

Dr inż. Waldemar Cyske  
Politechnika Gdańska

## WYKORZYSTANIE KRUSZYWA Z UBOCZNYCH PRODUKTÓW SPALANIA W BUDOWIE DRÓG

### 1. Uboczne Produkty Spalania (UPS)

W czasie produkcji energii w elektrowniach i elektrociepłowniach powstają takie produkty uboczne jak:

- Popioły lotne.
- Mieszanki popiołowo-żużlowe.
- Popioły denne.
- Żużle.

Najważniejszą cechą UPS jest ich uziarnienie. To ono decyduje o prawie wszystkich właściwościach fizycznych materiału. Jednak niebagatelną rolę odgrywają także: rodzaj spalnego paliwa i ewentualnych dodatków, typ pieca i temperatura spalania, sposób odpielania. To one będą decydowały o składzie chemicznym UPS, jego aktywności chemicznej a także strukturze materiału.

Wszystkie te materiały antropogeniczne są w Polsce i na świecie stosowane w budownictwie, a Polska jest jednym z przodujących krajów w ich wykorzystaniu w drogownictwie.

### 2. Uboczne Produkty Spalania: grunty czy kruszywo?

Gdy mamy na myśli łamany materiał skalny nikt nie ma wątpliwości, że jest to kruszywo. Gdy w podłożu gruntowym znajdziemy na żwir lub dobrze uziarnioną pospółkę wielu uzna to za grunt ale już gdy materiał ten zaczniemy eksploatować, zgromadzimy na hałdzie i zaczniemy wykorzystywać choćby do produkcji mieszanki betonowej to większość z nas skłoni się do opinii, że jest to jednak kruszywo. Podobnie będzie z piaskiem. Jednak gdy napotkamy materiał drobniejszy np. pyły znakomita większość z nas uzna to za grunt i dopiero po dłuższej chwili może się zastanowić, że przecież tak uziarniony materiał występujący w kruszywach jako zanieczyszczenie (choć naturalnie tam występujące) może być znakomitym składnikiem mieszanki mineralnej.

Gdzie więc leży ta magiczna granica oddzielająca materiał budowlany – kruszywo, od podłoża budowli – gruntu.

Zacznijmy od studiów literatury.

Grunt budowlany – część skorupy ziemskiej mogącej współdziałać z obiektem budowlanym, stanowiąca jego element lub służąca jako tworzywo do wykonywania z niego budowli ziemnych [1].

Norma PN-S-02205 [2] nie definiuje gruntu budowlanego, ale w tablicy 2 podaje jakie rodzaje gruntów mogą być stosowane do budowy nasypów komunikacyjnych. Z analizy tej tablicy wynika, że do budowy konstrukcji ziemnych mogą być użyte w zasadzie wszelkie materiały gruboziarniste (rumosz, otoczaki, żwiry) powszechnie uważane za kruszywa ale

także drobnoziarniste gliny pylaste i gliny zwięzłe. Materiały wrażliwe na działanie wody muszą być oczywiście odpowiednio zabezpieczone, ale jednak mogą być stosowane. Oznacza to, że norma ta nie daje nam odpowiedzi na postawione na wstępie pytanie.

Norma PN-B-01100:1987 [3] definiuje kruszywa skalne jako materiał ziarnisty uzyskany z surowca skalnego. W tym sensie UPS to nie jest kruszywem skalnym, ponieważ UPS-y nie pochodzą z przeróbki skał. Czujemy to intuicyjnie.

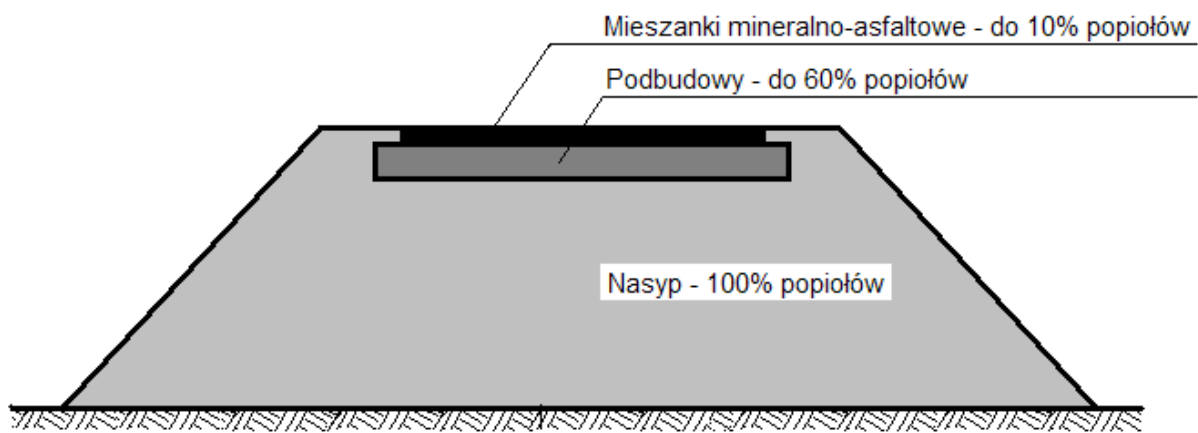
Norma PN-EN 13242+A1:2010 [4] definiuje kruszywo: jest to ziarnisty materiał stosowany w budownictwie, który może być: naturalny, sztuczny lub recyklingu. Podobną definicję podają inne normy i Wytyczne Techniczne. W tym sensie UPS z całą pewnością jest kruszywem. Do takiej definicji skłania się także Piotr Sobczyński w pracy [5], gdzie przytoczone są także definicje brytyjskie.

Podsumowując można z całą pewnością stwierdzić, że UPS możemy traktować dwojako, więc jest to zarówno grunt jak i kruszywo. Choć wydaje się, że grubsze materiały takie jak żużle raczej zawsze będziemy uważać za kruszywa.

### 3. Możliwości wykorzystania UPS

W budowie dróg UPS mogą być wykorzystywane do wykonania [6] (rysunek 1):

- Nasypów komunikacyjnych.
- Ulepszonych podłoży nasypów oraz nawierzchni.
- Podbudów drogowych.
- Mieszanek mineralno-asfaltowych.



Rysunek 1. Możliwości stosowania popiołów lotnych i mieszanek popiołowo-żużlowych w budownictwie drogowym

W budownictwie UPS najpowszechniej stosowane są do:

- Produkcji cementów.
- Produkcji betonów cementowych.
- Produkcji zapraw budowlanych.

W różnych działach gospodarki wymienia się ponad 20 różnych możliwości zastosowań UPS.

Skupiając się na zastosowaniach drogowych należy stwierdzić, że ze względu na swoją objętość największe wykorzystanie UPS może występować w budowie nasypów

komunikacyjnych. Nasypy mogą być wykonane w 100% z popiołów lotnych, mieszanin popiołowo-żuźlowych, popiołów dennych lub żużli.

UPS-y mają zbyt małą nośność, aby samodzielnie stanowić część konstrukcji nawierzchni drogi. Jednakże mogą być wykorzystywane jako składnik mieszanek do wykonania podbudów drogowych lub ulepszanego podłoża znajdującego się pod konstrukcją drogi lub pod nawierzchnią kolejową. Co ciekawe w podbudowach lub w ulepszonym podłożu aktywne popioły wapniowe mogą pełnić funkcję samodzielnego spoiwa lub być jego częścią.

W mieszankach mineralno-asfaltowych UPS o drobnym uziarnieniu mogą pełnić funkcję wypełniacza.

## 4. Nasypy z UPS

### 4.1. Wymagania

Zgodnie z normą [2] do wykonywania nasypów mogą być wykorzystywane wszystkie rodzaje UPS-ów, pod warunkiem spełniania parametrów podanych w tabelicy 1 [2]. Jest rzeczą oczywistą, że w przypadku wykorzystania do budowy nasypów materiałów o grubszym uziarnieniu, takich jak żuźle lub popioły denne wymagania te praktycznie zawsze będą spełnione z dużym zapasem.

UPS w nasypach pełnią taką samą rolę, jak w przypadku tradycyjnie wykonywanych nasypów grunty naturalne.

Tablica 1. Wymagane właściwości mieszanin popiołowo-żuźlowych przeznaczonych do budowy nasypów [2]

Cechy	Wymagania	Badania wg normy
Uziarnienie: <ul style="list-style-type: none"> <li>• zawartość frakcji piaskowo-żwirowej</li> <li>• zawartość ziaren poniżej 0,075 mm</li> </ul>	$\geq 35\%$ $\leq 75\%$	PN-B-04481:1988
Zawartość niespalonego węgla	$\leq 10\%$	PN-B-04481:1988
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu po zagęszczeniu wg Proctora (metoda I lub II)	$\geq 1 \text{ g/cm}^3$	PN-B-04481:1988
Wskaźnik nośności CBR, po 4 dobach nasączenia w wodzie	$\geq 10\%$	PN-S-02205:1998 Załącznik A
Pęcznienie liniowe <ul style="list-style-type: none"> <li>• bez obciążenia</li> <li>• z obciążeniem <math>3 \text{ kN/m}^2</math></li> </ul>	$\leq 2\%$ $\leq 0,5\%$	PN-S-02205:1998 Załącznik A
Kąt tarcia wewnętrznego	$\geq 20^\circ$	PN-B-04481:1988
Kapilarność bierna $H_{kb}$	$\leq 2 \text{ m.}$	PN-B-04493:1960
Zawartość siarczanów (w przeliczeniu na $\text{SO}_3$ )	$\leq 3 \%$	

Najważniejszą cechą UPS przeznaczonych do budowy nasypów jest uziarnienie. Ono bowiem decyduje o parametrach mechanicznych i fizycznych, takich jak: nośność, zagęszczalność, kąt tarcia wewnętrznego, kapilarność bierna, pęcznienie. Analogicznie jak w typowych gruntach, im grubsze uziarnienie materiału, tym jego parametry mechaniczne będą lepsze.

Problemem w czasie wbudowywania mieszanin popiołowo-żuźlowych składowanych na lagunach jest ich wilgotność, niekiedy sięgająca 100%. Wilgotność optymalna takich mieszanin wynosi zazwyczaj od 20 do 35%. Oznacza to konieczność usunięcia około 70% wody. Można to uzyskać następującymi metodami:



- wielokrotne mieszanie,
- długotrwałe składowanie w przyzmacach,
- mieszanie z suchymi popiołami lotnymi lub żużłami,
- mieszanie z suchym gruntem niespoistym,
- mieszanie z wapnem, cementem lub aktywnymi popiołami lotnymi.

Jasne jest, że niektóre z wyżej wymienionych metod wymagają długiego czasu oraz powierzchni terenu, gdzie takie zabiegi mogą być wykonywane. To znacząco ogranicza ich atrakcyjność. Zwłaszcza gdy mamy do czynienia z UPS o drobnym uziarnieniu znacznie prościej będzie to zrobić poprzez zmieszanie z suchym materiałem o grubszym uziarnieniu lub osuszyć chemicznie poprzez wymieszanie ze spoiwem takim jak wapno lub aktywne popioły lotne (lub spoiwo produkowane na ich bazie).

Należy zwrócić uwagę, także na gęstość objętościową UPS, wynoszącą nieco ponad 1 g/cm<sup>3</sup>. Oznacza to, że nasyp wykonany z takich materiałów będzie dużo lżejszy, co może być korzystne w sytuacji budowy nasypów na podłożu o małej nośności a w szczególności na podłożu ściśliwym.

## 4.2. Nasyp na ulicy Kontenerowej w Gdyni

Sposób mieszania mokrych mieszanin popiołowo-żużlowych z suchymi popiołami wykorzystany został przy budowie nasypu na ulicy Kontenerowej w Gdyni. Mieszaniny popiołowo-żużłowe ze składowiska w Gdańsku-Letnicy miały wilgotność naturalną dochodzącą do 86% przy średniej wartości na poziomie 60%. Oczywiście jest, że wilgotność naturalna zmienia się wraz z głębokością zalegania materiału na składowisku.

Wilgotność optymalna mieszanin popiołowo-żużlowych zalegających na składowisku była bardzo duża i wynosiła do 35 do 41%. Jest to zjawisko dość typowe dla takich materiałów, których uziarnienie odpowiada pyłom lub pyłom pylastym (wilgotność optymalna pyłów wynosi zazwyczaj 12 ÷ 14% [9]) a ich wilgotność optymalna jest kilka razy większa. W sytuacji dużej wilgotności materiałów zgromadzonych na mokrych składowiskach można to uznać nawet za zjawisko korzystne.

Suche popioły lotne pochodziły bezpośrednio z produkcji z EC III w Gdyni. Co ciekawe suche popioły z Gdyni miały dużo drobniejsze uziarnienie, odpowiadające łożom a ich wilgotność optymalna wynosiła 25% (tylko nieznacznie więcej niż podaje Z. Wiłun [9]).

Ponieważ mokre mieszaniny popiołowo-żużłowe były pobierane ze składowiska poprzez skrawanie pionowej siany o wysokości do 4 m, a po transportowaniu do miejsca wbudowania jeszcze układane równiarką ich wilgotność była ujednolicona do wartości około 50%. W takiej sytuacji uznano, że bezpiecznym rozwiązaniem będzie mieszanie składników w proporcji 1 : 1 (mokre mieszaniny popiołowo-żużłowe : suche popioły). Taka mieszanka miała wilgotność na poziomie 25% a jej wilgotność optymalna nie przekraczała 30%. Było to rozwiązanie o tyle bezpieczne, że wszelkie materiały typu UPS są bardzo wrażliwe na nadmiar wilgoci i powinny być zagęszczane przy wilgotności do 5% mniejszej od wilgotności optymalnej ale nigdy od niej większej.

W tablicy 2 przedstawiono właściwości materiałów wykorzystanych do budowy nasypu na ulicy Kontenerowej w Gdyni.



Tablica 2. Właściwości UPS wykorzystanych do budowy nasypu [6]

Cechy	Wymagania	Właściwości UPS
Uziarnienie: <ul style="list-style-type: none"> <li>• zawartość frakcji piaskowo-żwirowej</li> <li>• zawartość ziaren poniżej 0,075 mm</li> </ul>	$\geq 35\%$ $\leq 75\%$	$30 \div 65\%$ $35 \div 70\%$
Zawartość niespalonego węgla	$\leq 10\%$	$7 \div 11\%$
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu po zagęszczeniu wg Proctora (metoda I lub II)	$\geq 1 \text{ g/cm}^3$	$0,967 \div 1,219 \text{ g/cm}^3$
Wskaźnik nośności CBR, po 4 dobach nasączenia w wodzie	$\geq 10\%$	$5 \div 19\%$
Pęcznienie liniowe <ul style="list-style-type: none"> <li>• bez obciążenia</li> <li>• z obciążeniem <math>3 \text{ kN/m}^2</math></li> </ul>	$\leq 2\%$ $\leq 0,5\%$	- -
Kąt tarcia wewnętrznego	$\geq 20^\circ$	$24 \div 27\%$
Kapilarność bierna $H_{kb}$	$\leq 2 \text{ m.}$	$0,78 \div 1,70 \text{ m}$
Zawartość siarczanów (w przeliczeniu na $\text{SO}_3$ )	$\leq 3 \%$	$0,5 \div 3,5\%$

Należy zwrócić uwagę, że niektóre właściwości UPS wykorzystanych do budowy nasypu w Gdyni spełniały założenia normowe. Nie spowodowało to żadnych skutków obniżenia nośności czy zniszczenia nasypu i całej konstrukcji drogi w długim czasie eksploatacji.

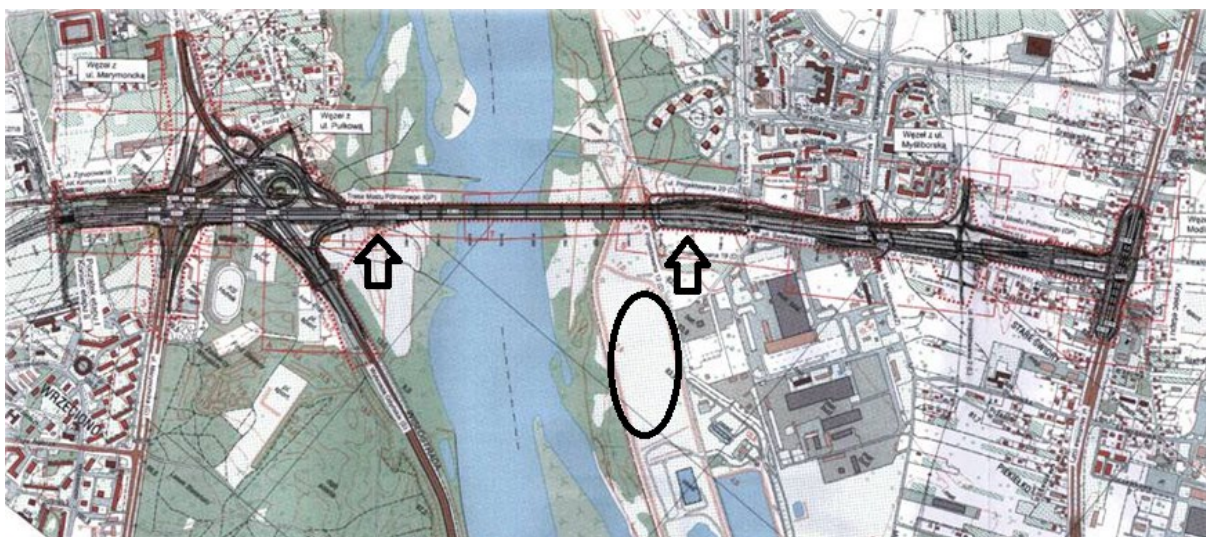
Duże znaczenia miało tu zastosowanie suchych popiołów lotnych, które mają pewne właściwości wiążące. Po roku od zbudowania nasypu pobranie próbek materiału za pomocą zwykłej łopaty było niemożliwe, trzeba było użyć do tego koparki. Jednak nawet dla tak pobranych próbek przeprowadzenie badań laboratoryjnych, za pomocą klasycznych norm odnoszących się do gruntów, było niemożliwe.

### 4.3. Nasyp dojazdowy do mostu północnego w Warszawie

Przy budowie mostu Północnego w Warszawie zaprojektowano łącznie  $820\,000 \text{ m}^3$  nasypów z dokopu. Jednym z większych problemów przy ich realizacji było dostarczenie takiej ilości materiałów. Kopalnie piasku, o odpowiednich właściwościach, znajdują się około 50 km od placu budowy, co oznacza duże koszty transportu oraz problemy komunikacyjne.

Rozwiązaniem mogło być zastosowanie mieszanin popiołowo-żużlowych zgromadzonych na składowisku w Żeraniu. Składowisko to znajduje się kilka kilometrów od budowanych nasypów. Pokazano to na rysunku 1.





Rysunek 1. Lokalizacja budowanych nasypów trasy Mostu Północnego oraz składowiska UPS

Badania laboratoryjne UPS zgromadzonych na składowisku pokazały jednak, że w dużej mierze jest to materiał nie spełniający wymagań podanych w normie PN-S-02205:1998 [2]. Szczególnie dotyczy to maksymalnej gęstości szkieletu po zagęszczeniu. Zgodnie z normą [2] gęstość szkieletu powinna być większa od  $1 \text{ g/cm}^3$ . Badania przeprowadzone przez Wykonawcę Mostu Północnego, firmę POL-AQUA pokazały, że w większości przypadków otrzymywano gęstość szkieletu na poziomie  $0,945 \text{ g/cm}^3$ . Także współczynnik filtracji nie spełniał założeń projektowych. Biorąc pod uwagę naturalną zmienność materiału jego zastosowanie byłoby ryzykowne.

Drugim rozwiązaniem jakie brano pod uwagę było zastosowanie piasku pochodzącego z refulacji Wisły. Jak powszechnie wiadomo materiały z refulacji, bez względu na ich uziarnienie, charakteryzują się jednofrakcyjnością. Badany materiał miał wskaźnik różnoziarnistości  $U \leq 2,5$ . Zgodnie z wymaganiami Specyfikacji Technicznych wskaźnik ten powinien być większy od 5.

Jednak jak się okazało połączenie tych 2 koncepcji pozwoliło stworzyć materiał odpowiadający wszystkim zainteresowanym stronom. Pozostało tylko ustalić proporcje mieszania 2 materiałów, z których każdy z osobna nie spełniał założeń projektowych, ale ich połączenie tworzy nową jakość, którą można wykorzystać zgodnie z zasadami sztuki budowlanej.

W celu określenia właściwych proporcji mieszania UPS oraz piasku z Wisły przeprowadzono serię badań określających najważniejsze, wymienione w normie PN-S-02205:1998 [2] oraz w Specyfikacjach Technicznych parametry. Pokazano je w tabelicy 3.

Tablica 3. Właściwości mieszanek UPS i piasku z Wisły

Właściwości	Mieszanka (UPS:piasek)		
	40:60	50:50	60:40
Wilgotność naturalna, %	16,5	17,0	18,5
Maksymalna gęstość objętościowa szkieletu, g/cm <sup>3</sup>	1,545	1,500	1,373
Wilgotność optymalna, %	18,0	20,0	24,2
Wskaźnik różnoziarnistości	3,2	5,1	7,4
Współczynnik filtracji, m/dobę	13,4	5,3	2,6
Zawartość pyłów, poniżej 0,063 mm, %	6,4	8,4	12,6
Wskaźnik piaskowy	81	70	62

Z analizy powyższej tablicy można wyciągnąć następujące wnioski:

- Wilgotność naturalna mieszanek jest zawsze poniżej wilgotności optymalnej, co umożliwia właściwe zagęszczenia materiału w czasie wbudowywania w nasyp.
- Maksymalna gęstość szkieletu spełnia wymagania normowe – jest to związane z wykorzystaniem mieszanki lekkiego materiału (UPS) oraz znacznie cięższego (piasek). Za kryterium przyjmuje się wymagania jak dla materiału lekkiego – tablica 4 norma PN-S-02205:1998 [2].
- Wskaźnik różnoziarnistości dla wszystkich badanych mieszanek spełnia wymagania ST, jednak dla mieszanki 40:60 jest niski i w warunkach budowy i naturalnej zmienności materiałów mógłby powodować kłopoty.
- Współczynnik filtracji jest zależny głównie od zawartości w materiale drobnych frakcji. W sytuacji zbyt drobnego uziarnienia materiału, jaki występuje w popiołach lotnych i mieszaninach popiołowo-żużlowych wodoprzepuszczalność drastycznie spada. Zgodnie z powyższą tablicą bezpieczny udział UPS będzie wynosił 50%.
- Zawartość pyłów oraz wskaźnik piaskowy dla wszystkich badanych mieszanek pokazują, że jest to materiał niewysadzinowy i może być zastosowany do budowy nasypów komunikacyjnych.
- Dla zachowania bezpieczeństwa przyjęto, że mieszanka do budowy nasypów będzie się składała w połowie z UPS oraz piasku z Wisły.

Poniżej pokazano kilka zdjęć z przebiegu budowy nasypów dojazdowych do Mostu Północnego w Warszawie.



Zdjęcie 2. Transport UPS



Zdjęcie 3. Najprostszy sposób mieszania UPS z piaskiem – za pomocą koparek





Zdjęcie 4. Fragment wykonanego nasypu. Widoczne fragmenty wykonane z samego piasku (skarpy) oraz mieszanka z UPS.

## 5. Podbudowy drogowe

W podbudowach drogowych, gdzie występują znaczące naprężenia od ruchu drogowego takie materiały jak UPS nie mogą pełnić zasadniczej funkcji nośnej ze względu na słabe właściwości mechaniczne. Funkcje te pełnią zazwyczaj materiały kamienne – kruszywa pochodzące ze skał lub żuźle wielkopieczowe, stalownicze lub pomiedziowe. Charakteryzują się one bardzo dobrymi parametrami mechanicznymi oraz fizycznymi.

Jednak materiały takie jak UPS znajdują swoje zastosowania w podbudowach i ulepszonych podłożach, stanowiąc zazwyczaj część mieszanki mineralnej.

### 5.1. Podbudowy niezwiązane

Tradycyjnie podbudowy z kruszywa stabilizowanego mechanicznie wykonuje się w oparciu o normę PN-S-06102:1997 [11]. Jednak w roku 2010 ukazał się dokument aplikacyjny do normy PN-EN 13285:2004 [12] o symbolu WT-4 [13] co oznacza, że to zgodnie z nim teraz powinny być projektowane i wykonywane tego typu podbudowy i ulepszone podłoża.

Zgodnie z powyższymi dokumentami jest możliwe zastosowanie UPS do wykonywania ulepszonych podłoża i podbudowy drogowej. Wymagania jakie stawiane są kruszywom przedstawiono w tabelicy 4. Aby nie zaciemniać obrazu pokazano tylko wymagania dla ulepszonych podłoża oraz dla podbudowy pomocniczej, biorąc pod uwagę, że wykorzystanie UPS w podbudowie zasadniczej raczej nie jest stosowane. Biorąc także pod uwagę, że UPS mają zazwyczaj drobne uziarnienie, nawet materiały o nazwie handlowej żuźel mają zazwyczaj uziarnienie odpowiadające co najwyżej piaskom, w tabelicy 4 pokazano tylko cechy jakie są wymagane dla takiej frakcji kruszywa.

Tablica 4. Wymagane właściwości kruszywa do ulepszonego podłoża i podbudowy pomocniczej z kruszywa niezwiązanego

Właściwości	Wymagania			
	Ulepszone podłoże	Podbudowa pomocnicza		
	KR1 ÷ KR6	KR2	KR3 ÷ KR4	KR5 ÷ KR6
Uziarnienie	$\leq$ KR4 $G_{Fdekl}$ $\geq$ KR5 $G_{F80}$	$G_{Fdekl}$	$G_{F80}$	$G_{F80}$
Tolerancje uziarnienia	$GT_{FNR}$	$GT_{FNR}$	$GT_{FNR}$	$GT_{FNR}$
Zawartość pyłu	$f_{Deklarowana}$	$f_{Deklarowana}$	$f_{Deklarowana}$	$f_{Deklarowana}$
Gęstość	Deklarowana	Deklarowana	Deklarowana	Deklarowana
Zawartość siarczanów i siarki	$AS_{NR}$ ; $SNR$	$AS_{NR}$ ; $SNR$	$AS_{NR}$ ; $SNR$	$AS_{NR}$ ; $SNR$
Składniki	Brak substancji szkodliwych w stosunku do środowiska			
Zanieczyszczenia	Brak zanieczyszczeń obcych			

Analizując powyższą tablicą można wyciągnąć następujące wnioski:

- Podobnie jak w poprzednio obowiązującej normie dla kruszywa drobnego, jakim jest UPS, nie postawiono wiele wymagań.
- Uziarnienie kruszywa drobnego może być albo deklarowane przez Producenta albo może zawierać do 20% nadziarna powyżej 2 mm (w zależności od zastosowania).
- Dla pozostałych właściwości technicznych albo nie wprowadzono żadnych wymagań lub ma je zadeklarować Producent, co także oznacza brak wymagań a tylko narzuca Producentowi jednorodność produkcji.
- Dla takich właściwości jak składniki i zanieczyszczenia wprowadzono ogólny zapis brak zanieczyszczeń.

Podsumowując powyższe zapisy można powiedzieć, że UPS-y mogą być stosowane jako składniki mieszanki do ulepszonego podłoża lub podbudowy drogowej.

Ponieważ Wytyczne Techniczne WT-4 podają krzywe uziarnienia mieszanki stosowanych do ulepszonego podłoża lub podbudowy, na ich podstawie można ocenić maksymalny dodatek materiałów typu UPS w ich składzie. W mieszance o najdrobniejszym uziarnieniu – 0/8 kruszywa do 2 mm powinno być od 30 do 80% a w mieszance najgrubszej – 0/63 powinno być od 13 do 66%.

Jednak taka analiza nie daje całego obrazu sytuacji, ponieważ muszą być jednocześnie spełnione także inne warunki takie jak:

- Maksymalna zawartość pyłu, wynosząca od 9 do 15%. Trudno jest jednoznacznie powiedzieć jak to wpływa na maksymalną zawartość materiałów typu UPS w mieszance ze względu na bardzo różnorodne ich uziarnienia. Inaczej będzie przy dodatku czystych popiołów – wtedy będzie można ich dodać maksymalnie od 9 do 15% - przypadek taki występuje wtedy gdy dysponujemy materiałami o dużej czystości. Takie właściwości mają kruszywa rzeczne i niekiedy wydobywane spod wody. Zupełnie inaczej będzie przypadku dodatku żużla czy popiołu dennego. Gdzie zawartość frakcji pyłowej jest poniżej 20% - takiego materiału będzie można dodać nawet 50%, biorąc pod uwagę tylko uziarnienie mieszanki.
- Wrażliwość na mróz – wskaźnik piaskowy SE powinien wynosić nie mniej niż 30÷40% (w zależności od warstwy i przebiegu drogi).
- Wrażliwość na mróz – wskaźnik plastyczności  $I_p$  powinien być nie większy od 6.



- Odporność na rozdrabnianie jest trudna do oceny ponieważ badanie to wykonuje się na frakcji kruszywa 10/14 mm. Jest pewne, że materiały typu UPS nie są w stanie spełnić postawionych w WT-4 wymagań i osłabiają jakość mechaniczną mieszanki.
- CBR – najważniejszy parametr mechaniczny mieszanki. Jest on badany na grubej mieszance, o uziarnieniu do 22,4 mm. Ze względu na wytrzymałość mechaniczną kruszyw UPS, ich dodatek będzie musiał być ograniczony aby mógł być zachowany wymóg  $\text{CBR} \geq 35 \div 80\%$  (w zależności od warstwy).
- Wodoprzepuszczalność (warunek dla warstwy odsączającej)  $K_{10} \geq 8$  m/dobę. Jak powszechnie wiadomo wodoprzepuszczalność mieszanki zależy głównie od zawartości drobnych frakcji. W przypadku dodatku popiołów lotnych ich zawartość musi być mniejsza od 5%. Jeżeli dodatkiem mają być popioły denne lub żużle ich dodatek może wynosić do 30%.

## 5.2. Podbudowy związane

Tradycyjnie podbudowy z gruntów lub kruszyw stabilizowanych cementem wykonywano zgodnie z normą PN-S-96012:1997 [14]. Oddzielnie funkcjonowały normy dotyczące stabilizacji gruntu za pomocą wapna oraz aktywnych popiołów lotnych.

Normy te pozwalały na wykorzystanie praktycznie wszystkich rodzajów UPS, traktując je jako grunty antropogeniczne. Materiały te po związaniu spoiwem i uzyskaniu odpowiedniej wytrzymałości oraz mrozoodporności mogły stanowić warstwę konstrukcyjną nawierzchni.

Ciekawym rozwiązaniem był beton popiołowy PN-S-06103:1997 [15], gdzie z założenia powinno być wykorzystane do 35% popiołów lotnych z węgla kamiennego a jako spoiwo do 12% aktywnych popiołów lotnych z węgla brunatnego. Była to norma stosowana równoległe do klasycznych norm dotyczących różnych rodzajów stabilizacji.

Obecnie w życie wchodzi seria norm PN-EN 14227 [16] oraz związany z nimi dokument aplikacyjny zwany WT-5 [17]. Warto wspomnieć, że normy te inaczej podchodzą do spoiw, a największą zmianą jest określenie spoiwa drogowego, co umożliwia stosowanie dowolnych spoiw spełniających wymagania Aprobata Technicznych lub norm. Spoiw takich na naszym runku pojawiło się co najmniej kilka.

Normy PN-EN 14227-1÷5 oraz WT-5, odnoszą się do stabilizacji mieszanek, czyli w domyśle kruszyw. Kolejne numery tych norm odnoszą się do stabilizacji gruntów, ale nie rozpoczęto jeszcze prac nad dokumentem aplikacyjnym umożliwiającym ich zastosowanie.

Podobnie jak dla mieszanek niezwiązanych w celu oszacowania ilości UPS jakie możemy tu zastosować należy przeanalizować wymagania materiałowe. Dla drobnych materiałów jakimi są UPS-y istotne jest tylko jedno wymaganie  $G_{F80}$ , dotyczące zawartości nadziarna. Nawet w przypadku grubszego uziarnienia odsianie nadziarna nie jest problemem technicznym.

Analiza krzywych uziarnienia także pozwala wstępnie ocenić dopuszczalną ilość UPS-ów. Dla mieszanki 0/31,5 mm jest to od 18 do 50% masy mieszanki ale dla najdrobniejszej mieszanki 0/8 można poddać stabilizacji do 100% materiału drobnego. Oznacza to, że możemy stabilizować same UPS-y.

Należy pamiętać, że dla materiałów stabilizowanych spoiwami najważniejszymi parametrami są wytrzymałość na ściskanie oraz mrozoodporność. Biorąc to pod uwagę musimy zawsze mieć na względzie fakt, że zastosowanie słabszego lub drobniejszego kruszywa spowoduje konieczność większego dodatku spoiwa a przez to mieszanka stanie się droższa i będzie miała gorsze parametry techniczne, szczególnie ważnym mankamentem może być jej zwiększony skurcz.



Wymagania stawiane mieszankom stabilizowanym spoiwami hydraulicznymi przedstawiono w tablicy 5.

Tablica 5. Wymagane parametry mieszanek stabilizowanych spoiwami hydraulicznymi

Właściwości	Wymagania		
	KR1 ÷ KR2	KR3 ÷ KR4	KR5 ÷ KR6
<b>Stabilizacja cementem</b>			
Ulepszone podłoże			
Wytrzymałość na ściskanie	$C_{1,5/2,0}$		
Podbudowa pomocnicza			
Wytrzymałość na ściskanie	$C_{1,5/2,0}$ poniżej 4 MPa	$C_{3/4}$ poniżej 6 MPa	$C_{5/6}$ poniżej 10 MPa
Mrozoodporność	$\geq 0,6$		
Podbudowa zasadnicza			
Wytrzymałość na ściskanie	$C_{3/4}$ poniżej 6 MPa	$C_{5/6}$ poniżej 10 MPa	$C_{8/10}$ poniżej 20 MPa
Mrozoodporność	$\geq 0,7$		
<b>Stabilizacja aktywnym popiołem lotnym lub spoiwem drogowym *</b>			
Ulepszone podłoże			
Wytrzymałość na ściskanie	$C_{0,4/0,5}$		
Podbudowa pomocnicza			
Wytrzymałość na ściskanie	$C_{1,5/2,0}$ poniżej 4 MPa	$C_{3/4}$ poniżej 12 MPa	$C_{6/8}$ poniżej 16 MPa
Mrozoodporność	$\geq 0,6$		
Podbudowa zasadnicza			
Wytrzymałość na ściskanie	$C_{3/4}$ poniżej 8 MPa	$C_{6/8}$ poniżej 12 MPa	$C_{9/12}$ poniżej 16 MPa
Mrozoodporność	$\geq 0,7$		

\* Wymagania są niekiedy różne dla różnych typów mieszanek. W tablicy podano najczęściej stosowane jako przykładowe.

Należy zwrócić uwagę, że inaczej niż było w poprzednich normach obecnie indeksy oznaczają minimalną wytrzymałość na ściskanie, a inne liczby są wymagane w zależności od proporcji wymiarów próbek. Nieco zmieniona została także procedura badania wskaźnika mrozoodporności próbek.

Doświadczenie pokazuje, że uzyskanie odpowiedniej wytrzymałości nie jest trudne. Dla niektórych materiałów wymaga to tylko zwiększenia zawartości spoiwa lub zmiany rodzaju spoiwa. Choć materiały o bardzo drobnym uziarnieniu, wykazujące właściwości spoiuste nie dają się stabilizować każdym spoiwem. Dużo trudniej jest uzyskać odpowiedni wskaźnik mrozoodporności. Dla niektórych materiałów, jak grunty spoiuste, jest on niekiedy niemożliwy do uzyskania.

Wiele materiałów typu UPS, mających bardzo drobne uziarnienie będzie powodowało te same problemy. Na zdjęciach 5 i 6 pokazano przykładowe próbki przed i po badaniu mrozoodporności.





Zdjęcie 5. Próbkki mieszanki popiołowo-piaskowej stabilizowanej cementem



Zdjęcie 6. Próbkki mieszanki popiołowo-piaskowej stabilizowanej cementem po badaniu mrozoodporności

Patrząc na powyższe zdjęcia i wymagania zawarte w tablicy 5 można stwierdzić, że dla wielu materiałów spoistych uzyskanie wymaganego wskaźnika mrozoodporności będzie możliwe tylko przy zastosowaniu większej ilości spoiwa a więc i uzyskując jednocześnie dużo większe wytrzymałości. Ponieważ górne dopuszczalne wytrzymałości zostały zdefiniowane zupełnie inaczej jest to możliwe, ale zapewnienie tych parametrów musi odbyć się kosztem zwiększonej ilości spoiwa a więc i większych nakładów finansowych.

### Bibliografia

- [1] PN-B-02480:1986 Grunty budowlane. Określenia, symbole, podział i opis gruntów.
- [2] PN-S-02205:1998 Drogi samochodowe. Roboty ziemne. Wymagania i badania.
- [3] PN-B-01100:1987 Kruszywa mineralne. Kruszywa skalne. Podział, nazwy i określenia.
- [4] PN-EN 13242+A1:2010 Kruszywa do niezwiązanych i związanych hydraulicznie materiałów stosowanych w obiektach budowlanych i budownictwie drogowym
- [5] Sobczyński P.: Czy popioły i żużle ze spalania węgla kamiennego to kruszywo? Autostrady 8-9/2009.

- [6] Judycki J., Alenowicz J., Strugała I., Cyske W.: Zastosowanie popiołów lotnych ze spalania węgla kamiennego do budowy dróg na przykładzie eksperymentalnej drogi dojazdowej do elektrociepłowni "EC III" w Gdyni. Międzynarodowa konferencja „Zagospodarowanie odpadów paleniskowych i odpadów z odsiarczania spalin”, Świnoujście 1994.
- [7] PN-B-04481:1988 Grunty budowlane - Badania próbek gruntu
- [8] PN-B-04493:1960 Grunty budowlane - Oznaczanie kapilarności biernej.
- [9] Wiłun Z.: Zarys geotechniki. WKŁ. Warszawa 2000.
- [10] Cyske W., Szczygielski T.: Application of fly-ash in transport infrastructure projects on the basis of the north bridge in Warsaw. III International Scientific and Practical Workshop "Aashes from TPPs – removal, transport", processing, landfilling", 2010 Moscow, Russia.
- [11] PN-S-06102:1997 Drogi samochodowe. Podbudowy z kruszyw stabilizowanych mechanicznie.
- [12] PN-EN 13285:2004 Mieszanki niezwiązane – specyfikacja. (nowelizacja z roku 2010)
- [13] Mieszanki niezwiązane do dróg krajowych. WT-4 2010. Wymagania Techniczne.
- [14] PN-S-96012:1997 Drogi samochodowe. Podbudowa i ulepszone podłoże z gruntu stabilizowanego cementem.
- [15] PN-S-06103:1997 Drogi samochodowe. Podbudowa z betonu popiołowego.
- [16] PN-EN 14227 Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym – Wymagania.
- [17] Mieszanki związane spoiwem hydraulicznym. WT-5 2010. Wymagania Techniczne.