

ie g o l o n o h n o t e c h n o l o g i e

Beton napowietrzony

Beton profesjonalnie napowietrzony znany jest na świecie od połowy lat 50 XX wieku, wtedy to pojawiły się pierwsze domieszki napowietrzające. Ideą wprowadzenia tego typu domieszek do produkcji betonu towarowego była chęć poprawy parametru mrozoodporności betonu. Jak wiadomo, zamarzająca woda zwiększa swoją objętość w betonie o ok. 9%, dodanie domieszki napowietrzającej spowodowało, że wytwarza się pewna ilość mikroporów, które przerywają ciągłość kapilarną betonu, następstwem czego jest zwiększenie mrozoodporności.

1. Powietrze w betonie

Zasadniczo powietrze zawarte w świeżej mieszance betonowej możemy podzielić na przypadkowe schwyte i wprowadzone w sposób celowy. Powietrze przypadkowe to pęcherzyki o średnicach powyżej 1 mm, słabo zdyspergowane i najczęściej związane z charakterystyką użytych kruszyw. Powietrze wprowadzone w sposób celowy poprzez użycie domieszek napowietrzających, charakteryzuje się bardzo dobrą dyspersją w strukturze mieszanki betonowej porów, których średnica zawiera się w przedziale 10-100 μm . O tych dwóch parametrach decyduje w większości rodzaj użytej domieszki. W praktyce są to substancje powierzchniowe, które dodane do betonu w czasie mieszania stabilizują wprowadzone w ten sposób powietrze tworząc stabilne i równomiernie rozmieszczone pęcherzyki.

Napowietrzenie, czyli celowe wprowadzenie powietrza do betonu, przeciwdziała dwóm mechanizmom niszczącym beton podczas jego zamrażania. Po pierwsze, przerywając pory kapilarne zmniejsza podciąganie kapilarne, po drugie, stwarza miejsce dla zwiększającej swoją objętość zamarzającej wody. Powtarzające się cykle zamrażania i odmrażania dają efekt kumulacyjny, który przyczynia się do utraty trwałości betonu.

2. Wymogi betonów napowietrzonych i metody pomiaru

W betonach napowietrzonych należy dążyć do zminimalizowania objętości porów kapilarnych, gdyż, jak wiadomo, to one w głównej mierze przyczyniają się do kumulowania wody, czego następstwem jest jej zamarzanie (wzrost objętości o ok., 9%), co powoduje, że zamarzająca woda prowadzi do destrukcji betonu. Wprowadzenie domieszki napowietrzającej ogranicza poprzez powstającą sieć mikroporów podciąganie kapilar-

ne, co w konsekwencji prowadzi do zwiększenia mrozoodporności.

Obecnie znana jest ciśnieniowa metoda pomiaru zawartości powietrza w świeżej mieszance betonowej pozwalająca na zbadanie całkowitej ilości powietrza w betonie. Jednak pomiar tą metodą nie jest odpowiedzią na interesujące nas pytanie: czy beton jest mrozoodporny?

Tak jak wcześniej wspomniano pomiaru zawartości powietrza w betonie na placu budowy można dokonywać metodą ciśnieniową. Oparta jest ona na zależności między objętością powietrza i oddziaływającym na mieszankę ciśnieniem. Metoda ta ma jedną zasadniczą wadę. Otrzymany wynik całkowitej objętości powietrza nie mówi nic o jego strukturze i w szczególnych przypadkach może być obarczony znacznym błędem. Nie mamy też możliwości odróżnienia ilości powietrza przypadkowo wprowadzonego do betonu od powietrza wprowadzonego w sposób celowy. Dokładne informacje o systemie pustek powietrznych w stwardniałym betonie (L_{300}, SF) można uzyskać na podstawie obserwacji pod mikroskopem specjalnie przygotowanych zgrądów stwardniałego betonu.

Chcąc mieć możliwość kontroli struktury powietrza w trakcie produkcji świeżej mieszanki betonowej możemy posłużyć się opracowanym w 1990 roku przez Dansk Beton Teknik urządzeniem o nazwie **Air-Void-Analyzer** (w późniejszym tekście występującym pod nazwą **AVA**).

Procedura badawcza przedstawia się następująco:

- Przygotowanie AVA
 - wypełnienie cylindra wodą destylowaną, wprowadzenie na spód płynu o wysokiej lepkości
- Pobranie 20 cm³ próbki zaprawy o kruszywie do 6 mm z mieszanki betonowej
 - poprzez użycie prostego sita zamontowanego na wiertarce udarowej oraz odpowiednio przygotowanej strzykawkii
- Wprowadzenie zaprawy do płynu o wysokiej lepkości i mieszanie przez 30 s.
- Stopniowe (zależne od średnicy) uwalnianie pęcherzyków powietrza i wyłapywanie ich na szklanym dekielku
 - pęcherzyki o większej średnicy uwalniane są szybciej
 - szklany dekiel jest zanurzony w wodzie – wraz ze wzrostem ilości znajdującego się pod nim powietrza rośnie jego wyporność – rejestrowana za pomocą wagi
- Rezultat – struktura powietrza
 - wyniki zależności wskazań wagi od czasu są następnie przetwarzane przez komputer według algorytmu opracowanego na podstawie wielu porównawczych prób laboratoryjnych i przemysłowych.

Badania porównawcze pomiędzy wskazaniami AVA oraz wynikami obserwacji mikroskopowych prowadzono w Niemczech przez VDZ (Verein Deutscher Zementwerke) a także w Stanach Zjednoczonych. W Niemczech zbadanych zostało 31 mieszanek



Fot. 1. Urządzenie AVA

Fot. Archiwum

Tablica 1.
Zalecane wielkości w „Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton, Ausgabe 1991”

	Zawartość pęcherzyków o średnicy <300 μm [L300]	Współczynnik rozstawu pęcherzyków [SF]
Badania laboratoryjne wstępne	>1,8	<0,20 mm
Beton po zagęszczeniu badanie kontrolne	>1,5	<0,24 mm

betonów napowietrzonych o różnym składzie kruszywa i różnych cementach. Wskazania AVA zawsze zawierały tzw. margines bezpieczeństwa, który w przypadku współczynnika rozstawu wynosi:

$$SF_{\text{Betonu stwardniałego}} = 0,714 \times SF_{\text{Betonu świeżego}}$$

Badania porównawcze względem normy ASTM C457 przedstawiają się następująco:

Zawartość powietrza: AVA < ASTM C457 (~2%)

Współczynnik rozstawu AVA ~ ASTM C457

Powierzchnia właściwa AVA > ASTM C457

Nie tylko ilość powietrza w betonie, ale także współczynnik rozstawu pęcherzyków (SF), tzn. maksymalna odległość od dowolnego punktu wewnątrz stwardniałego zaczynu cementowego do powierzchni zewnętrznej betonu, lub do położonej w pobliżu pustki powietrznej, jest odpowiedzialna za mrozoodporność betonu.

Następnymi ważnymi współczynnikami są zawartość pęcherzyków o średnicy <math><300 \mu\text{m}</math> (\text{mm}^{-1}. Powierzchnia właściwa pęcherzyków, które przypadkowo dostały się do betonu, wynosi max 12 mm^{-1} (w późniejszym tekście wielkości te występują pod nazwą „struktura powietrza”)

3. Czynniki wpływające na napowietrzenie

Struktura i ilość powietrza, które zostaną wprowadzone przez domieszki napowietrzające, jest zależna od szeregu czynników.

3.1 Intensywność mieszania

• Mieszalnik

Mieszalnik musi nie tylko zapewnić jednolitość rozprowadzenia domieszki napowietrzającej w betonie, ale musi także umożliwić usunięcie mieszanki z mieszalnika bez naruszenia jednolitości betonu. Zużycie łopatek zbieraka powinny być regularnie kontrolowane.

• Czas mieszania

W betonie napowietrzonym istnieje optymalny czas mieszania. Za krótki czas mieszania nie pozwala domieszce na wprowadzenie maksymalnej ilości powietrza przy wybranym dozowaniu. Za długi czas mieszania może prowadzić do redukcji ilości powietrza. W większości wypadków wystarcza 45-sekundowy czas mieszania od chwili wprowadzenia domieszki napowietrzającej.

Całkowita ilość powietrza zmienia się minimalnie, ale jego struktura ulega stopniowemu polepszeniu.

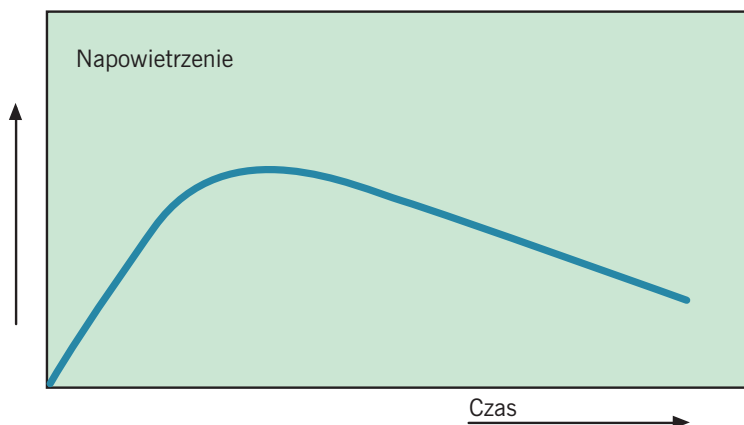
3.2 Konsystencja betonu

Aby nastąpiła odpowiednia aplikacja i działanie domieszki napowietrzającej, musi być zagwarantowana wystarczająca ilość wody w zarobie.

Tablica 2.

Struktura powietrza w zależności od czasu mieszania

Czas mieszania [s]	Metoda ciśnieniowa [%]	L_{300} [V-%]	AF [mm]
30	5,3	74	0,14
60	5,7	73	0,14
120	5,2	94	0,10



Konsekwencją za dużej ilości wody może być znaczna utrata powietrza.

Rys. 1. Zasadnicza zależność czasu mieszania do ilości napowietrzenia

3.3 Temperatura świeżego betonu

Pomiędzy temperaturą betonu a działaniem domieszek napowietrzających istnieje liniowa zależność. Ze wzrostem temperatury obniża się ilość uzyskanego powietrza, a więc ze wzrostem temperatury musi być zwiększone dozowanie domieszki.

3.4 Jakość domieszek napowietrzających

Rodzaj surowca i jego koncentracja nie zawsze może mówić o jakości danej domieszki. Znając strukturę wprowadzonego przez niego powietrza do betonu, można określić jego jakość i skuteczność.

3.5 Rodzaj cementu

Wpływ rodzaju cementu na strukturę systemu powietrza jest oczywisty. Pozytywne wyniki mrozoodporności i odporności na działanie środków odladzających uzyskuje się dla różnych rodzajów cementów powszechnego użytku pod warunkiem przeprowadzenia prawidłowego napowietrzenia.

3.6 Dodatki do betonu

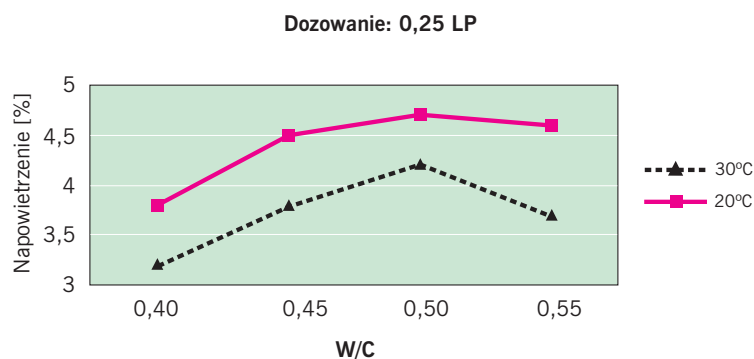
3.6.1 Popioły lotne

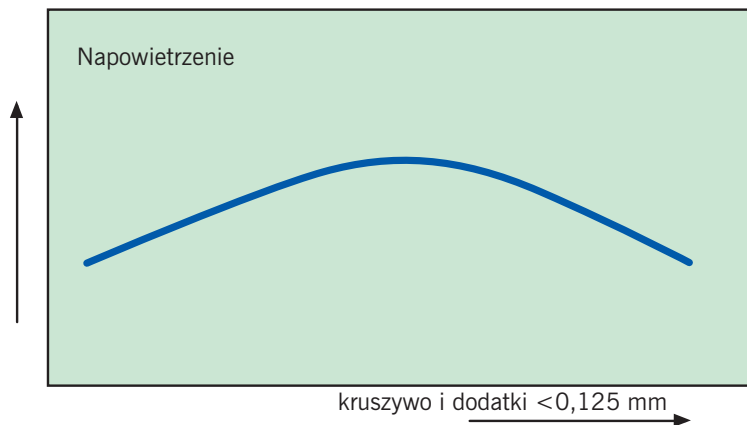
Wykorzystywanie popiołów lotnych w betonach napowietrzonych jest problematyczne. Poprzez adsorpcję banieczek powietrza na czynnej powierzchni cząstek węgla pogarsza się jego struktura.

3.6.2 Pył krzemionkowy

Kompatybilność pyłu krzemionkowego i domieszek napowietrzających sprawdzono z pozytywnym wynikiem. Jednak warto wspomnieć, że przy odpowiednio niskim stosunku w/c i udziale pyłu krzemionkowego, betony są na tyle szczelne, że bez

Rys. 2. Napowietrzenie w zależności od konsystencji i temperatury





Rys 3. Wpływ uziarnienia <math>< 0,125\text{ mm}</math> na napowietrzenie betonu

napowietrzania są odporne na działanie mrozu i środków odladzających.

3.6.3 Plastyfikatory i superplastyfikatory

Zastosowanie plastyfikatorów i superplastyfikatorów może negatywnie wpłynąć na strukturę powietrza. Ważne jest, aby znać ich kompatybilność z domieszką napowietrzającą. Używanie domieszek opóźniających hydratyzację cementu w betonach napowietrzonych jest niewskazane. Istnieje niebezpieczeństwo, że nieodpowiednia pielęgnacja betonu może doprowadzić do wysuszenia górnej jego warstwy i do utraty powietrza wprowadzonego podczas napowietrzenia.

3.7 Skład mieszanki

Receptury betonów napowietrzonych powinny posiadać odpowiednią ilość zaprawy drobnej (uziarnienie <math>< 0,125\text{ mm}</math> i woda zarobowa), by wprowadzić $40\text{--}60\text{ l/m}^3$ pęcherzyków powietrza. Zasadniczą zależność tego uziarnienia do napowietrzenia betonu pokazano na rys. 3.

Beton bez udziału domieszek napowietrzających zawiera około $10\text{--}20\text{ l/m}^3$ powietrza. Są jednak betony o zawartości powietrza powyżej 30 l/m^3. W tym wypadku po dozowaniu domieszek napowietrzających, powietrze własne mieszanki wchodzi do zawartości całkowitej powietrza w świeżym betonie. W zasadzie takie betony nie zawierają dobrej struktury pęcherzyków.

3.8 Dozowanie domieszek napowietrzających

Na ostateczną zawartość i strukturę powietrza wpływa również sposób wprowadzania domieszki napowietrzającej do zarobu. Zaleca się dozowanie domieszki napowietrzającej dopiero po wstępnym zmieszaniu pozostałych składników. W przypadku kombinacji z innymi domieszkami powinno zachować się następujące zasady:

- dodanie domieszek **opóźniających** wiązanie cementu (co nie jest zalecane) powinno **poprzedzać** dodanie domieszki napowietrzającej
- dodanie **plastyfikatorów** lub **superplastyfikatorów** powinno nastąpić **po dodaniu i wstępnym zamieszaniu** pozostałych składników z domieszką napowietrzającą.

3.9 Transport i zabudowa betonu

Czas od zamieszania	Metoda ciśnieniowa [%]	L_{300} [%]
5 minut	5,3	3,0
60 minut	4,0	2,8

Tablica 3. Wyniki badań zawartości powietrza w funkcji czasu od chwili zmieszania

Czas pomiędzy zamieszczeniem betonu a jego wbudowaniem powinien być jak najkrótszy. Z upływem czasu następuje utrata zawartości całkowitej powietrza w betonie. Jednak stabilna i odpowiednia struktura powietrza nie ulega nadmiernej utracie jakości w czasie.

W czasie, gdy całkowita zawartość powietrza ulega redukcji o 1,3%, zawartość pęcherzyków mikroskopowych (L_{300}) nie ulega nadmiernej eliminacji. Nadmierne i niejednorodne zagęszczanie betonu może doprowadzić do przewibrowania betonu i utraty mrozoodporności.

Pielęgnacja betonów napowietrzonych ma duży wpływ na mrozoodporność. Utrata wilgotności we wczesnym wieku betonu może doprowadzić do całkowitego zniszczenia systemu pęcherzyków w powierzchniowych warstwach betonu. Jest to niepożądane, gdyż ta właśnie strefa jest szczególnie podatna na zamrażanie i odmrażanie oraz na działanie środków odladzających.

4. Wady i zalety AVA

Zalety

1. Natychmiastowy wynik – natychmiastowa reakcja
 - a. Możliwość dokonywania korekt w procesie mieszania i transportu już w czasie produkcji betonu – uniknięcie kosztów napraw lub zabezpieczenia.
 - b. Każde badanie zajmuje około 25 minut, przy użyciu standardowych metod nie wcześniej niż po 2 tygodniach od chwili wbudowania.
2. Badania mogą być przeprowadzane w dowolnym miejscu. AVA jest urządzeniem przenośnym.
3. Oszczędność energii w procesie produkcji betonu poprzez skorelowanie optymalnej struktury powietrza z czasem mieszania.
4. Możliwość pobrania próbki z wbudowanego betonu (wpływ pompowania, wibrowania itp.)
 - a. Określa jakość betonu w wykonanym elemencie.

Wady

1. AVA jest czuły na wibracje, wymaga stabilnego stołu.
2. Mały rozmiar próbki
3. Struktura powietrza przeliczona jest na beton z zaprawy o ziarnach kruszywa nie przekraczających 6 mm.
4. Mały zakres temperatury wody, w jakiej może być wykonane badanie $23 \pm 2^\circ\text{C}$.

5. Podsumowanie

Beton napowietrzony stawia technologom najwyższe wymagania. Ilość czynników wpływających na napowietrzenie i ich wzajemny wpływ utrudniają uzyskanie stabilnych i jakościowo odpowiednich systemów pustek powietrznych.

Znajomość wpływu powyżej podanych czynników ułatwia projektowanie i wykonywanie betonów napowietrzonych. Poprzez wykorzystanie urządzenia AVA, które umożliwia określenie jakości napowietrzania w świeżym betonie, można, szczególnie podczas badań laboratoryjnych i wdrożeń, optymalizować skład i sposób wykonania betonów napowietrzonych.

inż. Konrad Grzesiak
mgr inż. Przemysław Gemel