

Możliwości wykorzystania odpadów z produkcji rolniczej jako składników betonu

POSSIBILITIES OF USING WASTE FROM AGRICULTURAL PRODUCTION AS CONCRETE COMPONENTS

Streszczenie

Sektor budowlany w dzisiejszych czasach stoi przed niezliczonymi wyzwaniami, przede wszystkim ze względu na wzrost populacji miejskiej i stale kurczące się zasoby naturalne. Ponadto większa świadomość na temat zmian klimatu zmusza firmy do ponownego przemyślenia swoich strategii w zakresie opracowywania bardziej zrównoważonych materiałów budowlanych. Problemy te dotyczą również produkcji betonu, jednego z najczęściej używanych materiałów budowlanych na świecie. Różnorodne rodzaje odpadów rolniczych stanowią mocną alternatywę w rozwoju materiałów budowlanych w tym również betonu. Głównym kryterium przyjętym przy zastosowaniu odpadów rolniczych w produkcji betonu jest ich duża dostępność w danym regionie oraz możliwość szerokiego zastosowania w przemysłowej produkcji betonu. Zastosowanie odpadów rolniczych do produkcji betonu nie tylko poprawia ekologiczność jego produkcji. Może stać się w przyszłości koniecznym rozwiązaniem z uwagi na coraz większe problemy z zasobami naturalnymi kruszyw budowlanych w wielu krajach świata. Jak pokazują liczne badania i wdrożenia wykorzystanie odpadów rolniczych jako zamiennika cementu, kruszywa czy wzmocnienie matrycy cementowej włóknami pochodzenia roślinnego wykazało ogromny potencjał. Niniejszy artykuł zawiera próbę podsumowania wykorzystania odpadów rolniczych jako składników betonu. Odpady rolnicze dzielą się na naturalne włókno roślinne, popiół z odpadów rolniczych i odpady wielozadaniowe. W artykule przeanalizowano zalety i wady najczęściej wykorzystywanych na świecie odpadów rolniczych w produkcji betonu. Opisano również w jaki sposób różne odpady rolnicze są przetwarzane. Wybór odpowiednich metod obróbki i sposobu zastosowania jest niezwykle ważny i może decydować o nośności i trwałości betonu. Odpady rolnicze z uwagi na ich utylizację w betonie można podzielić na: zamienniki cementu, zamienniki kruszywa oraz włókna wzmacniające matrycę cementową.

Abstract

The construction industry faces many challenges today, first related to the urban population's growth and still shrinking natural resources. Moreover, the greater awareness of climate issues forces the companies to re-thinking their strategies towards more sustainable building materials. The problem also concerns the production of concrete, the most often used building material. Various agricultural wastes are a solid alternative for the traditional development of building materials, including concrete. The primary criterion adopted when using agricultural wastes for concrete production is their availability in the given region and the possibility of wide use in industrial concrete production. Using agricultural wastes improves the environmental friendliness of concrete production. It can become a necessity in the future due to the growing problems with natural aggregate resources in many countries. Numerous studies and implementations show that using agricultural wastes as a replacement for cement or aggregate or strengthening the cement matrix with vegetable fibres has significant potential. This paper presents a summary of agricultural wastes used as concrete components. The agricultural wastes are divided into vegetable fibres, ash from agricultural waste burning and multi-tasking wastes. The advantages and disadvantages of the most often used wastes have been analysed, referring to concrete production. The methods of waste processing were described. The selection of the appropriate ways of processing and application is decisive for the strength and durability of concrete. Generally, considering the utilisation of concrete, agricultural wastes can be divided into substitutes for cement, aggregate, and fibres strengthening the cement matrix.

1. Wprowadzenie

Przemysł cementowy wraz z produkcją betonu stanowią podstawę globalnej infrastruktury. Jego znaczenie dla rozwoju społeczeństw w kierunku bardziej zurbanizowanego stylu życia oznacza, że jest to kluczowa branża do dekarbonizacji, jeśli założenia w zakresie zrównoważenia środowiskowego mają zostać osiągnięte [1]. Około 9–10 % światowej emisji dwutlenku węgla związanej z energią [2, 3] przypisuje się cyklowi życia produktów przemysłu cementowego i betonowego (w tym produkcji, łańcuchowi dostaw, zużyciu i wycofaniu z eksploatacji). Globalna produkcja cementu pochłania rocznie średnio około 7 % światowego zapotrzebowania na energię przemysłową [4]. Nadmierny wzrost wydobycia surowców mineralnych, w tym kruszyw budowlanych prowadzi do wyczerpania zasobów naturalnych i bezpośrednio powoduje negatywne skutki dla środowiska takie jak niszczenie krajobrazu i ekosystemów oraz generuje zanieczyszczenia [1].

Aby ograniczyć szkody wyrządzone środowisku naturalnemu przez przemysł cementowy i produkcję betonu, w ostatnich dziesięcioleciach prowadzone są szerokie badania nad alternatywnymi rozwiązaniami dla cementu i kruszywa. W wielu krajach nałożono obowiązek wykorzystania kruszywa z recyklingu do przygotowania świeżego betonu. Jako nowy substytut cementu coraz więcej uwagi w przemyśle materiałów budowlanych przyciągają różnego rodzaju geopolimery czy wapienne cementy gliniane [5,6]. Drugim kierunkiem jest poszukiwanie alternatywnych rozwiązań dla mineralnych kruszyw budowlanych. Oprócz wykorzystania kruszyw z recyklingu oraz sztucznych kruszyw lekkich wykorzystanie odpadów rolniczych jako substytutu kruszyw budowlanych wykazuje tendencje wzrostową.

Pojęcie odpady rolnicze ma szerokie znaczenie. Są to odpady pochodzące z produkcji rolnej, przetwórstwa produktów rolnych, hodowli zwierząt gospodarskich i drobiu oraz mieszkańców obszarów wiejskich. Ten rodzaj odpadów stanowi 30% całkowitej światowej produkcji rolnej [7]. W większości przypadków odpady rolnicze są spalane lub składowane, powodując zanieczyszczenie ziemi i wpływając negatywnie na środowisko ekologiczne. W celu uzyskania lepszej jakości materiałów odpadowych z produkcji rolniczej i wykorzystania ich w budownictwie muszą być one odpowiednio przetworzone. W tym celu stosuje się takie zabiegi jak kruszenie, cięcie, mielenie w celu uzyskania odpowiedniego rozdrobnienia jak również dodatkową obróbkę chemiczną i termiczną [8].

W ostatnich dziesięciu latach wykorzystanie odpadów rolniczych jako substytutu składników betonu wykazuje tendencję wzrostową. Rodzaj wykorzystywanych odpadów rolniczych w produkcji betonu charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem i jest uzależniony od klimatu i rodzaju upraw w danym regionie. Odpady rolnicze możemy podzielić na trzy główne kategorie [8]:

- naturalne włókna roślinne,
- popiół z odpadów rolniczych,
- odpady wielozadaniowe.

Naturalne włókno roślinne jest materiałem, który jest oryginalną rośliną w przyrodzie i może być bezpośrednio stosowane do produkcji betonu. Do tej kategorii zaliczamy włókna: sizalowe, jutowe i włókna palmy daktylowej. Rośliny te mają najszerszy zasięg upraw na świecie. Do innych włókien roślinnych wykorzystywanych w kompozytach cementowych zaliczyć możemy włókna: konopi przemysłowych, ramii (pokrzywy chińskiej), słomy zbóż, hibiskusa czy lnu.

Popiół odpadowy rolniczy jest odpadem wytwarzanym w procesie produkcji rolnej i przetwarzanym najczęściej przez kalcynację w celu uzyskania materiału o właściwościach

pucolanowych. Odpady wielozadaniowe to odpady pozostające w procesie produkcji rolnej (np. łuska ryżowa) lub w wyniku spożycia produktów rolnych przez ludzi (łupina kokosa, kolba kukurydzy), które można wykorzystać w postaci kruszywa drobnego lub grubego, popiołu lub włókien w produkcji zapraw i betonów cementowych. Poniżej przedstawiono przykłady wykorzystania odpadów z produkcji rolniczej w podziale na kategorie w betonach i zaprawach cementowych.

2. Naturalne włókna roślinne

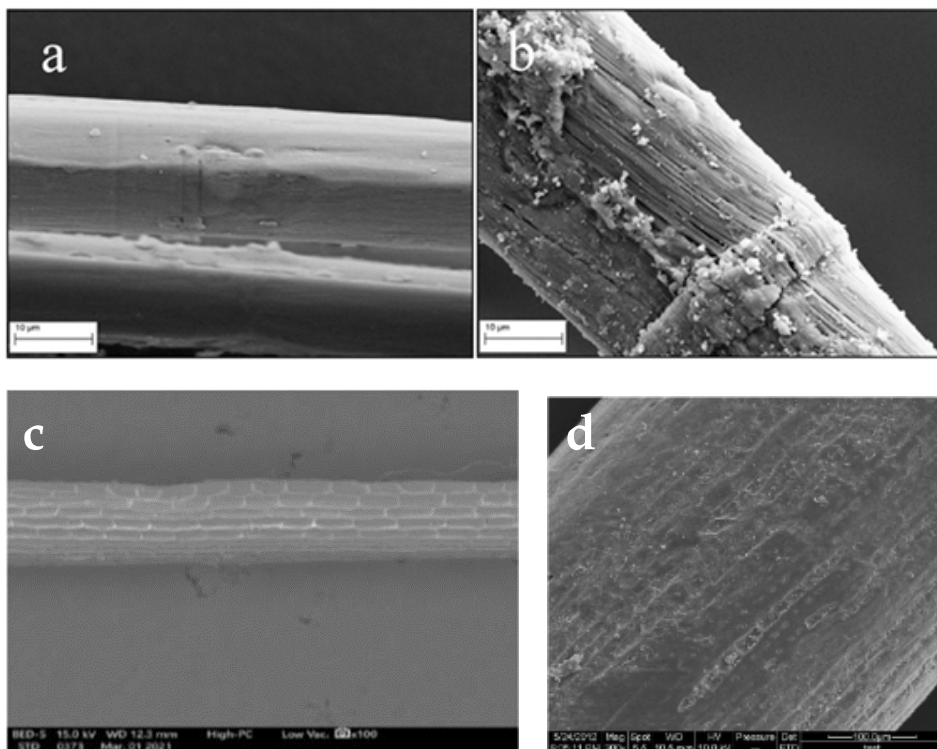
Naturalne włókna roślinne mogą znacznie zwiększyć wytrzymałość i ciągliwość kompozytów na bazie cementu. Pewne ograniczenie w ich zastosowaniu w kompozytach cementowych stanowi ich porowata struktura (rys. 1), która powoduje wysoką absorpcję wody. Zestawienie właściwości kilku naturalnych włókien stosowanych w modyfikacji betonu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Fizyczne właściwości wybranych włókien roślinnych

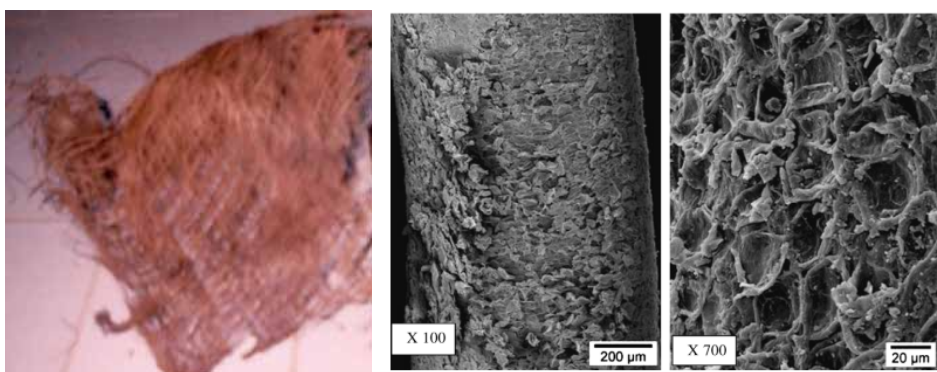
Rodzaj włókna	Długość włókna [mm]	Średnica włókna [mm]	Wytrzymałość na rozciąganie [N/mm ²]	Wydłużenie [%]	Bibliografia
Hibiskus	160-1500	0,04-0,16	18-180	12,4	[12]
Juta	120-1500	0,04-0,35		19	[12]
Konopie	40	0,016-0,05	600-700		[13]
Palma daktylowa	300-500	0,2-0,8	50		[14]
Rami (pokrzywa chińska)	4-16	0,05	500	18,2	[15]
Sizal	180-600	0,1-0,5	30-220	14,8	[12]

Włókno sizalowe (rys. 1c) jest obecnie najczęściej stosowanym włóknem roślinnym na świecie. Ma twardą teksturę i jest odporne na działanie alkaliów [12]. Włączenie włókna sizalowego do matrycy cementowej może znacznie poprawić wczesną wytrzymałość betonu, ponieważ może ono skutecznie hamować wzrost mikropęknięć [16]. Należy zauważyć, że włókno sizalowe cechuje się stosunkowo wysoką porowatością i dlatego może absorbować dużą ilość wody co znacznie osłabia wiązanie z matrycą cementową. Chropowatość powierzchni włókna można zwiększyć poprzez obróbkę alkaliczną zwiększając w ten sposób powierzchnię włókna w kontakcie z matrycą. Włókno sizalowe można poddać obróbce cieplnej w celu poprawy wydajności wiązania między włóknem a matrycą oraz zmniejszenia szybkości absorpcji wody [17].

Palma daktylowa jest jedna z najczęściej sadzonych palm na świecie. Z palmy daktylowej możemy otrzymać aż cztery rodzaje włókien: włókna z liści w szypulce, włókna z liści w łodydze, włókna odpadowe z drewna w pniu i włókna powierzchniowe wokół pnia [14]. To ostatnie włókno (rys. 2) ma najwyższą wytrzymałość na rozciąganie spośród czterech rodzajów włókien. Dodatek włókna palmy daktylowej poprawia wytrzymałość na ściskanie i odporność na pękanie betonu [14], a także poprawia izolacyjność termiczną, co ma ogromny potencjał w badaniach nad nowymi energooszczędnymi materiałami biokompozytowymi [18].



Rys. 1. Struktura naturalnych włókien roślinnych: a) i b) włókna konopi [9]; c) włókna sisalu [10] d) włókno kokosowe [11]



Rys. 2. Zdjęcie włókien z powierzchni pnia palmy daktylowej oraz obrazy SEM struktury naturalnego włókna [14]

Konopie i len są najwcześniejszymi naturalnymi włóknami roślinnymi używanymi przez ludzi. Są to włókna bogate w celulozę i wykazują silne właściwości rozciągające, słabą przewodności elektrycznej, szybką absorpcję i dyspersję wody [13]. Badania prowadzone przez [13] wykazały, że energia pęknięcia betonu zbrojonego włóknem konopnym

była o 70% wyższa niż zwykłego betonu. Dodatek włókien słomy ryżowej może zmniejszyć gęstość nasypową kompozytu cementowego o 12,4–37,3% jednocześnie i zwiększając jego wytrzymałość na zginanie o 24,3% [19].

3. Popiół z odpadów rolniczych

Większość popiołów z odpadów rolniczych jest stosowana jako częściowy zamiennik cementu lub wypełniacz w celu poprawy wydajności zaprawy lub betonu cementowego. Z uwagi na wielkość upraw największe zastosowanie odpadów rolniczych po spaleniu w materiałach na bazie cementu znajdują odpady rolnicze, których produkcja jest bardzo wysoka a ich utylizacja jest utrudniona. Do takich odpadów należą: odpady z oliwek, wyłoki z trzciny cukrowej, liście bananowca, trawa słonia czy odpady drzewne różnego pochodzenia.

3.1. Popioły z odpadów drzewnych

Spalanie odpadów drzewnych takich jak kora i trociny pozwala uzyskać średnio 6–10% popiołu drzewnego, z czego tylko 10% wykorzystuje się w przemyśle materiałów budowlanych [20]. Na właściwości fizyczne i chemiczne popiołu drzewnego wpływają spalane gatunki drzew, ich pochodzenie oraz metoda spalania. Popiół drzewny może być stosowany jako częściowy zamiennik cementu w zaprawach i betonach. Wraz ze wzrostem zawartości popiołu drzewnego, który zastosowano jako zamiennik cementu w betonie, spada wytrzymałość na ściskanie betonu [21]. Wytrzymałość na ściskanie zmniejsza się wraz ze wzrostem zawartości popiołu z odpadów drzewnych, ale wzrasta wraz z wydłużeniem czasu utwardzania. Głębokość karbonizacji betonu wykonanego z mieszanki cementu i popiołu drzewnego jest większa niż w przypadku betonu z cementu portlandzkiego, a efekt karbonizacji wzrasta wraz ze wzrostem zawartości popiołu z odpadów drzewnych w mieszance. Może to być spowodowane obniżeniem pH betonu [22]. Popiół z odpadów drzewnych może skutecznie hamować szkodliwą ekspansję spowodowaną reakcją alkaliczno-krzemową, podczas gdy rosnąca zawartość popiołu z odpadów drzewnych może zmniejszyć szybkość tej ekspansji. Jednak ze względu na opóźnione nawodnienie wolnych i całkowicie spalonych CaO i MgO, zawartość popiołu większa lub równa 20% doprowadzi do silnego pęcznienia betonu [23].

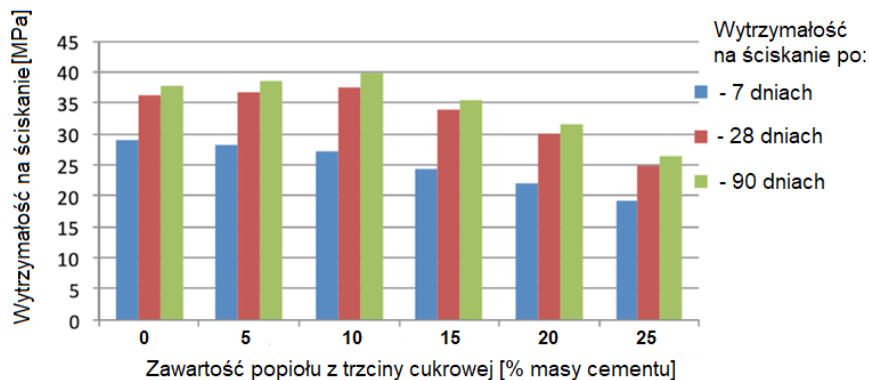
3.2. Popioły z odpadów trzciny cukrowej

Popiół ten wytwarzany jest z wycłoczyn po wyprodukowaniu cukru (rys. 3).



Rys. 3. Etapy pozyskiwania popiołu z wycłoczyn z trzciny cukrowej [24]

Popiół z wycłoczyn z trzciny cukrowej zawiera dużą ilość SiO_2 i dodany do cementu poprawia wytrzymałość betonu zarówno przez uszczelnienie struktury jak i swoje właściwości pucolanowe [24]. Wyniki badań [25] opisują wytrzymałości na ściskanie betonów, w których zastosowano popiół z trzciny cukrowej jako zamiennik cementu w ilości do 25%. Powierzchnia właściwa tego popiołu wynosiła $4716 \text{ cm}^2/\text{g}$, wskaźnik $w/s=0.42$ dla wszystkich betonów. Największy wzrost wytrzymałości zaobserwowano dla zawartości popiołu 10% (rys. 4). Badania przeprowadzone przez [26] pokazały, że popiół z trzciny cukrowej można skutecznie zastosować również jako częściowy zamiennik kruszywa drobnego.



Rys. 4. Wytrzymałość na ściskanie betonów zawierających popiół z trzciny cukrowej jako częściowy zamiennik cementu [25]

3.3. Popiół z odpadów oliwek

Odpady z oliwek zawierają miąższ oliwny, skórki i resztki oleju. Każdego roku z 3 ha drzew oliwnych wytwarza się około 1 ton pozostałości wycłoczyn (rys. 5), z których większość jest usuwana w sposób niekontrolowany. Jak pokazują badania [26] popiół z oliwek zawierający około 20% SiO_2 można wyprodukować poprzez spalanie dużych ilości odpadów oliwnych i uzyskać nowy rodzaj materiału o właściwościach pucolanowych. W produkcji betonu, chociaż popiół oliwny zagęszcza matrycę cementową i poprawia wytrzymałość betonu na ściskanie, wymaga stosunkowo dużego zużycia wody. Dlatego konieczne jest dodanie dodatków kontrolujących jego wysoką absorpcję wody, a wtedy jak pokazują badania [27] można uzyskać nawet betony o właściwościach samozagęszczalnych. W badaniach tych zastosowany popiół zawierał około 15% składników pucolanowych i został zastosowany w mieszankach SCC jako zamiennik kruszywa drobnego w ilości 45%.

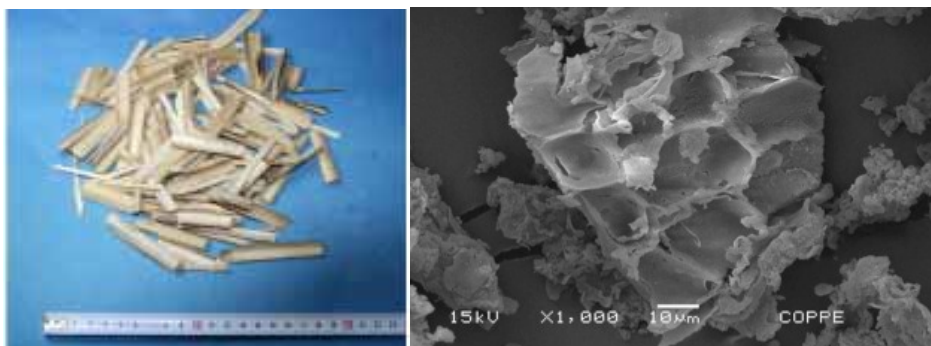


Rys. 5. Granulki z rolniczych wyłoczyn oliwek wykorzystywane jako biopaliwo [27]

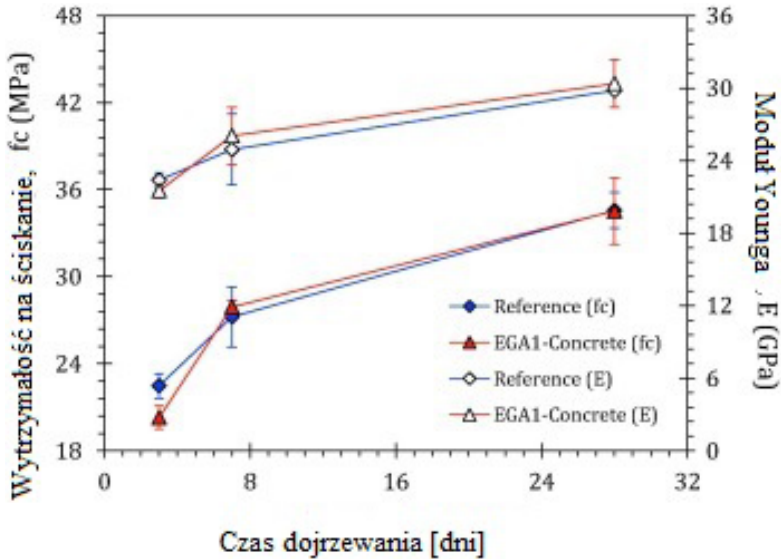
3.4. Popiół z trawy słonia

Trawa słonia jest to tropikalna trawa pochodząca z Afryki (rys. 6), która potrzebuje bardzo mało składników odżywczych i wody do wzrostu, ale można z niej produkować duże ilości popiołu po spaleniu i rozdrobnieniu [28]. W Polsce jest hodowana głównie jako roślina ozdobna. W budownictwie wykorzystywana jest do produkcji płyt izolacyjnych.

Popiół z trawy słonia zawiera dużą ilość amorficznej krzemionki, dlatego ma duży potencjał do zastosowań w materiałach budowlanych na bazie cementu. Kontrola parametrów spalania, takich jak temperatura i szybkość spalania trawy decydują o ilości i strukturze uzyskanej SiO_2 . Zastosowanie popiołu z trawy słonia w ilości 20% masy cementu pozwoliło na uzyskanie betonu konstrukcyjnego o wytrzymałości na ściskanie 35 MPa [28], a jego właściwości mechaniczne były podobne jak betonu referencyjnego (rys. 7).



Rys. 6. Posiekane włókna trawy słonia [29] i obraz SEM popiołu (EGA) z trawy słonia [28]



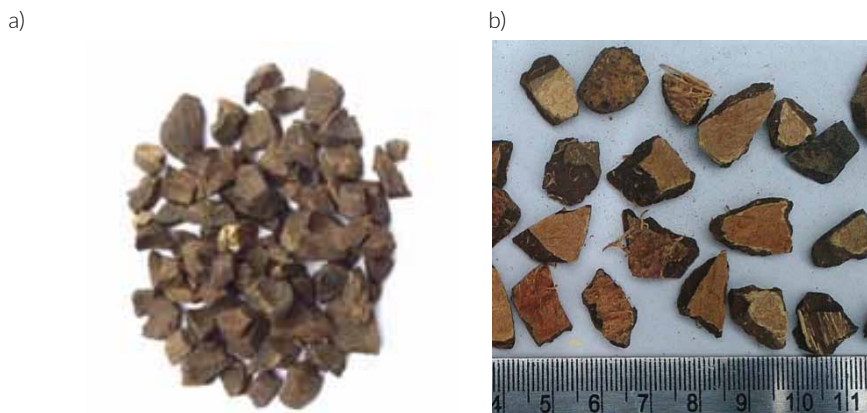
Rys. 7. Wytrzymałość na ściskanie (f_c) i moduł Younga (E) betonu referencyjnego i betonu zawierającego 20% popiołu z trawy słonia (EGA1) po 3, 7 i 28 dniach dojrzewania [28]

4. Odpady rolnicze jako zamiennik kruszywa naturalnego

Pozostałości części roślin niewykorzystane przy produkcji żywności oraz w gospodarstwie rolnym to odpady wielozadaniowe. Najczęściej wykorzystuje się je jako zamiennik kruszywa w betonie. Do takich odpadów zaliczane są przede wszystkim łupiny owoców palmy olejowej i kokosowej oraz kolby kukurydziane a także łuski ryżowe czy paździerz konopne.

4.1. Łupiny palmy olejowej i kokosowej

Produkcja oleju palmowego jest jednym z najważniejszych przemysłów rolnych w krajach, takich jak Malezja, Indonezja, Tajlandia i Nigeria. Malezja i Indonezja. Odpady stałe obejmują kłose palmy olejowej, włókno palmowe i łupiny owoców. Te ostatnie stosowane są najczęściej jako zamiennik kruszywa w betonie (rys. 8). Rocznie Malezja, Indonezja i Tajlandia produkują ponad 8 mln ton łupin [30]. Podstawowe właściwości łupin palmy olejowej (ŁPO), łupin palmy kokosowej (ŁPK) oraz kruszywa granitowego dla porównania zestawiono w tabeli 2.

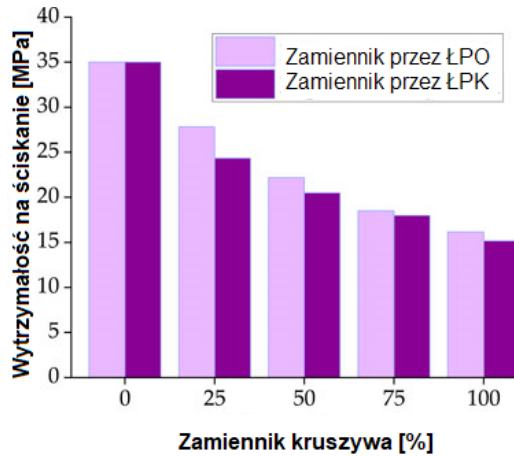


Rys. 8. Kruszywo z łupin palmowych a) palma oleista ŁPO [30], b) palma kokosowa ŁPK [31]

Tabela 2. Właściwości łupin palmy olejowej i kokosowej jako kruszywa z odpadów rolniczych i kruszonego granitu jako kruszywa konwencjonalnego [30]

Właściwości	Łupina palmy olejowej	Łupina orzecha kokosowego	Kruszony granit
Ciężar (g/cm^3)	1,17–1,37	1,05–1,2	2,60–2,70
Gęstość nasypowa (stan niezagęszczony) (kg/m^3)	510–550	–	1300
Gęstość nasypowa (stan zagęszczony) (kg/m^3)	590–600	650	1420–1470
Współczynnik pustych przestrzeni (stan niezagęszczony) (%)	63	–	52
Współczynnik porowatości (stan zagęszczony) (%)	57	–	47
24 h absorpcja wody (%)	21–33	24	<1
Wartość ścieralności Los Angeles (%)	3–5	1.63	24
Wskaźnik łuszczenia się (%)	65	–	25
Grubość skorupy (mm)	2–8	0,15–8	–
Przewodność cieplna (W/mK)	0,19	–	–
Strata przy prażeniu (%)	98–100	–	–

Porównanie wyników badań wytrzymałości na ściskanie betonów lekkich z kruszywem na bazie ŁPO i ŁPK przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Porównanie wytrzymałości na ściskanie betonów z wykorzystaniem łupin z palmy olejowej (ŁPO) i kokosowej (ŁPK) [32]

Potencjalne wykorzystanie łupin palmy olejowej jako kruszywo do betonu lekkiego w praktyce zaprezentowano na Uniwersytecie Malaysia Sabah, gdzie zbudowano tani dom (rys. 10) o powierzchni około 59 m², który znajduje się w pobliżu obszaru przybrzeżnego, gdzie roczne opady wynoszą około 2500 mm, temperatura powietrza w zakresie 23–32 °C i wilgotność względna 72–91% [33].



Rys. 10. Tani dom z lekkiego betonu z kruszywem z łupin palmy olejowej [33]

4.2. Paździerz konopne

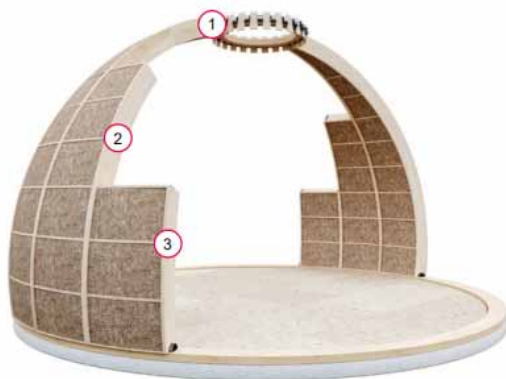
Badania nad zastosowaniem konopi włóknistych zwanych również konopiami siewnymi lub przemysłowymi w materiałach budowlanych koncentrują się na betonie konopnym zwanym hempcrete. W tym kompozycie paździerz konopne są używane jako zamiennik zwykłych kruszyw mineralnych w ilości 70-80% całego kompozytu, wraz ze spoiwem

(głównie wapnem). Prekursorem zastosowania betonu konopnego na początku lat 90-tych ubiegłego wieku była Francja, która stała się głównym producentem i transformatorem technologii betonu konopnego w Unii Europejskiej. Beton konopny zaczął być stosowany jako wypełnienie izolacyjne w ścianach, jako płyty do izolacji podłóg i fundamentów oraz do wykonywania tynków [34, 35]. Paździerz konopne wykorzystywane w połączeniu ze spoiwem wapiennym i wodą stanowią świetne wypełnienie ścian jako naturalny materiał izolacyjny o średniej gęstości i współczynniku przewodności cieplnej λ poniżej $0,1W/m \times K$ [36]. Oprócz wysokiej izolacyjności termicznej oraz akustycznej [37, 38] beton konopny ma podstawową wadę, niską wytrzymałość mechaniczną. Wytrzymałość na ściskanie betonów konopnych przy wysokim udziale paździerzy konopnych (średnio 80% objętości betonu) nie przekracza zwykle 1 MPa. Jednym z rozwiązań jest zastosowanie bardziej mocnego spoiwa, jakim jest np. cement oraz zwiększenie ilości spoiwa [39]. W celu osiągnięcia przez beton konopny wytrzymałości porównywalnej do cegły ceramicznej należy użyć w trakcie formowania elementów prasy wysokociśnieniowej [40].

Beton konopny jest materiałem naturalnym, ekologicznym, bo po zakończeniu użytkowania w pełni podlega recyklingowi. W stosunku do innych wyrobów budowlanych potrzebuje znacznie mniej energii na jego produkcję, dlatego beton konopny jest materiałem nisko przetworzonym. W Polsce wykonuje się całe domy w szkieletie drewnianym z wykorzystaniem betonu konopnego. Przykładem najnowszych polskich rozwiązań w tym zakresie mogą być modułowe domy kopułowe o szkieletie drewnianym i wypełnieniu z betonu konopnego (rys. 11) [41]. Na rys. 12 pokazano gotowy budynek o powierzchni zabudowy nie przekraczającej $35 m^2$.

WARSTWY MODUŁÓW
DO SAMODZIELNEGO MONTAŻU

- Zestaw Konstrukcja drewno C24
- Wypełnienie modułów:
hempcrete / wełna drzewna
- Stalowe mocowania modułów



Rys. 11. Warstwy budynku kopułowego [41]



Rys. 12. Dom kopułowy o powierzchni zabudowy 35 m² [41]

5. Podsumowanie

Odpady rolnicze wykazują obecnie ogromny potencjał do zastosowania w betonach i zaprawach cementowych. Z punktu widzenia sposobów zastosowania /użytkowania odpadów rolniczych w betonie można je podzielić na wymianę cementu, wymianę kruszywa i wzmocnienie matrycy cementowej włóknami roślinnymi. Z ekonomicznego punktu widzenia odpady rolnicze mogą przynieść wyjątkowo niskie koszty produkcji betonu. Odpady rolnicze mają wielką wartość w rozwoju betonu przyjaznego dla środowiska. Pełne wykorzystanie tych zasobów odpadowych może nie tylko zmniejszyć presję na środowisko spowodowaną akumulacją i spalaniem odpadów, ale także zapobiec wyczerpywaniu się zasobów naturalnych i niedoborom spowodowanym nadmiernym wydobywaniem kruszywa, a także ekologicznemu zanieczyszczeniu środowiska spowodowanemu emisją dwutlenku węgla. W przyszłości coraz więcej odpadów rolniczych będzie ponownie wykorzystywanych w produkcji materiałów budowlanych, co jest świetlaną perspektywą zrównoważonego rozwoju.

Literatura

- [1] Uratani JM, Griffiths S. A forward looking perspective on the cement and concrete industry: Implications of growth and development in the Global South. *Energy Research & Social Science* 2023, Vol. 97, 102972.
- [2] Izumi Y. et al., Calculation of greenhouse gas emissions for a carbon recycling system using mineral carbon capture and utilization technology in the cement industry. *Journal of Cleaner Production* 2021, Vol. 312, 127618.

- [3] Wu T. et al. Deciphering the CO₂ emissions and emission intensity of cement sector in China through decomposition analysis Journal of Cleaner Production 2022, Vol. 352, 131627.
- [4] Technology Roadmap: Low-Carbon Transition in the Cement Industry. IEA, 2018. <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry> (08.05.2023).
- [5] Nawaz M. et al., Geopolymers in construction - recent developments. Construction and Building Materials.2020, Vol. 260, 120472.
- [6] Hou P. et al. Mechanisms Dominating Thixotropy in limestone Calcined Clay Cement (LC3). 2020 Cement Concrete Research 2020. Vol. 140, 106316.
- [7] Salmabanu, L., Ta-Wui, C., and Ismail, L. Incorporation of Natural Waste From Agricultural and Aquacultural Farming as Supplementary Materials With Green Concrete: a Review. Composites B 2019, Vol. 175, 107076.
- [8] Wang w. et al. Agricultural and Aquaculture Wastes as Concrete Components: An Review. Frontiers in Materials. 2021, Vol. 8, str. 1-20.
- [9] Zhou X. et al. Engineering Properties of Treated Natural Hemp Fiber-Reinforced Concrete. Front. Built Environ., 2017, vol. 17. 13 June 2017.
- [10] Tunje C, Onchiri R, Thuo J. Concrete Microstructure Study on the Effect of Sisal Fiber Addition on Sugarcane Bagasse Ash Concrete. Open Civil Engineering Journal 2021. Vol. 15. 320-329.
- [11] Zhang L, Hu Y. Novel lignocellulosic hybrid particleboard composites made from rice straws and coir fibers. Materials and Design 2014, Vol. 55, 19-26.
- [12] Ramakrishna, G., and Sundararajan, T. Studies on the Durability of Natural Fibres and the Effect of Corroded Fibres on the Strength of Mortar. Cement and Concrete Composites 2005, Vol. 27, 575–582.
- [13] Merta, I., and Tschegg, E. K. Fracture Energy of Natural Fibre Reinforced Concrete. Construction Building Materials 2013, Vol. 40, 991–997.
- [14] Kriker, A., Bali, A., Debicki, G., Bouziane, M., and Chabannet, M. Durability of Date Palm Fibres and Their Use as Reinforcement in Hot Dry Climates. Cement and Concrete Composites 2008, Vol. 30, 639–648.
- [15] Wang, D. Study on the Production of Aerated Blocks With High Split Pressure Ratio and Low Shrinkage Value From Waste Hemp. New Building Materials 2013,
- [16] Bao, H. M., Meng, H. Q.. Experimental Study on Mechanical Properties of Sisal Fiber Concrete. Concrete 2011, Vol. 3, 63–66.
- [17] Li, Y., Mai, Y.-W., and Ye, L. Sisal Fibre and its Composites: a Review of Recent Developments. Composites Sci. Technology 2000, Vol. 60 (11), 2037–2055.
- [18] Benmansour, N., Agoudjil, B., Gherabli, A., Kareche, A., and Boudenne, A. Thermal and Mechanical Performance of Natural Mortar Reinforced With Date palm Fibers for Use as Insulating Materials in Building. Energy and Buildings.2014. Vol. 81, 98–104.
- [19] Xie, X.. et al. Cellulosic Fibers From Rice Straw and Bamboo Used as Reinforcement of Cement-Based Composites for Remarkably Improving Mechanical Properties. Composites Part B: Eng. 2015, Vol. 78, 153–161.
- [20] Siddique, R. Utilization of Wood Ash in Concrete Manufacturing. Resour. Conservation Recycling 2012. Vol. 67, 27–33.
- [21] Ramos, T., Matos, A. M., and Sousa-Coutinho, J. Mortar With Wood Waste Ash: Mechanical Strength Carbonation Resistance and Asr Expansion. Construction Building Mater. 2013, Vol. 49, 343–351.
- [22] Carević, I., Štirmer, N., Serdar, M., and Ukrainczyk, N. Effect of Wood Biomass Ash Storage on the Properties of Cement Composites. Materials 2021, Vol. 14, 1632.
- [23] Ukrainczyk, N., Vrbos, N., and Koenders, A. B. Reuse of Woody Biomass Ash Waste in Cementitious Materials. Chem.Biochem.Eng.Q. 2016, Vol. 30 (2), 137–148.
- [24] Prusty, J.; Patro, S.; Basarkar, S. Concrete using agro-waste as fine aggregate for sustainable built environment—A review. Int. J. Sustain. Built Environ. 2016, Vol. 5, 312–333.
- [25] Rao, M.; Prabath, N. Green Concrete using Agro Industrial Waste (Sugarcane Bagasse ASH). Int. J. Soft Comput. Eng. (IJSCE) 2015, 5, 86–92.
- [26] Al-Akhras, N. M., and Abdulwahid, M. Y. Utilisation of Olive Waste Ash in Mortar Mixes. Struct. Concrete. 2010, Vol.11 (4), 221–228.
- [27] Cuenca, J. et al.. Effects of Olive Residue Biomass Fly Ash as Filler in Self-Compacting Concrete. Construction and Building Materials 2013, Vol. 40, 702–709.
- [28] Cordeiro, G. C., and Sales, C. P. Pozzolanic Activity of Elephant Grass Ash and its Influence on the Mechanical Properties of concrete. Cement and Concrete Composites 2015, Vol. 55, 331–336.
- [29] Merta, I., and Tschegg, E. K. Fracture Energy of Natural Fibre Reinforced Concrete. Construction Building Materials 2013, Vol. 40, 991–997.
- [30] Shagif P. et al. Agricultural wastes as aggregate in concrete mixtures – A review. Construction and

- Building Materials 2014, Vol. 53, 110–117.
- [31] Idowu H. et al. Mix design and rheological properties of self-compacting coconut shell aggregate concrete. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences 2018, Vol. 13, 1465-1475.
- [32] Olanipekim, E. A., Olusola, K. O., and Ata, O. A Comparative Study of Concrete Properties Using Coconut Shell and Palm Kernel Shell as Coarse Aggregates. Building Environ. 2006, Vol. 41 (3), 297–301.
- [33] Teo DCL, Mannan MA, Kurian VJ. Structural concrete using oil palm shell (OPS) as lightweight aggregate. Turkish J Eng Environ Sci 2006, Vol. 30, 251–7.
- [34] Kosiński P. et al. Thermal Properties of Hemp Shives Used as Insulation Material in Construction Indus. Energies. 2022, Vol. 15, 2461.
- [35] Latif E, Lawrence M, Shea A, Walker P. Moisture buffer potential of experimental wall assemblies incorporating formulated hemp-lime. Build. Environ. 2015; Vol. 93, part 1, 199-209.
- [36] Elfordy S, Lucas F, Tancret F, Scudeller Y, Goudet L. Mechanical and thermal properties of lime and hemp concrete (“hempcrete”) manufactured by a projection process. Constr Build Mater. 2008; Vol. 22, 2116–2123.
- [37] Glé P, Gourdon E, Arnaud L. Acoustical properties of materials made of vegetable particles with several scales of porosity. Appl. Acoust. 2011; Vol. 72, 249-259.
- [38] Brzyski P, Gładcki M, Rumińska M, Pietrak K, Kubiś M, Łapka P. Influence of Hemp Shives Size on Hygro-Thermal and Mechanical Properties of a Hemp-Lime Composite. Materials. 2020; Vol. 13 (23), 5383.
- [39] Horszczaruk E., Rychtowski P., Łukowski P. Właściwości mechaniczne i struktura betonów konopnych w warunkach oddziaływania wysokiej temperatury. Materiały Budowlane 2023, nr 5.
- [40] Tronet P, Lecompte T, Picandet V, Baley C. Study of lime hemp concrete (LHC) - Mix design, casting process and mechanical behaviour. Cement and Concrete Composites 2016; Vol. 67, 60–72.
- [41] <https://www.domir.com.pl/wp-content/uploads/2023/01/Katalog-DOMIR.pdf> (08.03.2023)

