakość elementów wykonanych z tego rodzaju betonu w Polsce potrzebne są szczegółowe wytyczne, na wzór francuski ETC-C [10], dotyczące produkcji, wbudowania, pielęgnacji i eksploatacji betonu lub specjalistyczny nadzór ze strony ośrodków badawczych/naukowych, które mają odpowiednie doświadczenie.

Artykuł powstał w ramach strategicznego programu badawczego Narodowego Centrum Badań i Rozwoju pt. „Technologie wspomagające rozwój bezpiecznej energetyki jądrowej”, zadanie badawcze „Analiza możliwości i kryteriów udziału polskiego przemysłu w rozwoju energetyki jądrowej”. SP/J/5/143682/11

Literatura

- [1] Ruuska I., Arto A., Aaltonen K., Lehtonen P., Dimensions of distance in a project network: Exploring Olkiluoto 3 nuclear power plant project, *International Journal of Project Management* 27 (2009) 142 – 153.
- [2] STUK Nuclear Reactor Regulation: Management Of Safety Requirements In Subcontracting During The Olkiluoto 3 Nuclear Power Plant Construction Phase, Investigation Report 1/06 1 Translation 1.9.2006.
- [3] Hirsch H., Neumann W., Progress and Quality Assurance Regime at the EPR Construction at Olkiluoto, Safety Implications of Problems Encountered, Greenpeace Nordic, Hannover 2007.
- [4] Strupczewski A., Wpływ problemów materiałowych na bezpieczeństwo reaktorowe, badania materiałowe na potrzeby elektrowni i przemysłu energetycznego, XVII Seminarium Naukowo-Techniczne, Zakopane, 23 – 25.06.2010.
- [5] EUR – European Utility Requirements for LWR Nuclear Power Plants, AFCEN, 2010.
- [6] URD – Utility Requirements Document for Nuclear Plants, EPRI, 1999.
- [7] Peterson P. F., Zhao H., Petroski R., Metal And Concrete Inputs For Several Nuclear Power Plants, Report UCBTH-05-001.
- [8] Dones R., Gantner U., Hirschberg S., Doka G., Knoepfel I., Environmental Inventories for Future Electricity Supply Systems for Switzerland, PSI Report No 96 – 07.
- [9] Czarniecki L., *Betony polimerowe, Cement Wapno Beton*, 2, 2012, 63 – 85.
- [10] ETC-C EPR Technical Code for Civil Works, Design and construction rules for nuclear power generating stations, AFCEN 2010, s. 405.
- [11] Piotrowski T., Wymagania dotyczące betonu w elektrowni jądrowej typu EPR wg ETC-C a normalizacja w Polsce, *Materiały Budowlane* nr 5, 2013, str. 35 – 38.
- [12] Szmigiera E., Woyciechowski P., Verbund zwischen Stahl und Selbstverdichtendem Beton in Verbundstützen, *Stahlbau*, August 2012, 8(810), 616 – 620.
- [13] Brandt A.M., Beton jako materiał osłon w budownictwie związanym z energią jądrową, *Dni Betonu* 2012, Wisła, 8-10 października 2012, 256 – 277.
- [14] Piotrowski T., et al., Monte Carlo simulations for optimization of neutron shielding concrete. *Central European Journal of Engineering*, 2 (2) 2012, 296 – 303.
- [15] Tefelski D.B., Piotrowski T., Bildeanu V., Polanski A., Skubalski J., Monte-Carlo aided design of neutron shielding concretes, *Bulletin Of The Polish Academy Of Sciences, Technical Sciences*, 61 (1) 2013, 161 – 171.
- [16] Woyciechowski P., Adamczewski G., Przyczyny pylenia posadzki przemysłowej, *Materiały Budowlane* nr 2/2012, str. 25 – 27.
- [17] Jackiewicz-Rek W., *Betony wysokopopiołowe, Materiały Budowlane*, 10, 2010, str. 18 – 20.
- [18] El-Khayatt A.M., Radiation shielding of concretes containing different lime/silica ratios. *Annals of Nuclear Energy*, 37 (7) 2010, 991 – 995.