



CZASOPISMO TECHNICZNE KTT

KWARTALNIK KRAKOWSKIEGO TOWARZYSTWA TECHNICZNEGO

Nr 201

Rok 145

Kraków 2025 r.

Kwiecień-Czerwiec

Nr Indeksu 334006

ISSN: 1425-8390



dr inż. Jacek Długopolski ¹⁾, Prof. dr hab. inż. Maria Richert ^{2)*)},

¹⁾ AGH w Krakowie, Wydział Informatyki

²⁾ AGH w Krakowie, Wydział Zarządzania

*)autor korespondencyjny

Wpływ geometrii konstrukcji radiatora rurowego na odprowadzanie i rozpraszanie ciepła

Wstęp

Efektywna wymiana ciepła stanowi jedną z kluczowych cech wszelkich urządzeń stosowanych do schładzania lub ogrzewania powietrza i cieczy. Wymienniki ciepła mają szerokie zastosowanie w instalacjach grzewczych i ciepłownictwie oraz w urządzeniach klimatyzacyjnych i chłodniczych, w tym także pompach ciepła. Zapotrzebowanie na tego typu urządzenia ciągle wzrasta ze względu na szerokie zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, a także w gospodarstwach domowych. Poszukuje się rozwiązań o największej sprawności. Jednym ze sposobów zwiększenia intensyfikacji wymiany ciepła są zmiany geometrii radiatorów. Praca dotyczy badań nad wpływem zmian geometrii radiatora rurowego na efektywność chłodzenia. Badania objęły radiatory z rurkami żebrowanymi skrętnymi i rurkami żebrowanymi prostymi. Stwierdzono, że zwiększenie turbulencji przepływu medium schładzanego w rurkach skrętnych prowadzi do zwiększenia efektywności schładzania cieczy.

1. Wprowadzenie

Wymienniki ciepła to urządzenia służące do przenoszenia ciepła z jednego ośrodka na drugi bez mieszania obu ośrodków. Obserwuje się coraz większe zapotrzebowanie na wymienniki ciepła. Jest ono związane z zapotrzebowaniem na oszczędzanie energii, konwersję, odzyskiwanie ciepła, wprowadzanie nowych źródeł energii oraz z motoryzacją i budownictwem. Wymienniki znajdują także zastosowanie w obszarach ochrony środowiska związanych z zanieczyszczeniami termicznymi, zanieczyszczeniami powietrza, wody i utylizacją odpadów [1].

Rozwój rynku wymienników wynika z silnego zapotrzebowania na energooszczędne operacje we wszystkich gałęziach przemysłu. Urządzenia te odgrywają kluczową rolę w wymianie ciepła pomiędzy płynami, a innym medium. Mają duże znaczenie przy kontroli temperatury i odzyskiwaniu ciepła odpadowego w przemyśle.

W Stanach Zjednoczonych produkcją wymienników ciepła zajmuje się ponad 300 firm, a branża ma wartość wielu miliardów USD. Europejski rynek wymiany ciepła intensywnie się rozwija i ciągle poszukuje nowych rozwiązań, aby sprostać zmieniającym się wymaganiom procesów przemysłowych i środowisku, w którym muszą one pracować. Firmy produkcyjne wprowadziły nowe hybrydowe wymienniki ciepła, które są bardzo wydajne i elastyczne [2]. Innowacyjnym podejściem jest także wykorzystanie druku 3D do produkcji wymienników ciepła, co jest realizowane w spółkach Conflux i GKN Additive w UE. Badania wdrożeniowe wykazały, że drukowane metodą 3D wymienniki ciepła mogą być zastosowane do chłodzenia kluczowych komponentów w przemyśle elektronicznym, motoryzacyjnym i lotniczym.

W 2023 r. rynek UE był wyceniany na około 16,7 mld USD. Przewiduje się, że rynek wymienników ciepła w UE wzrośnie w latach 2024-2029 o 7,2% [3]. Wartość europejskiego rynku wymienników ciepła w roku 2024 była oceniana już na 6,3 bilionów USD. Grupa IMARC przewiduje, że rynek wymienników ciepła w roku 2033 osiągnie wartość około 9 bilionów USD, co zostało oszacowane na podstawie przewidywanego wzrostu GAR (*Średnia roczna stopa wzrostu*, z ang. "Compound Annual Growth Rate"). o 4% w latach 2025-2033 [4]. Wzrost rynku jest związany z coraz większym zapotrzebowaniem na energooszczędne rozwiązania, innowacyjne zarządzanie systemami ciepła i dążenie do zrównoważonego rozwoju [5]. Dominującym krajem w UE, w tej branży, są Niemcy. Postęp wynika z rosnącego popytu na wymienniki ciepła w takich sektorach jak HVAC (ogrzewanie, wentylacja i klimatyzacja), wytwarzanie energii i przetwarzanie chemiczne [6]. Region Europy miał największy udział w rynku wymienników ciepła w 2023 r. ze względu na inwestycje w sektorach przemysłowych i popyt ze strony branż użytkowników końcowych [7]. W odniesieniu do innych graczy światowych szacuje się, że do 2030 r. rynek wymienników ciepła w Chinach osiągnie przychody w wysokości 3 849,7 mln USD. Oczekuje się, że w latach 2024-2030 chiński rynek wymienników ciepła osiągnie założoną roczną stopę wzrostu na poziomie 6,2%. i będzie rósł w tempie

CAGR na poziomie 6,2% od 2024 r. do 2030 r. [8]. Przewiduje się także, że w regionie Azji i Pacyfiku wiodącym rynkiem regionalnym pod względem przychodów będzie chiński rynek płaszczowo-rurowych wymienników ciepła. Oczekuje się, że w latach 2025–2030 chiński rynek płaszczowo-rurowych wymienników ciepła osiągnie złożoną roczną stopę wzrostu wynoszącą 6,7 [9].

Zużycie energii pierwotnej w 2014 w UE roku wyniosło około 1600 Mtoe/r. Głównym źródłem zużycia energii były zastosowania grzewcze i chłodnicze np.: ogrzewanie pomieszczeń w budynkach (SH), chłodzenie pomieszczeń (SC), ogrzewanie wody użytkowej (CWU), a także ciepło przemysłowe, co stanowiło około 800 Mtoe/r. Za pozostałą część odpowiadał transport i zużycie energii elektrycznej 800 Mtoe/r, co daje odpowiednio 490 i 310 Mtoe/r [10].

Głównymi czynnikami wpływającym na postęp na rynku europejski jest ciągle udoskonalanie technologii wymienników ciepła w celu poprawy efektywności energetycznej, redukcji kosztów operacyjnych i wydajności. Producenci do budowy wymienników stosują nowoczesne i coraz lepsze materiały, między innymi takie jak: stopy odporne na korozję, stal nierdzewna, aluminium, w celu zwiększenia trwałości i żywotności tych urządzeń. Nowe projekty kompaktowych wymienników ciepła i systemów modułowych zwiększyły ofertę i możliwości branży. Integracja inteligentnych technologii, w tym czujników temperatury i zautomatyzowanych systemów sterowania, staje się obecnie powszechna w projektach wymienników ciepła w celu optymalizacji wydajności i monitorowania procesów w czasie rzeczywistym.

W 2024 r. największy udział w rynku wymienników miał segment typu „shell & tube”, między innymi dzięki doskonałej konstrukcji i wysokiej sprawności cieplnej. Ten typ wymienników jest obecnie szeroko stosowany w przemyśle energetycznym, przemyśle naftowym i gazowym oraz przemyśle chemicznym, gdzie panują często ekstremalne warunki wysokiego ciśnienia i temperatury [11].

Rynek europejski został podzielony na Niemcy, Francję, Wielką Brytanię, Włochy, Hiszpanię i pozostałe kraje, przy czym Niemcy obecnie dominują na tym rynku. Europejski rynek wymienników ciepła wykazuje duży potencjał wzrostu, wynikający nie tylko z rosnącej liczby zastosowań przemysłowych lecz także jest następstwem rygorystycznych przepisów dotyczących efektywności energetycznej.

Władze europejskie i międzynarodowe w coraz większym stopniu wprowadzają normy regulacyjne mające na celu zwiększenie efektywności energetycznej, aby przeciwdziałać zmianom klimatycznym i ograniczać emisję dwutlenku węgla, co jest zgodne z globalnymi celami zrównoważonego rozwoju [12].

Systemy klimatyzacyjne znajdują coraz większe zastosowanie w nowoczesnych pojazdach i stanowią kolejny krok w rozwoju branży motoryzacyjnej [13,14]. Istnieją liczne prace dotyczące poprawy parametrów i wydajności klimatyzacji samochodowej. Jednym

z diskutowanych problemów jest zmiana lokalizacji wylotu powietrza (*changing air outlet location*) [15]. Kolejne badania dotyczą kontroli przepływu czynnika chłodniczego w klimatyzacji samochodowej (*controlling refrigerant flow in automobile air conditioning*) [16]. Usprawnienia działania klimatyzatorów samochodowych obejmują szeroki zakres zagadnień, a ich celem jest dążenie do jak najbardziej wydajnej pracy klimatyzatorów przy najmniejszym wydatku energetycznym [17,18].

Cały czas trwają prace nad wzrostem wydajności wymienników ciepła. Na wzrost efektywności wymiany ciepła poprzez rozwinięcie powierzchni zwrócił uwagę w swojej monografii Śmierciw [19]. Badania nad mikro wymiennikami ciepła do schładzania układów scalonych były prowadzone w pracy [20]. Mikro wymienniki miały szereg kanalików, w których stwierdzono wyłącznie przepływ laminarny. Pomimo tego, strumień wymienianego ciepła był dość znaczny i wynosił ok. 5 kW, a współczynnik przenikania ciepła osiągał wartość 24,7 kW/m²K. Rurkowa budowa wymiennika intensyfikowała wymianę ciepła w mikro kanałach.

W rurowych wymiennikach ciepła ze spiralnymi żebrami badania wykazały mniejszą skłonność do zanieczyszczania rur, co autorzy tłumaczą zwiększoną turbulencją przepływu [21]. Badania przeprowadzone w pracy [22] dotyczyły wymienników ciepła o różnym kształcie geometrycznym. Stwierdzono, że zmiany geometrycznych parametrów wymiennika ciepła wpływają na natężenie turbulencji przepływu. Wprowadzenie do konstrukcji różnych rodzajów wkładek było główną przyczyną zwiększenia wymiany ciepła we wszystkich badanych sytuacjach. Rurki z wgłębieniami, spiralne wyciski i wstawki, między rurkami powodowały poprawę transportu ciepła. W wymienniku ciepła z rurą wgłębioną osiągnięto maksymalny współczynnik przenikania ciepła na poziomie około 9000 W/m²K. Na podstawie tych danych stwierdzono, że spiralne wkładki znacznie podniosły współczynnik przenikania ciepła przez rury. W przypadku zastosowania wkładek o podziałce 5 mm współczynnik przenikania ciepła znacznie się poprawił. Dodatkowo zaobserwowano, że szybkość wymiany ciepła miała na początku maksimum (tj. od 0,04 kg/s do 0,06 kg/s), a następnie stopniowo się zmniejszała. Stożkowy współczynnik przenikania ciepła rury był niższy niż pozostałych dwóch, rury spiralnej i śrubowej, które wykazały podobne współczynniki przenikania ciepła. Jednakże nadal istnieje niezbadany obszar, dotyczący geometrii rur i jej wpływu na transport ciepła, co może być przedmiotem przyszłych badań.

Badania wpływu geometrii wymienników ciepła na wydajność przeprowadzono także w pracy [23]. Wyniki wykazały możliwość zwiększenia wydajności wymienników ciepła poprzez wymianę rodzaju płetw i zmianę ich geometrii. Badania wykazały, że ząbkowane lamele charakteryzują się najwyższym spadkiem ciśnienia, co oznacza, że nie są dobrym wyborem dla wymienników ciepła. Półkoliste lamele miały niższy współczynnik przenikania ciepła niż półząbkowane żebra, ale wykazały niższy spadek

ciśnienia niż ząbkowane i półząbkowane płetwy. Z drugiej strony, biorąc pod uwagę termiczny parametr współczynnika wzmocnienia (TEF), który wiąże liczba Nusselta i współczynnik tarcia, półokrągłe płetwy miały najwyższą wartość TEF spośród innych typów płetw. Maksymalna wartość TEF dla płetwy półokrągłej wynosiła 0,43 i zmniejszała się poprzez zwiększenie liczby Reynoldsa do 0,35. Stwierdzono, że płetwa półokrągła była najbardziej wydajną i najbardziej odpowiednią do zastosowania opcją w porównaniu do innych typów płetw. W pracy [24] wykazano istotny wpływ żebrowania rurek na efektywność wymiany ciepła. Udowodniono, że innowacyjne konstrukcje, takie jak żebra ząbkowane i spiralne, przewyższają tradycyjne typy żebrowania pod względem wydajności wymiany ciepła, zapewniając znacznie lepsze wyniki. Ząbkowane żebra o nieregularnych krawędziach zapewniają znaczną poprawę wydajności wymienników, natomiast żebra spiralne o zwiększonej powierzchni i unikalnej geometrii charakteryzują się wyjątkową wydajnością w zakresie zwiększania wymiany ciepła. Wyraźnie gorszą wydajność wykazywały żebra pierścieniowe.

Przedstawione dane wskazują, że poprzez zmianę geometrii komponentów wymiennika można osiągnąć poprawę jego wydajności. W szczególności interesujące są wymienniki i radiatory rurowe, w których możliwe są kombinacje zmian powierzchni rur, uzyskiwane np. poprzez ich użebrowanie. Wymienniki rurowe są między innymi stosowane w klimatyzatorach samochodowych. Badania nad poprawą wydajności tych wymienników wynikają z konieczności coraz większej ochrony środowiska oraz wpływu na różne parametry samochodu np. na zużycie paliwa. Poprzez np. skrócenie długości rurowego radiatora w klimatyzacji i przez to zmniejszenie jego ciężaru istnieje możliwość zmniejszenia zużycia paliwa.

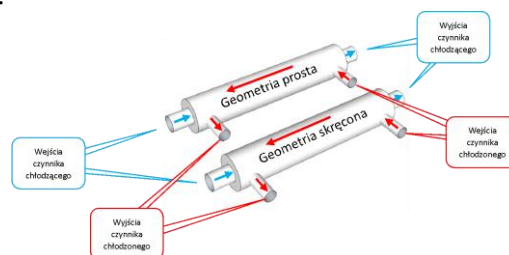
W artykule skoncentrowano się na badaniach porównawczych wydajności schładzania czynnika (glikolu) w dwóch rodzajach rurowych radiatorów, z rurkami żebrowanymi prostymi i rurkami żebrowanymi skrzyżnymi. Celem badań była ocena wpływu zmiany geometrii rurek na wydajność schładzania ciekłego medium.

2. Metodyka badań

Celem badań była porównawcza ocena wydajności schładzania ciekłego medium (glikolu) w radiatorach z rurkami wewnątrz żebrowanymi prostymi i rurkami z żebrowaniem skrzyżnymi. Taki układ może być kluczową częścią układu klimatyzacyjnego w samochodach. Postawiono hipotezę, że zmiana geometrii rurek, poprzez skrzyżowanie użebrowania, spowoduje zwiększenie turbulencji przepływu medium schładzanego i zwiększy skuteczność obniżenia temperatury medium przepływającego przez rurki.

W celu przeprowadzenia badań opracowano stanowisko laboratoryjne do badań punktowego pomiaru temperatury na długości rurek, oraz pomiaru temperatury na wlocie i wylocie medium chłodzącego

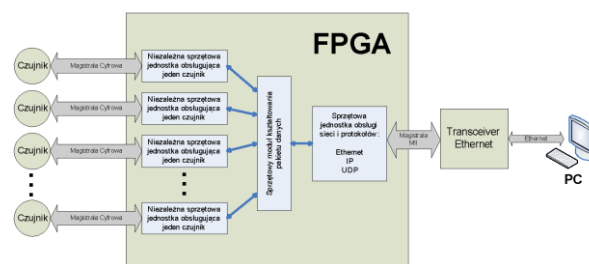
i schładzanego. Schemat konstrukcji przedstawiono na rys.1.



Rys.1. Schemat rurowych radiatorów z różną geometrią rurek, z zaznaczonymi punktami wejścia i wyjścia czynnika schładzanego i chłodzącego.

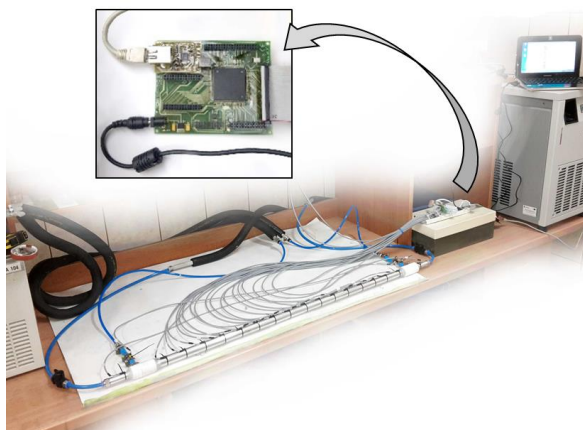
Mierzono temperaturę medium schładzanego na odpowiednich wejściach i wyjściach wymiennika, co zaznaczono na rys.1. Pomiary były dokonywane po ustabilizowanej temperaturze pracy wymiennika, czyli po uzyskaniu stałych temperatur na wejściach obydwu czynników roboczych. Medium w rurce środkowej chłodziło czynnik, który przepływał w rurce zewnętrznej. Dodatkowo badano rozkład temperatur na powierzchni rurowych radiatorów.

Aby zapewnić równoczesny pomiar temperatury w wielu miejscach wymiennika zastosowano cyfrowe czujniki temperatury typu DS18B20+ firmy MAXIM-DALLAS [25] o zakresie pomiaru temperatury od -55°C do 125°C i deklarowanej przez producenta dokładności pomiaru na poziomie 0.5%. Do pomiaru wykorzystano także programowalny układ logiczny typu FPGA Cyclone III firmy INTEL (dawniej Altera) [26] zapewniający jednoczesną, niezależną równoległą obsługę 22 czujników temperatury. Dodatkowo, do układu FPGA dołączono moduł sieciowy Ethernet Realtek RTL 8201CL [27], aby umożliwić stałe przesyłanie mierzonych wartości temperatur do zewnętrznego komputera. Opisane elementy elektroniczne i ich wzajemną współpracę przedstawiono na poglądowym schemacie połączeń elementów (rys.2).



Rys.2. Schemat połączeń elementów elektronicznych systemu pomiarowego.

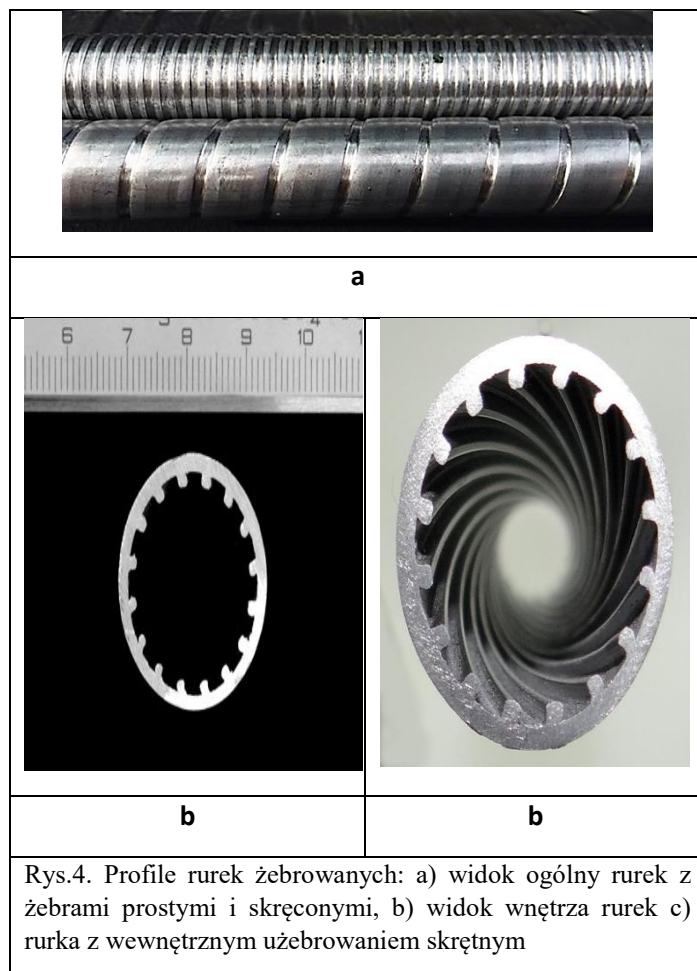
Zbudowane stanowisko pomiarowe pokazano na rys.3. Zastosowanie, w miejsce procesora, programowalnego układu FPGA pozwoliło na łatwą obsługę dużej liczby pomiarów i danych.



Rys.3. Stanowisko badawcze rurowego radiatora z zamontowanym systemem do pomiaru temperatury opartym na układzie scalonym FPGA.

Zaletą takiego rozwiązania była równoległa praca wszystkich dwudziestu dwóch torów pomiarowych, a zatem wszystkie pomiary odbywały się w tym samym czasie. Pewną niedogodnością tego rozwiązania jest dość skomplikowany i długotrwały proces tworzenia opisu konfiguracji dla układu FPGA. Proces ten polega na opracowaniu logicznej struktury dla dedykowanego układu scalonego wykorzystując wybrany język opisu sprzętu (HDL – Hardware Description Language). W celu umożliwienia automatycznego gromadzenia danych opracowano specjalny program komputerowy w języku programowania C# [28]. Program ten pozwala na obserwację wykonywanych pomiarów w czasie rzeczywistym, a także na regularne zrzucanie ich do pliku tekstowego w formacie CSV umożliwiającym późniejszą obróbkę. Program umożliwia także dodatkowo kalibrowanie czujników temperatury. Na powierzchni rury zewnętrznej radiatora czujniki pomiaru temperatury zostały rozmieszczone w odległości 5.88 cm od siebie. Stałe temperatury czynnika chłodzącego i chłodzonego zapewniały agregaty Lauda A100 i Lauda WKL 1000.

Rurki do budowy radiatorów zostały wykonane ze stopu aluminium AA3103 w zakładzie przemysłowym Grupa Kęty S.A. Zaprojektowano specjalną technologię do wyciskania rurek o wewnętrznym uźebrowaniu skrętnym, której autorem był prof. dr hab. inż. Jan Richert. Na rys.4. przedstawiono przykładowe, wyciśnięte rurki. Rys.4a przedstawia wycinki rurki z żebrami prostymi i z żebrami skręconymi. Rys.4 b i c obrazują wnętrza rurek. Z wytworzonych rurek zbudowano prototypy radiatorów do schładzania glikolu, zgodnie ze schematem przedstawionym na rys.1, i poddano badaniom. Badania objęły radiator z rurkami z uźebrowaniem prostym i radiator z rurkami z uźebrowaniem skrętnym. Wewnętrzną rurkę w radiatorze, przez którą przepływał czynnik chłodzący, stanowiła klasycznie wyciskana, gładka rurka bez żeber, także wykonana ze stopu AA3103.



Rys.4. Profile rurek żebrowanych: a) widok ogólny rurek z żebrami prostymi i skręconymi, b) widok wnętrza rurek c) rurka z wewnętrznym uźebrowaniem skrętnym

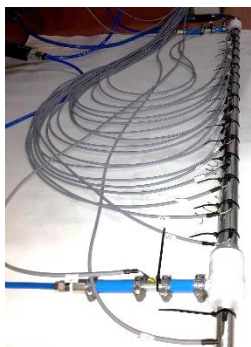
3. Wyniki badań

Radiatory do badań zbudowano zgodnie ze schematem przedstawionym na rys.1. Środkową rurką przepływał czynnik chłodzący, a zewnętrzną rurką przepływał czynnik schładzany. W zależności od zastosowanego rozwiązania rurka zewnętrzna miała wewnątrz żebra proste lub skręcone (rys.4b).

W przeprowadzanych badaniach dokonano pomiarów temperatury glikolu wprowadzanego do radiatora i temperatur na wyjściu z radiatora. Pomiary rozpoczęto po pewnym czasie pracy radiatora koniecznym do ustabilizowania przepływów.

Oprócz pomiarów temperatury na wejściu i wyjściu glikolu z radiatora przeprowadzono także pomiaru temperatury na powierzchni zewnętrznej rurek, przez które przepływało medium schładzane.

Badania temperatury na długości rury zewnętrznej przeprowadzono w celu określenia jej zmian w czasie oddziaływania medium chłodzącego. Rys. 5. przedstawia stanowisko, na którym widoczne są punkty pomiarowe na długości rurki zewnętrznej, w których przeprowadzano pomiary temperatury.

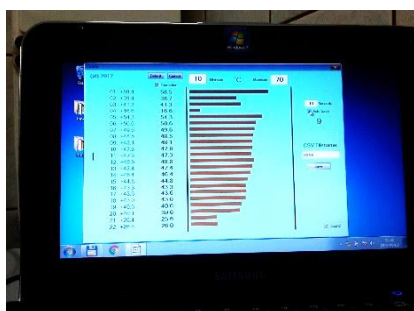


Rys.5. Punkty pomiarowe temperatury na długości rurowego radiatora

Rys.6. przedstawia schemat rozmieszczenia punktów pomiarowych na długości rurek oraz miejsce pomiaru temperatury wejścia i wyjścia medium chłodzącego i schładzanego. Pomiar temperatury na powierzchni radiatora był dokonywany w 16 punktach (1-16), w odległości co 5,88 cm. Natomiast w punktach 0 i 17 mierzone były temperatury glikolu wpływającego do radiatora i wypływającego z radiatora. Wszystkie temperatury mierzono za pomocą zaprojektowanego systemu rejestracyjnego opartego na programowalnym układzie scalonym FPGA. Przykładowe dane pomiarowe zarejestrowane w tym systemie pokazano na rys. 7.



Rys.6. Schemat punktów pomiarowych w rurowym radiatorze i zaznaczony przepływ medium chłodzącego (rura środkowa) oraz medium schładzanego (rura zewnętrzna), odległość punktów pomiarowych wynosiła 5,88cm



Rys. 7. Przykład zarejestrowanych danych pomiarowych, przy pomocy technologii FPGA

Badania pomiaru temperatury na wejściu i wyjściu medium schładzanego wykazały, że w radiatorze, w którym zastosowano rurkę żebrowaną skrętną, schładzane medium miało o 4°C niższą temperaturę na wyjściu niż medium schładzane w radiatorze, w którym zastosowano rurkę żebrowaną prostą.

Do analizy i obliczeń tych danych wykorzystano 30 pomiarów uzyskanych po ustabilizowaniu się temperatur czynników przepływających w rurkach. Wyniki pomiarów przedstawiono w Tabeli 1. Z przedstawionych danych wynika, iż temperatura czynnika schładzanego na wyjściu rurki z kanałami skręconymi jest wyraźnie niższa od odpowiadającej jej temperatury na wyjściu rurki z kanałami prostymi. Radiator z kanałami skręconymi był sprawniejszy w schładzaniu o: $14,17^{\circ}\text{C} - 10,12^{\circ}\text{C} = 4,05^{\circ}\text{C}$

Tabela 1. Dane pomiarowe na wejściu i wyjściu czynnika schładzanego, a) rurka prosta, b) rurka skrecona

Bukta granta					Bukta dēģerība						
virs		zem			virs		zem				
T1	T2	Sprems	T1	T2	Sprems	T1	T2	Sprems	T1	T2	Sprems
41.20	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.21	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.22	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.23	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.24	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.25	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.26	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.27	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.28	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.29	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.30	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.31	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.32	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.33	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.34	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.35	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.36	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.37	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.38	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.39	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.40	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.41	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.42	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.43	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.44	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.45	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.46	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70
41.47	36.50	55.80	36.40	43.20	49.30	42.10	33.50	40.80	46.40	46.50	50.70

41.20

41.30

41.40

41.50

41.20

41.30

41.40

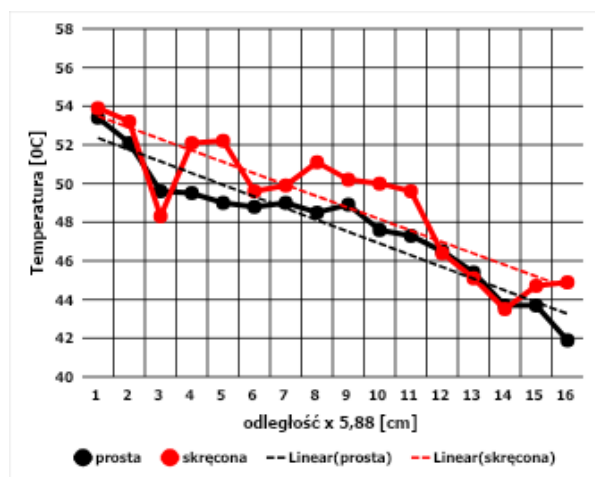
41.50

Z kolei pomiary zmian temperatury czynnika chłodzącego, przepływającego przez rurkę środkową, zaprezentowano w Tabeli 2. Z otrzymanych pomiarów wynika, iż obydwa rodzaje rurek mają podobną temperaturę czynnika chłodzącego na wyjściu. Różnica wynosi $15.23\text{ }^{\circ}\text{C} - 14.86\text{ }^{\circ}\text{C} = 0.37\text{ }^{\circ}\text{C}$, czyli jest w granicach błędu.

Tabela 2. Dane dotyczące temperatury na wejściu i wyjściu czynnika chłodzącego a) rurka prosta b) rurka skrecona

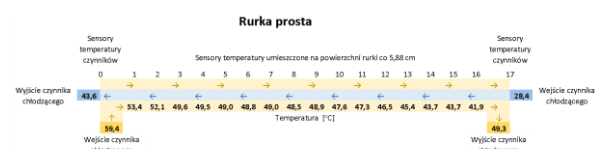
[illegible]

Dane, dotyczące zmian temperatury na długości zewnętrznych rurek dla badanych radiatorów z rurkami żebrowanymi prostymi i skrętnymi zaprezentowano także na rys. 8.

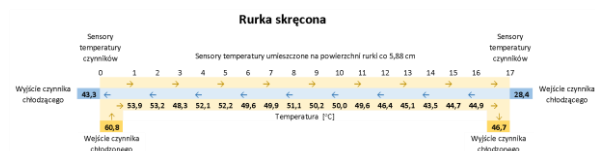


Rys.8. Wyniki pomiarów zmian temperatury na długości radiatora rurowego, dla punktów oddległych co 5,88cm, dla rurki skręconej (linia czarna) i rurki prostej (linia czerwona), zaznaczono linie trendu przebiegu zmian.

Natomiast na rys.9 i rys 10 przedstawiono wyniki badań temperatury w punktach pomiarowych na długości radiatorów obydwu typów.



Rys.9. Rozkład temperatur na długości radiatora z rurką prostą



Rys.10. Rozkład temperatur na długości radiatora z rurką skręconą

Pomiary wskazują, że na długości rurek wynoszącej ok 88 cm nastąpiło obniżenie temperatury z 53,4°C do 41,9°C w rurkach skręconych i z 53,9°C do 44,9°C w rurkach prostych. Oznacza to, że w rurkach prostych temperatura zewnętrznej powierzchni obniżyła się o 11,5°C, a w rurkach skręconych o 9°C. Uzyskany wynik wskazuje, że wypromieniowanie ciepła przez powierzchnię zewnętrzną rurki z żebrami skręconymi było efektywniejsze.

4. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania wykazały, że zmiana geometrii rurek wpływa na efektywność schładzania przepływającego medium. Uzyskany wynik potwierdza badania przeprowadzone w pracach [19,21,24] dowodzących zwiększenia efektywności wymiany ciepła w konstrukcjach o geometrii zwiększającej turbulencję przepływu cieczy.

W rurce z wewnętrznymi żebrami skręconymi oczekiwano zwiększenia turbulencji przepływu i wzrostu efektywności schładzania glikolu. Badania potwierdziły tą hipotezę. Dzięki zwiększonej turbulencji przepływu, wywołanej zmianą geometrii rurki, oziębienie glikolu było wyższe o 4,05°C.

Interesującym wynikiem był pomiar temperatury na zewnętrznej powierzchni rurek, który wykazał, że rurka ze skręconymi żebrami miała wyższą temperaturę powierzchni, co wskazuje na większą intensywność odprowadzenia ciepła do otoczenia.

Wyniki badań wskazują, że skrócenie wewnętrznego uźebrowania rurek zwiększyło intensywność schładzania glikolu. Należy zatem wnioskować, że urządzenia wykonane z tego typu rurek będą się charakteryzowały większą sprawnością.

Analizując korzyści użytkowe wynikające z potencjalnego zastosowania rurek ze skręconymi wewnętrznymi żebrami można stwierdzić, że radiator z taką konstrukcją będzie wykazywał istotne zalety, w porównaniu do radiatora z rurkami prostymi. Należą do nich:

- zmniejszenie się długość radiatora, przy tym samym skutecznym obniżeniu temperatury,
- obniżenie wagi urządzenia ze względu na krótsze długości rurek,
- w związku z tym, powinien także obniżyć się koszt urządzenia,
- w przypadku zastosowania radiatora z rurkami o skręconym wewnętrznym uźebrowaniu, np. do klimatyzacji samochodowej, ich zastosowanie powinno przełożyć się na zmniejszenie zużycia paliwa i obniżenie wielkości, ciężaru i ceny klimatyzatora, co korzystnie wpłynie na koszty eksploatacji pojazdu, a także na środowisko.

Podziękowanie: Badania zostały wykonane w ramach projektu INNOTECH-K3/IN3/2/225688/NCBR/14

Literatura

1. Shah R.K., Sekulic D.P., Fundamentals of heat exchanger design, Copyright © 2003 John Wiley & Sons, Inc. This book is printed on acid-free paper. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Published simultaneously in Canada, <https://windyhm.wordpress.com/wp-content/uploads/2008/11/fundamentals-of-heat-exchanger-design-0471321710.pdf>
2. https://www.marketresearchfuture.com/report/s/heat-exchanger-market-2963?utm_term=&utm_campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=2893753364&hsa_cam=20817078453&hsa_grp=156383738099&hsa_ad=683078494771&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-

- 2189427796921&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_n
et=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1
3. https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/hvac-system-market-202111288.html?gad_source=1&gclid=Cj0KCQIAhvK8BhDfARIsABsPy4jWK35pPixZklCFAAOL7gWIk6KXetoV12j-dATZbLYkryuMklMh2QaAhtuEALw_wcB
 4. Europe Heat Exchangers Market Size & Outlook, 2023-2030, <https://www.grandviewresearch.com/horizon/outlook/heat-exchangers-market/europe>
 5. <https://www.imarcgroup.com/europe-heat-exchanger-market>
 6. NexaMarket Intelligence, , Europe Heat Exchangers Market Analysis: A Comprehensive Overview, LinkedIn, 21 listopad 2024
 7. Heat Exchanger Market – Global Analysis and Industry Trends of the Market (2024-2030), <https://www.maximizemarketresearch.com/market-report/global-heat-exchangers-market/3346/>
 8. China Heat Exchangers Market Size & Outlook, 2023-2030
 9. China Shell And Tube Heat Exchanger Market Size & Outlook
 10. Pezzutto S., De Felice M., Fazeli R., Kranzl L., Zambotti S., Status Quo of the Air-Conditioning Market in Europe: Assessment of the Building Stock, *Energies* 2017, 10, 1253; doi:10.3390/en10091253
 11. <https://www.google.com/search?client=firefox-b-d&q=translator+polsko+angielski>
 12. Europe Plate Heat Exchanger Market Size, Report ID: GMI11246, Published Date: September 2024, <https://www.gminsights.com/industry-analysis/europe-plate-heat-exchanger-market>
 13. Agarwal N., Khan E., Automobile air conditioning system, *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, ISSN: 2395-0056 , 2018, 05, 06, <https://www.irjet.net/archives/V5/i6/IRJET-V5I6398.pdf>
 14. Reddy S.S., Akhil P., Raju N., Vishnu K., Ashok N., Analysis of Air Conditioning System used in Automobile, *International Journal of Trend in Scientific Research and Development (IJTSRD)*, 2019, 3, 3, www.ijtsrd.com e-ISSN: 2456 - 6470
 15. Lodhi A.S., Sharma G.S., Dole M., Performance optimization of an air-conditioning system of automobile vehicle by changing air outlet location, *Engineering, Environmental Science*, 2018, url={<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:199555423>}
 16. Xuquan L., Chen J., Chen Z., Liu W., Hu W., Liu X., A new method for controlling refrigerant flow in automobile air conditioning, *Applied Thermal Engineering*, 2004, 24, 1073-1085, url={<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:109789569>}
 17. Ekren O., Serhan K , Energy saving potential of chiller system with fuzzy logic control, *International Journal of Energy Research*, 2010, 34, url={<https://api.semanticscholar.org/CorpusID:110416572>}
 18. Alkan A., Kolip A., Hosoz M., Energetic and exergetic performance comparison of an experimental automotive air conditioning system using refrigerants R1234yf and R134a, *Journal of Thermal Engineering*, 2021, 7, 5, 1163–1173, DOI: 10.18186/thermal.978014
 19. Śmierciew K., Wybrane zagadnienia ciepłoprzepływowe urządzeń stosowanych w technice chłodniczej i ciepłej w ujęciu numerycznym i eksperymentalnym, Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2018, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, ISBN 978-83-65596-51-2 (eBook) https://pb.edu.pl/oficyna-wydawnicza/wp-content/uploads/sites/4/2022/07/Smierciew_Wybrane-zagadnienia-cieplo-przeplywowe.pdf
 20. Pabiś A., Charakterystyka pracy krzyżowoprądowego mikrowymennika ciepła, *CHEMIK* 2011, 65, 10, 983-990
 21. Chambon A., Anxionnaz-Minvielle Z., Cwicklinski G., Guintrand N., Buffet A., Vinet B., Shell-and-tube heat exchanger geometry modification: an efficient way to mitigate fouling, *Heat Exchanger Fouling and Cleaning*, 2017, 127-132, https://www.wieland.com/en/content/download/20587/file/2017_Guintrand_Shell-and-Tube-Heat-Exchanger-Geometry-Modification.pdf
 22. Sharma V.K., Agrawal A., Rana R.S., Thermal Performance Analysis of Heat Exchanger Due to Geometrical Parameter Changes in The Tube: A Review, *International Journal of Research Publication and Reviews*, 2024, 5, 7, 638-646
 23. Zarabadi S.A., Rajabpour A., Sadatsakkak S., Effect of Fin Geometry on the Performance of Tubular-Fin Heat Exchangers: a Computational Fluid Dynamics Study, *Journal of Heat and Mass Transfer Research*, 2021, 8, 163- 171, https://jhmr.semnan.ac.ir/article_5183_c0a642ae2f482ccc53529b6295f5479a.pdf
 24. Ramadan K.A.A., Ślusarsky K.V., Effect of Fin Type and Geometry on Thermal and Hydraulic Performance in Conditions of Combined-Cycle Nuclear Power Plant with High-Temperature Gas-Cooled Reactors,

- Thermo 2024, 4(3), 382-393;
<https://doi.org/10.3390/thermo4030020>
25. Czujnik temperatury DS18B20,
<https://www.maximintegrated.com/en/products/s/analog/sensors-and-sensor-interface/DS18B20.html>
26. Układ FPGA Cyclon III EP3C25,
<https://www.altera.com/products/fpga/cyclon/eseries/cyclone-iii/overview.html>
27. Układ scalony Realtek RTL8201CL,
<http://www.realtek.com.tw/products/products/View.aspx?Langid=1&PNid=17&PFid=13&Lev el=5&Conn=4&ProdID=25>
28. Język programowania C#,
[https://msdn.microsoft.com/enus/library/a72418yk\(v=VS.100\).aspx](https://msdn.microsoft.com/enus/library/a72418yk(v=VS.100).aspx)

Streszczenie

Praca dotyczy badań nad wpływem geometrii rurek w rurowych radiatorach na efektywność schładzania ciekłego medium – glikolu. Badano dwa typy rurowych radiatorów. W jednym zastosowano rurki uźebrowane wewnątrz, o prostym przebiegu radialnym wzdłuż długości rurki, a w drugim zastosowano rurki, w których radialne żebra wewnętrzne były skręcone. Badano temperaturę glikolu wpływającego do radiatorów i wypływającego z radiatorów, po schłodzeniu. Pomiary przeprowadzono po ustabilizowaniu przepływów. Stwierdzono, że schłodzenie glikolu w radiatorze z rurkami z żebrami skręconymi było efektywniejsze. Dzięki zwiększonej turbulencji przepływu, wywołanej zmianą geometrii rurki, oziębienie glikolu było wyższe o 4,05oC w stosunku do radiatora z rurkami o prostym przebiegu żeber. Ponadto przeprowadzono także pomiary temperatury zewnętrznej powierzchni rurek w radiatorach, które wykazały, że rurki uźebrowane skrętnie efektywniej odprowadzały ciepło. Uzyskany wynik wskazuje na możliwość skrócenia długości rurek o uźebrowaniu skrętnym w radiatorach, przy zachowaniu wymaganej intensywności schładzania przepływającego medium. Może to skutkować zmniejszeniem ciężaru i kosztów wykonania radiatora. W przypadku zastosowania takiego rozwiązania w klimatyzatorach samochodowych może także prowadzić do zmniejszenia zużycia paliwa.

Słowa kluczowe: radiatory rurowe, wymiana ciepła, układy FPGA

Abstract

The work concerns research on the influence of the geometry of the tubes in the tubular radiators on the efficiency of cooling a liquid medium - glycol. Two types of tubular radiators were tested. One used internally finned tubes with a straight radial course along the length of the tube, and the other used tubes in which the radial internal ribs were twisted. The temperature of the glycol flowing into and out of the radiator after cooling was tested. Measurements were carried out after the flows had stabilized. It was found that cooling the glycol in a radiator with twisted-ribs tubes was more effective. Due to the increased flow turbulence caused by the change in the tube geometry, the cooling of the glycol was 4.05oC higher compared to the radiator with tubes with straight ribs. In addition, measurements of the temperature of the outer surface of the tubes in the radiators were also carried out, which showed that twisted-ribbed tubes dissipated heat more effectively. The obtained result indicates the possibility of shortening the length of twisted-ribbed tubes in radiators while maintaining the required cooling intensity of the flowing medium. This may result in a reduction in the weight and cost of the radiator. If this solution is used in car air conditioners, it may also lead to reduced fuel consumption.

Keywords: tubular radiators, heat exchange, FPGA systems

Metody przerobu kruszyw budowlanych z recyklingu

1. Wprowadzenie.

Recykling kruszyw budowlanych stał się kluczowym elementem dążenia do zrównoważonego rozwoju w sektorze budownictwa. Wzrost świadomości ekologicznej oraz rosnące zapotrzebowanie na surowce budowlane wymusiły poszukiwanie alternatywnych źródeł materiałów. Jednym z rozwiązań jest ponowne wykorzystanie materiałów pochodzących z rozbiórek budowlanych, takich jak kruszywa betonowe, ceglane czy asfaltowe. Dzięki takim działaniom możliwe jest zmniejszenie zapotrzebowania na naturalne surowce, redukcja odpadów budowlanych oraz ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko (Zhou et al., 2020).

Wykorzystanie recyklingowanych kruszyw wiąże się jednak z koniecznością zastosowania odpowiednich metod przerobu, które umożliwią uzyskanie materiałów o parametrach technicznych zgodnych z wymaganiami przepisów budowlanych. Przerób takich kruszyw może przybierać różne formy, począwszy od mechanicznego rozdrabniania, przez przesiewanie, aż po bardziej zaawansowane technologie, takie jak obróbka chemiczna czy termiczna. Celem każdej z tych metod jest uzyskanie materiału o odpowiedniej jednorodności, frakcji i wytrzymałości, co jest szczególnie istotne przy jego dalszym zastosowaniu w budownictwie (Löfgren & Löfgren, 2019). W zależności od przeznaczenia, kruszywa te mogą być wykorzystywane w różnych zastosowaniach – od fundamentów, przez warstwy nośne w drogownictwie, aż po produkcję betonu.

Kruszywa z recyklingu charakteryzują się specyficznymi właściwościami mechanicznymi, które mogą różnić się od właściwości kruszyw naturalnych, co może wpływać na jakość i trwałość materiałów budowlanych. W związku z tym kluczowe jest zapewnienie odpowiednich metod kontroli jakości oraz dostosowanie parametrów surowca do wymagań budowlanych (Hansen, 2018). Recykling kruszyw wymaga również ścisłej współpracy między przemysłem budowlanym, naukowcami a organami regulacyjnymi, aby zagwarantować, że wykorzystywane materiały są zarówno bezpieczne, jak i efektywne.

W ostatnich latach, w odpowiedzi na rosnącą potrzebę ograniczania zużycia zasobów naturalnych i zmniejszania śladu węglowego w budownictwie,

wprowadzono szereg innowacyjnych technologii i metod przerobu kruszyw. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych technologii, takich jak zaawansowane maszyny do selektywnego rozdrabniania czy innowacyjne metody wzmacniania materiału, możliwe jest osiągnięcie właściwości, które mogą dorównywać lub nawet przewyższać te charakterystyczne dla kruszyw naturalnych. Przykładem takich rozwiązań są technologie obróbki termicznej, które poprawiają wytrzymałość i trwałość recyklingowanych materiałów (Löfgren & Löfgren, 2019).

Podjęcie szerokiej gamy działań na rzecz przerobu i wykorzystania kruszyw z recyklingu staje się nie tylko korzyścią ekonomiczną, ale także istotnym krokiem w stronę zrównoważonego budownictwa. Potencjał tych materiałów w kontekście przyszłych inwestycji budowlanych jest ogromny, a dalszy rozwój technologii recyklingu może znacząco wpłynąć na obniżenie kosztów budowy, zwiększenie efektywności wykorzystania zasobów oraz poprawę jakości środowiska.

Artykuł omawia metody przerobu kruszyw budowlanych z recyklingu, koncentrując się na trzech głównych zagadnieniach. Pierwszym jest kontrola jakości kruszyw w betonie, w tym badanie ich właściwości mechanicznych i chemicznych, które muszą spełniać normy budowlane. Drugim tematem jest przerób odpadów budowlanych, obejmujący technologie rozdrabniania, obróbki chemicznej oraz wyzwania związane z usuwaniem zanieczyszczeń. Trzecim zagadnieniem są założenia technologiczne przerobu gruzu budowlanego, w tym etapy procesu oraz rola innowacyjnych technologii. Artykuł podkreśla znaczenie recyklingu w zrównoważonym rozwoju budownictwa.

2. Kontrola jakości kruszyw z recyklingu w betonie.

Norma PN-EN 12620 klasyfikuje kruszywa do betonu na naturalne, recyklingowe i sztuczne. Producent kruszyw recyklingowych, podobnie jak w

przypadku kruszyw naturalnych, musi przeprowadzać wstępne badania typu oraz prowadzić stałą kontrolę jakości, co zwiększa koszty ich wprowadzenia na rynek (PN, 2008). Główna różnica między kruszywami naturalnymi a recyklingowymi wynika ze zmienności surowca, która zależy od właściwości elementu budowlanego, z którego materiał pochodzi (Badziąg, 2012).

Właściwości kruszyw recyklingowych, takie jak wysoka nasiąkliwość i rozwinięta powierzchnia ziaren, mają istotny wpływ na konsystencję mieszanki betonowej oraz właściwości reologiczne i mechaniczne betonu (Fardis, 2011). Zaleca się wstępne nasycanie kruszywa wodą lub dozowanie dodatkowej wody zarobowej, aby ograniczyć niekontrolowaną utratę konsystencji (Badziąg, 2012). Kruszywa recyklingowe charakteryzują się niższą gęstością i wytrzymałością na ściskanie w porównaniu do naturalnych, co ogranicza ich zastosowanie do betonów o niższych klasach wytrzymałości (Corinaldesi, Isolani, Moriconi, 2017).

Zastąpienie naturalnych kruszyw grubych recyklatem obniża wytrzymałość betonu – dla 20% i 40% dodatku kruszywa TYP I wytrzymałość wynosiła odpowiednio 96% i 84% wytrzymałości referencyjnej, a dla TYP II – 87% i 81% (Badziąg, 2012). Poprawę parametrów betonu z recyklingu można osiągnąć poprzez zmniejszenie stosunku woda/cement z użyciem superplastyfikatorów, co pozwala na produkcję betonu o klasie wytrzymałości 30–35 MPa (Corinaldesi, Isolani, Moriconi, 2017).

Tabela 1. Udział kruszyw wtórnych w materiałach.

L.p.	Składnik	Kruszywo TYP I udział w [%]	Kruszywo TYP II udział w [%]
1	Beton, kruszywo naturalne niewiązane	90.0	70.0
2	Zaprawa, wyprawa tynkarska	4.3	14.0
3	Elementy ceramiczne	4.3	14.0
4	Inne składniki mineralne w tym beton komórkowy, beton lekkie	0.9	1.4

5	Destrukt asfaltowy	0.4	0.5
6	Zanieczyszczenia w tym gips, papier, szkło, drewno, tworzywa sztuczne	0.1	0.2

Źródło: Badziąg, 2012.

Różnice w regulacjach międzynarodowych dotyczących zawartości recyklatu w betonie wynikają z różnych wymagań dotyczących nasiąkliwości i poziomu zanieczyszczeń. Na przykład w Niemczech dopuszcza się do 90% kruszywa betonowego o nasiąkliwości do 10%, podczas gdy w Portugalii i Australii obowiązują podobne ograniczenia (de Andrade Salgado, de Andrade Silva, 2022).

Betony z kruszywem recyklingowym charakteryzują się niższym modułem sprężystości, wytrzymałością na rozciąganie oraz wyższym skurczem plastycznym i pęczaniem. Mogą być stosowane w środowiskach, gdzie nie występują agresywne czynniki, oraz w miejscach o niskim zagrożeniu karbonizacją (Badziąg, 2012). Kluczowe znaczenie ma niski poziom zanieczyszczeń kruszywa, który wpływa na trwałość betonu, jego odporność na mróz oraz jakość wykończenia powierzchni (Kulekci, Yilmaz, Cullu, 2021).

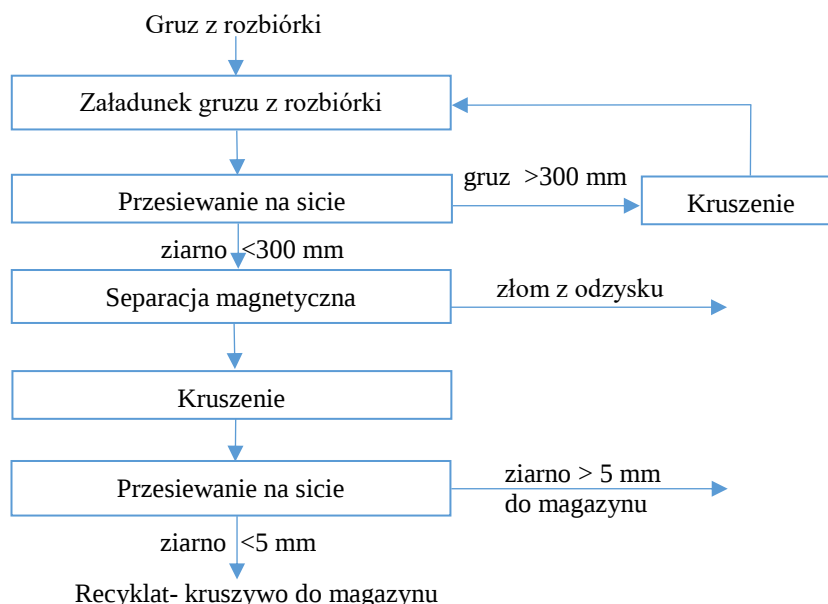
Analizy wykazały, że beton z kruszywem gruboziarnistym z recyklingu, zawierający cegły i płytki, osiąga wytrzymałość na poziomie 75–85% wytrzymałości betonu naturalnego. Gruz budowlany można przekształcić w użyteczne kruszywo, jednak proces ten wymaga odpowiedniego przetwarzania (Chen, Yen, Chen, 2003).

3. Przerób odpadów z recyklingu.

Recykling gruzu budowlanego to złożony proces przetwarzania materiałów pochodzących z rozbiórek i wyburzeń. Proces ten rozpoczyna się od robót wyburzeniowych, cięcia i rozkruszania elementów betonowych, a następnie kruszenia i przesiewania gruzu budowlanego oraz porozbiórkowego w celu uzyskania wartościowego surowca wtórnego. Istnieje wiele powodów rosnącego zainteresowania recyklingiem gruzu budowlanego. Przede wszystkim jest to potrzeba zagospodarowania odpadów oraz uporządkowania placów budowy, ponieważ materiały z wyburzeń nie

mogą być traktowane na równi z innymi odpadami, szczególnie tymi, które nie podlegają recyklingowi. Ponadto recykling materiałów budowlanych znacząco zmniejsza zużycie surowców naturalnych, co ma szczególne znaczenie w kontekście dynamicznego rozwoju budownictwa oraz rosnącej

Schemat produkcji kruszywa z recyklingu.



Źródło: Chen, Yen, Chen, 2003

Recykling gruzu budowlanego poprawia również ekonomikę projektów budowlanych, m.in. dzięki ograniczeniu kosztów transportu oraz unikaniu opłat za składowanie odpadów, co jest szczególnie istotne w miastach, gdzie dostępność składowisk jest ograniczona. Redukcja transportu wpływa na zmniejszenie zużycia paliw, emisji hałasu i pyłu, co ma pozytywny wpływ na środowisko (Xiao et al., 2005). W Polsce, na mocy ustawy o odpadach z dnia 27 kwietnia 2001 r., wytwórcy odpadów budowlanych mają obowiązek ich odzysku, unieszkodliwienia lub przekazania uprawnionym podmiotom. Podobne regulacje obowiązują w całej Unii Europejskiej, gdzie wprowadzane są coraz bardziej rygorystyczne wymogi dotyczące składowania odpadów i recyklingu, co dodatkowo motywuje do wdrażania nowoczesnych technologii (Al-Bibassi et al., 2020).

Recykling gruzu budowlanego staje się szczególnie opłacalny w przypadkach, gdy składowanie odpadów generuje wysokie koszty, transport gruzu na duże odległości jest nieekonomiczny, rozbiórki prowadzone są w centrach miast, lub w gruzie znajduje się stal, którą po odzyskaniu można sprzedać. Gruz betonowy i ceglany, po mechanicznym przetworzeniu

liczby wyburzeń, które stanowią potencjalne źródło surowców wtórnych (Gonzalez-Montijo et al., 2019).

i uszlachetnieniu na kruszywo recyklingowe, znajduje szerokie zastosowanie w budownictwie i drogownictwie. Może być używany do produkcji betonów, formowania i zagęszczania terenu, wykonywania podbudowy i warstw wiążących dróg oraz utwardzania placów i parkingów. W przypadku ciągów chodnikowych i dróg dojazdowych kruszywo recyklingowe jest często wykorzystywane jako zamiennik żwiru lub kruszonego kamienia, co przyczynia się do ograniczenia eksploatacji zasobów naturalnych i zmniejszenia degradacji środowiska (Exteberria et al., 2006).

Proces recyklingu gruzu budowlanego wymaga odpowiedniego przygotowania surowca. Kluczowe znaczenie ma wstępne kruszenie i segregacja gruzu, ponieważ nieodpowiednia wielkość materiału wstępnego może obniżyć wydajność kruszarki. Długie elementy metalowe, takie jak pręty zbrojeniowe, powinny zostać usunięte, a stal oddzielona przy użyciu separatorów magnetycznych. Złom żelazny uzyskany w tym procesie może być sprzedany, natomiast odzielony gruz kierowany jest do dalszej obróbki. W zależności od wymagań jakościowych oraz wielkości materiału końcowego stosuje się różne techniki kruszenia i przesiewania (He, 2023).

W aglomeracjach miejskich istotnym czynnikiem ekonomicznym jest bliskość źródła surowca. Gruz budowlany, dostępny „na miejscu”, może być bardziej opłacalny niż transport kruszywa naturalnego na odległość przekraczającą 30 km (Tam et al., 2005). Nowoczesne metody recyklingu, takie jak C2CA, pozwalają na uzyskanie wysokiej jakości kruszyw gruboziarnistych oraz użytecznej frakcji drobnej, która dzięki wysokiej zawartości wapnia może być stosowana w produkcji cementu. Przykłady takich technologii zostały przedstawione m.in. przez Gonzaleza oraz brazylijskich naukowców, którzy opracowali proces łączący obróbkę mechaniczną, kruszenie w kruszarce szczękowej oraz czyszczenie w bębnie obrotowym.

Wysoka zawartość zaprawy w kruszywach recyklingowych (nawet do 41% objętości gruzu betonowego) może stanowić wadę, jednak odpowiednie procesy mechaniczne pozwalają poprawić ich właściwości. Usunięcie przylegającej zaprawy oraz zmniejszenie rozmiaru frakcji poprzez tarcie prowadzi do uzyskania kruszyw o jakości zbliżonej do kruszyw konwencjonalnych (Pavlu et al., 2021; Zhang et al., 2023). W zależności od przeznaczenia końcowego, stosuje się różne etapy kruszenia i sortowania, co umożliwia efektywne wykorzystanie tego wartościowego surowca wtórnego.

4. Założenia koncepcji technologicznej przerobu gruzu budowlanego.

Recykling gruzu budowlanego, w tym wstępne kruszenie, stanowi kluczowy etap procesu przetwarzania materiałów pochodzących z rozbiórek i wyburzeń. W tym procesie istotne jest prawidłowe przygotowanie materiału nadawy, które ma wpływ na wydajność i efektywność całego procesu. Wielkość materiału nadawy powinna być dostosowana do możliwości technologicznych urządzeń kruszących. Zbyt duże fragmenty, takie jak pręty zbrojeniowe o długości przekraczającej rozmiar gardzieli komory kruszącej, mogą zakłócić pracę maszyny, dlatego muszą zostać usunięte. Pręty zbrojeniowe o długości nieprzekraczającej 500 mm, które nie mieszczą się w komorze kruszącej, również należy usunąć, aby uniknąć uszkodzenia urządzenia (He, 2023). W przypadku kruszarki szczękowej, stosowanej do wstępnego kruszenia gruzu, wszelkie elementy metalowe, w tym pręty zbrojeniowe o średnicy większej niż 20 mm, muszą zostać usunięte przed wprowadzeniem materiału do komory kruszącej.

Zwykły proces recyklingu gruzu budowlanego obejmuje szereg etapów, takich jak wstępne kruszenie, przesiewanie i sortowanie. Celem tych działań jest usunięcie zanieczyszczeń mechanicznych, takich jak pręty zbrojeniowe, plastik czy szkło, oraz uzyskanie materiału o odpowiednich właściwościach. Na pierwszym etapie gruz budowlany jest przesiewany, aby rozdzielić materiał o frakcji większej niż 300 mm, który następnie trafia do dalszego kruszenia i ponownego przesiewania. Frakcje mniejsze niż 300 mm poddawane są separacji magnetycznej, która umożliwia odzyskanie żelaza, a pozostały materiał jest dalej przetwarzany (Gonzalez-Montijo et al., 2019). Przeprowadzenie tej operacji pozwala uzyskać czysty złom żelazny, który może zostać sprzedany, oraz materiał budowlany pozbawiony elementów metalowych, gotowy do dalszego kruszenia.

Kolejnym etapem jest dalsze kruszenie materiału, który po separacji magnetycznej nadal może zawierać elementy o zbyt dużych rozmiarach. Frakcje o średnicy większej niż 20 mm trafiają do kruszarki wtórnej, takiej jak kruszarka udarowa lub obrotowa, które umożliwiają dalsze zmniejszenie wielkości cząstek. Metody mechaniczne, takie jak zastosowanie wirnika mimośrodowego, kruszarki ślimakowej lub ulepszonej kruszarki szczękowej, pozwalają na precyzyjniejsze przetwarzanie gruzu, dzięki czemu uzyskiwane kruszywa stają się bardziej jednolite i osiągają jakość porównywalną z kruszywami konwencjonalnymi (Xiao et al., 2005).

Zaawansowane metody mechaniczne polegają na ciągłym tarcu między cząstkami materiału, co prowadzi do usuwania przylegającej zaprawy i zmniejszania wielkości cząstek kruszywa. Dzięki temu procesowi możliwe jest uzyskanie kruszyw o wyższej jakości, które mogą być wykorzystywane w budownictwie i drogownictwie. Ostatecznym celem jest uzyskanie frakcji kruszyw o rozmiarach mniejszych i większych niż 5 mm, które są gotowe do użycia w produkcji betonu, formowaniu nawierzchni drogowych oraz innych zastosowaniach budowlanych (Exteberria et al., 2006).

Tabela 2. Klasyfikacja jakościowa kruszyw R powiązana z wymogami norm materiałów drogowych.

Kryteria oceny kruszywa		Wymagania techniczne			Badania wg normy
Jednostka		Klasa I	Klasa II	Klasa III	
1	2	3	4	5	6
Uziarnienie	mm	Kruszywo sortowane: 4÷8; 8÷16; 16÷31,5; 20÷40; 40÷60; 60÷80; Grupy frakcji: 4÷16; 8÷20; 16÷40; 20÷60; 20÷80; Mieszanka kruszywa: 0÷4; 0÷8; 0÷16; 0÷31,5.		Kruszywo sortowane: 0÷4 (ciągłe); Grupa frakcji: 0÷80 (ciągłe); Mieszanka kruszywa: 0÷150 (ciągłe).	PN-91/B-06714/15
Pyły mineralne (poniżej 0,05)	% masy	max 3,0	max 5,0		PN-78/B-0714/13
Zanieczyszczenia obce	% masy	max 1,0	max 1,5		PN-76/B-06714/12
Ziarna nieforemne	% masy	max 20,0	max 40,0		PN-78/B-06714/16
Zawartość związków siarki w przeliczeniu na SO	% masy	max 1,0	max 1,5		PN-78/B-0714/28
Nasiąkliwość wodna	% masy	max 5,0	max 8,0		PN-77/B-06714/18

Źródło: Polski Komitet Normalizacyjny, 1991.

Schemat ideowy procesu recyklingu gruzu budowlanego przedstawia kolejne etapy przetwarzania, w tym rozdział na frakcje o różnych wielkościach, kruszenie, przesiewanie, separację magnetyczną oraz odzyskiwanie surowców wtórnych, takich jak złom żelazny. Dzięki temu procesowi możliwe jest nie tylko zagospodarowanie odpadów budowlanych, ale także uzyskanie wartościowego materiału, który może być ponownie wykorzystany w różnych gałęziach przemysłu budowlanego (Pavlu et al., 2021). Recykling gruzu budowlanego staje się kluczowym elementem nowoczesnej gospodarki o obiegu zamkniętym, przyczyniając się do zmniejszenia zużycia surowców naturalnych oraz poprawy efektywności energetycznej w budownictwie. Wdrożenie zaawansowanych technologii mechanicznych umożliwia efektywne przetwarzanie gruzu, co przekłada się na korzyści zarówno ekologiczne, jak i ekonomiczne (Zhang et al., 2023).

5. Podsumowanie.

Dzięki nowoczesnym technologiom możliwe jest uzyskanie wysokiej jakości materiałów z gruzu budowlanego, które znajdują szerokie zastosowanie w branży budowlanej i drogownictwie. Jednym z wyzwań związanych z wykorzystaniem kruszyw z recyklingu jest ich jakość, różniąca się od materiałów naturalnych. Wymaga to szczególnej uwagi podczas projektowania betonów, gdzie odpowiednie badania, stosowanie dodatków oraz kontrola stosunku woda/cement mogą poprawić parametry gotowego produktu. Ważne jest również ograniczenie zanieczyszczeń i kontrola nasiąkliwości, co bezpośrednio wpływa na trwałość i wytrzymałość betonu. Proces recyklingu gruzu budowlanego obejmuje kilka kluczowych etapów: rozbiórkę, segregację, kruszenie i przesiewanie materiałów. Dzięki zastosowaniu nowoczesnych technologii, takich jak separacja magnetyczna czy zaawansowane kruszarki, możliwe jest efektywne przetwarzanie odpadów na wysokiej jakości surowce wtórne. Recykling ten nie tylko wspiera ochronę środowiska, ale również wpływa korzystnie na ekonomię projektów budowlanych, redukując koszty transportu oraz emisję zanieczyszczeń. Koncepcja technologiczna przetwarzania gruzu

budowlanego opiera się na precyzyjnym przygotowaniu materiału oraz zastosowaniu zaawansowanych metod kruszenia i sortowania. Wprowadzenie innowacyjnych rozwiązań pozwala uzyskać jednorodne kruszywa o wysokiej jakości, które mogą być ponownie wykorzystane w produkcji betonu i w budowie dróg. W ten sposób proces recyklingu przyczynia się do ochrony zasobów naturalnych i minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko, stanowiąc istotny element zrównoważonego rozwoju w budownictwie.

Recykling kruszyw budowlanych przynosi liczne korzyści ekologiczne, ekonomiczne i technologiczne, jednocześnie stawiając przed branżą budowlaną pewne wyzwania. Przed wszystkim proces ten przyczynia się do ochrony środowiska, zmniejszając eksploatację surowców naturalnych, ograniczając ilość odpadów budowlanych oraz redukując emisję zanieczyszczeń. To działanie wspiera ideę zrównoważonego rozwoju i promuje gospodarkę o obiegu zamkniętym. Dodatkowo wykorzystanie materiałów z recyklingu może znacząco obniżyć koszty budowy, szczególnie w zakresie transportu i zakupu nowych surowców, co czyni tę metodę atrakcyjną z perspektywy finansowej. Kruszywa z recyklingu znajdują zastosowanie w budownictwie i drogownictwie, o ile ich jakość odpowiada wymaganym standardom. Kluczowe jest tutaj odpowiednie przygotowanie materiałów oraz kontrola ich właściwości, takich jak nasiąkliwość czy wytrzymałość. Wprowadzenie kruszyw wtórnych wymaga zaawansowanych technologii i innowacyjnych rozwiązań projektowych, które umożliwią dostosowanie proporcji składników betonu oraz zapewnią jego wysoką trwałość. W tym kontekście istotną rolę odgrywają badania naukowe oraz normy regulujące jakość i bezpieczeństwo stosowania tego typu materiałów. Inwestowanie w recykling kruszyw budowlanych ma długoterminowe korzyści, pozwalając zmniejszyć negatywny wpływ branży budowlanej na środowisko. Dzięki temu procesowi możliwe jest ograniczenie zużycia zasobów naturalnych oraz minimalizacja odpadów, co jest szczególnie ważne w obliczu globalnych wyzwań związanych z ochroną klimatu. Recykling kruszyw, choć wymaga nakładów na rozwój technologii i edukację, staje się jednym z kluczowych elementów strategii zrównoważonego rozwoju w budownictwie.

Literatura

[1]. Al-Billbassi, K.A. & Al-Shamaa, M.F. (2020) 'Zachowanie hybrydowych belek betonowych o wysokiej wytrzymałości', *International Journal of Integrated Engineering*, 12(7), pp. 254–267. doi: 10.30880/ijie.2020.12.07.028.

[2]. Badziąg, B. (2012) 'Wybrane aspekty stosowania kruszyw z recyklingu w betonie', in *Dni Betonu 2012 – Materiały konferencyjne*, Wisła, 8–10 października 2012. Polski Cement, pp. 3–9.

[3]. Chen, H.J., Yen, T. & Chen, K.H. (2003) 'Use of building rubbles as recycled aggregates', *Cement and Concrete Research*, 33(1), pp. 125–132.

[4]. Corinaldesi, V., Isolani, L. & Moriconi, G. (2017) Use of rubbles from building demolition as aggregates for structural concretes.

[5]. de Andrade Salgado, F. & de Andrade Silva, F. (2022) 'Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review', *Journal of Building Engineering*, 52, p. 104452.

[6]. Etzeberria, M., Vázquez, E. & Marí, A. (2006) 'Microstructure analysis of hardened recycled aggregate concrete', *Magazine of Concrete Research*, 58(10), pp. 683–690. doi: 10.1680/mac.2006.58.10.683.

[7]. Fardis, M.N. (2011) *Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction*. Springer, pp. 115–130.

[8]. González-Montijo, M.A., Soto-Toro, H., Rivera-Pérez, C., Esteves-Klomsingh, S. & Suárez, O.M. (2019) 'Projektowanie i charakterystyka betonowych elementów murowych i betonu konstrukcyjnego z wykorzystaniem tworzyw sztucznych jako kruszywa', *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 28(1), pp. 81–88. doi: 10.1515/jmbm-2019-0010.

[9]. Hansen, T. (2018) *Recycled Aggregate Concrete: The Structural Performance of Recycled Aggregates in Concrete Mixes*. Springer.

[10]. He, Z. (2023) 'Pełzanie i kurczenie się wysokowydajnego betonu z kruszywem z recyklingu', in *Wielofunkcyjny beton z kruszywami z recyklingu*. Amsterdam, Holandia: Elsevier, pp. 145–177. doi: 10.1016/b978-0-323-89838-6.00012-8.

[11]. Kulekci, G., Yilmaz, A.O. & Cullu, M. (2021) 'Experimental investigation of usability of construction waste as aggregate', *Journal of Mining and Environment*, 12(1), pp. 63–76.

[12]. Löfgren, M. & Löfgren, S. (2019) *Recycling of Construction and Demolition Waste: The Role of Recycled Materials in Building and Civil Engineering Projects*. Routledge.

[13]. Pavlů, T., Fořtová, K., Mariaková, D. & Āepka, J. (2021) 'The durability of recycled aggregate concrete containing recycled masonry aggregate', *AIP Conference Proceedings*, 2322(1). doi: 10.1063/5.0042839.

[14]. PN-EN 12620:2002+A1:2008. Kruszywa do betonu.

- [15].Polski Komitet Normalizacyjny (1991) PN-91/B-06714/15: Kruszywa mineralne. Wymagania i metody badań.
- [16].Tam, V.W., Gao, X.F. & Tam, C.M. (2005) 'Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach', *Cement and Concrete Research*, 35(6), pp. 1195–1203. doi: 10.1016/j.cemconres.2004.10.025.
- [17].Xiao, J., Li, J. & Zhang, C. (2005) 'On statistical characteristics of the compressive strength of recycled aggregate concrete (Charakterystyka statystyczna wytrzymałości na ściskanie betonu z kruszyw z recyklingu)', *Structural Concrete*, 6(4), pp. 149–153. doi: 10.1680/stco.2005.6.4.149.
- [18].Zhang, P. & Bao, J. (2023) 'Trwałość wysokowydajnego betonu z kruszywem z recyklingu', in *Wielofunkcyjny beton z kruszywami z recyklingu*. Amsterdam, Holandia: Elsevier, pp. 85–125. doi: 10.1016/b978-0-323-89838-6.00013-x.
- [19].Zhou, X., et al. (2020) *Sustainable Construction Materials and Technologies*. Elsevier.

Streszczenie

Kruszywa z recyklingu, takie jak betonowe, ceglane czy asfaltowe, różnią się właściwościami mechanicznymi od surowców naturalnych, co ma znaczenie w doborze materiałów do konkretnych zastosowań w budownictwie. Mimo że recyklaty mogą mieć niższą gęstość i wytrzymałość, odpowiednia obróbka, np. przez zmniejszenie stosunku woda/cement, pozwala na ich efektywne wykorzystanie w produkcji betonu. Proces recyklingu kruszyw budowlanych obejmuje szereg działań, takich jak rozdrabnianie, segregacja, przesiewanie, a także obróbkę chemiczną i termiczną. Te etapy umożliwiają uzyskanie materiału o odpowiednich parametrach, który może być użyty w budownictwie do produkcji betonu, asfaltu czy innych elementów budowlanych. Efektywność procesu zależy od jakości zastosowanych technologii oraz stopnia przetworzenia odpadów budowlanych. W szczególności, recykling gruzu budowlanego ma ogromne znaczenie w miastach, gdzie transport kruszywa naturalnego jest kosztowny i wiąże się z dużą emisją spalin. Recykling odpadów budowlanych pozwala na zmniejszenie kosztów transportu, składowania odpadów, a także umożliwia odzyskiwanie wartościowych surowców wtórnych, które mogą być ponownie wykorzystane w budownictwie. Nowoczesne technologie, takie jak metoda C2CA (Concrete to Cement and Aggregates), stanowią przełom w procesie recyklingu kruszyw budowlanych, umożliwiając odzyskiwanie nie tylko kruszywa, ale także cementu z odpadów betonowych. Dzięki takim innowacjom możliwe jest uzyskanie kruszyw o bardzo wysokiej jakości, które mogą być wykorzystywane w produkcji betonu o znakomitych właściwościach mechanicznych, co w znaczący sposób przyczynia się do zwiększenia trwałości i wytrzymałości konstrukcji budowlanych. Takie rozwiązania sprzyjają nie tylko ochronie środowiska, ale także obniżeniu kosztów budowy i przyspieszeniu procesu produkcji.

Słowa kluczowe: recykling, kruszywa budowlane, beton, obróbka, właściwości mechaniczne, segregacja, odpady, technologie, surowce wtórne.

Abstract

Recycled aggregates, such as concrete, brick and asphalt, differ in mechanical properties from natural raw materials, which is important in selecting materials for specific construction applications. Although recyclates may have lower density and strength, proper processing, such as by reducing the water/cement ratio, allows them to be used effectively in concrete production. The process of recycling construction aggregates involves a number of steps, such as crushing, segregation, screening, as well as chemical and thermal treatment. These steps make it possible to obtain material with the right parameters, which can be used in the construction industry to produce concrete, asphalt or other building components. The efficiency of the process depends on the quality of the technologies used and the degree of processing of construction waste. In particular, the recycling of construction debris is of great importance in cities, where the transportation of natural aggregate is costly and involves high emissions. Recycling of construction waste reduces the cost of transportation, landfilling, and allows recovery of valuable secondary raw materials that can be reused in construction. Modern technologies, such as the C2CA (Concrete to Cement and Aggregates) method, represent a breakthrough in the construction aggregate recycling process, making it possible to recover not only aggregate, but also cement from concrete waste. Thanks to such innovations, it is possible to obtain aggregates of very high quality that can be used in the production of concrete with excellent mechanical properties, which significantly contributes to the durability and strength of building structures. Such solutions are conducive not only to environmental protection, but also to reducing construction costs and speeding up the production process.

Keywords: recycling, construction aggregates, concrete, processing, mechanical properties, segregation, waste, technologies, recyclables

Przegląd technologii ogniw fotowoltaicznych – stan obecny i perspektywy rozwoju

1. Wstęp

W dobie globalnych wyzwań klimatycznych i transformacji energetycznej energia słoneczna, a w szczególności – fotowoltaika (PV) zyskuje kluczowe znaczenie jako jedno z najbardziej obiecujących i dostępnych źródeł energii odnawialnej (OZE). Znaczenie tego rodzaju „zielonej energii” stale rośnie, wspierając realizację międzynarodowych zobowiązań dotyczących zarówno neutralności klimatycznej, jak i dekarbonizacji gospodarek. Według prognoz Międzynarodowej Agencji Energii (IEA), fotowoltaika stanie się do 2050 roku jednym z istotniejszych źródeł wytwarzania energii elektrycznej na świecie, jednocześnie zainstalowana moc wytwórcza PV będzie znacząco większa od pozostałych OZE [1].

W ciągu ostatnich pięciu dekad fotowoltaika przeszła głęboką transformację technologiczną i ekonomiczną, stając się najbardziej perspektywnym źródłem energii o zerowej emisji. Koszt wytworzenia modułu fotowoltaicznego, wyrażony jako cena jednostkowa za wat mocy szczytowej (USD/Wp¹), uległ radykalnemu obniżeniu – z poziomu ok. 130 USD/Wp w 1975 roku do zaledwie 0,31 USD/Wp w roku 2023 [2]. Tak znaczący spadek kosztów możliwy był dzięki efektowi skali produkcji, postępowi technologicznemu i wdrożeniu nowych rozwiązań, optymalizacji procesów wytwórczych oraz wzrostowi sprawności konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną.

Równoległe z redukcją kosztów obserwuje się dynamiczny wzrost skumulowanej mocy zainstalowanej na świecie – od zaledwie niespełna 0,5 MW w 1975 roku, do ok. 1420 GW w roku 2023 [2]. Jednocześnie, wzrosła także sprawność konwersji, wynosząc obecnie przeciętnie ok. 21-24% w modułach produkowanych seryjnie.

Rosnąca konkurencyjność technologii PV przyczyniła się do jej szerokiego wdrożenia w zróżnicowanych zastosowaniach energetycznych. Oprócz klasycznych instalacji dachowych w sektorze mieszkaniowym oraz komercyjnym, systemy fotowoltaiczne są powszechnie integrowane z wielkoskalowymi instalacjami przemysłowymi (ang. *utility-scale*), pełniącymi funkcję elektrowni słonecznych. Coraz częściej znajdują również zastosowanie w systemach zintegrowanych z architekturą budynków (BIPV – *Building-Integrated Photovoltaics*), w urządzeniach mobilnych, a także

w autonomicznych systemach zasilania typu off-grid, szczególnie w regionach o ograniczonym dostępie do sieci energetycznej.

Celem niniejszego artykułu jest przegląd aktualnego stanu technologii fotowoltaicznych oraz wskazanie głównych kierunków ich dalszego rozwoju, w kontekście wdrożeń rynkowych i trendów badawczo-rozwojowych. Przeprowadzono klasyfikację dostępnych rozwiązań technologicznych według generacji (I–IV) oraz rodzaju zastosowanych materiałów. W szczególności omówiono technologie krzemowe, które obecnie stanowią dominujący segment rynku fotowoltaicznego. Są one przedmiotem intensywnych badań i rozwoju, co skutkuje ciągłym wzrostem ich sprawności oraz optymalizacją kosztów produkcji. Równocześnie przedstawiono alternatywne, komercyjnie dostępne technologie cienkowarstwowe, które charakteryzują się potencjałem obniżenia kosztów materiałowych oraz umożliwiają zastosowanie na elastycznych i lekkich podłożach. Dodatkowo, uwzględnione zostały także innowacyjne ogniwa, które wydają się być perspektywiczne w dalszych badaniach i które zyskują coraz większe znaczenie w kontekście zwiększania sprawności konwersji energii, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów jednostkowych. Są to rozwiązania m.in. organiczne, perowskitowe, hybrydowe, tandemowe oraz wielozłączowe [3].

2. Podział technologii fotowoltaicznych

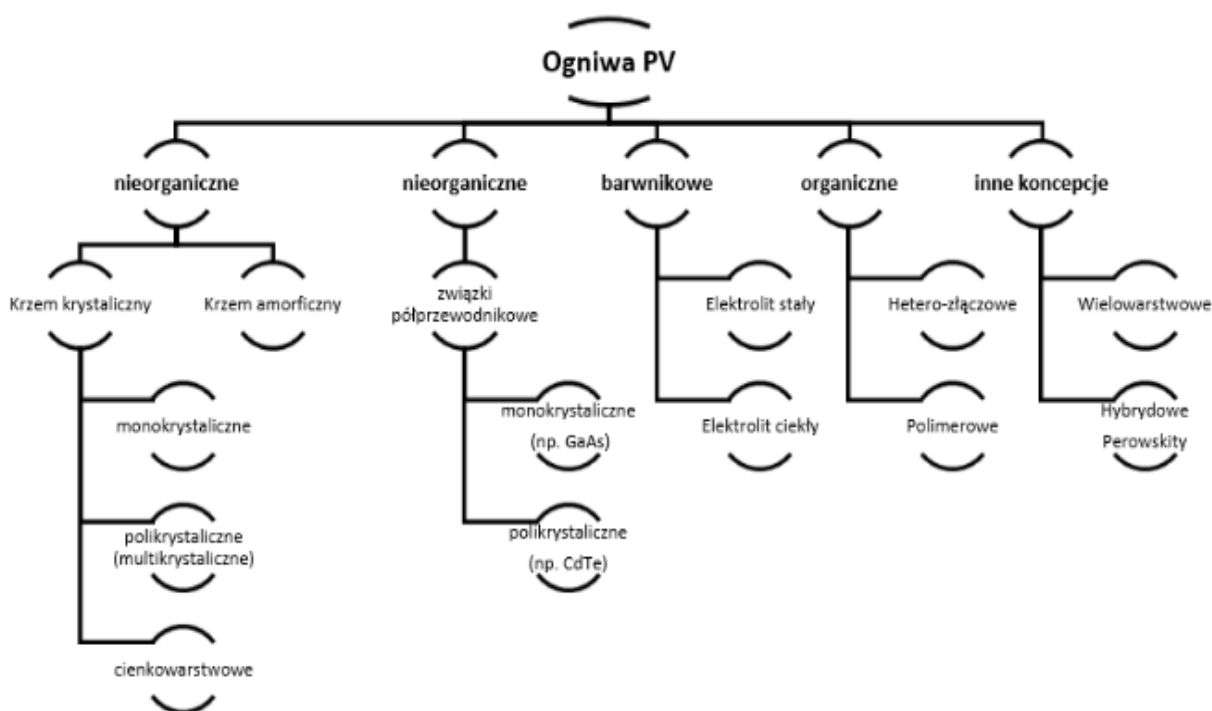
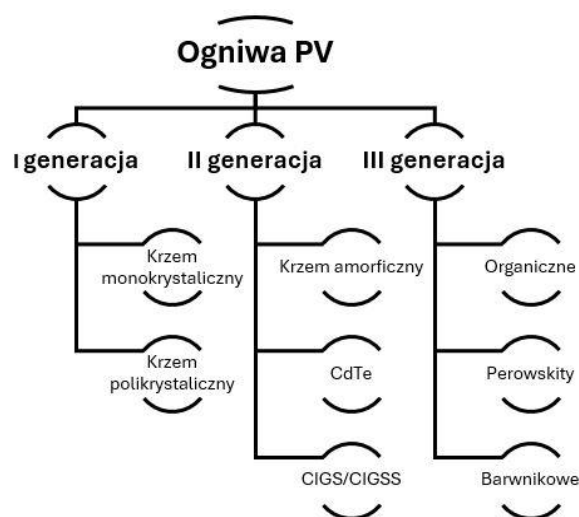
Ogniwo fotowoltaiczne jest elementem, w którym zachodzi bezpośrednia konwersja energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną poprzez zjawisko fotowoltaiczne. W najpowszechniej stosowanych technologiach, opartych na materiałach półprzewodnikowych, proces ten polega na generowaniu par elektron–dziura w materiale aktywnym pod wpływem absorpcji fotonów oraz ich separacji i kierunkowym transporcie do elektrod. W przypadku ogniw organicznych, barwnikowych (DSSC) i innych alternatywnych technologii kluczową rolę odgrywa transport nośników ładunku pomiędzy poziomami energetycznymi materiałów aktywnych, takimi jak LUMO (Lowest Unoccupied Molecular Orbital) i HOMO (Highest Occupied Molecular Orbital), co warunkuje efektywność separacji i zbierania elektronów oraz dziur.

Do najważniejszych parametrów oceny efektywności ogniw należą:

¹ Wp, watopik – jednostka mocy (wat), jaka uzyskiwana jest przez ogniwo fotowoltaiczne w warunkach standardowych (STC)

- sprawność konwersji energetycznej (ang. Power Conversion Efficiency – PCE),
- trwałość eksploatacyjna (czas działania bez istotnej degradacji parametrów),
- koszty produkcji i materiałów, w tym nakłady inwestycyjne (Capital Expenditure – CapEx) oraz koszt materiałów (Bill of Materials – BoM),
- uśrednione koszty energii (ang. Levelized Cost of Energy – LCOE), które uwzględniają zarówno nakłady inwestycyjne, koszty operacyjne, jak i czas pracy instalacji [4],
- oddziaływanie środowiskowe w całym cyklu życia produktu, oceniane metodą analizy cyklu życia (Life Cycle Assessment – LCA) [5, 6].

Na obecnym etapie, oprócz dalszego zwiększania sprawności i redukcji kosztów, kluczowa jest także optymalizacja cyklu życia ogniw PV. Szczególną



Rys. 2. Podział ogniw ze względu na materiały

uwagę zwraca się na takie aspekty jak energochłonność produkcji, możliwość recyklingu komponentów, czy też ograniczenie toksyczności stosowanych surowców (np. takich pierwiastków, jak ołów, kadm, tellur, ind).

Technologie ogniw fotowoltaicznych można klasyfikować według różnych kryteriów, z których dwa najczęściej stosowane to: 1) podział ze względu na generację, wynikający z chronologii rozwoju technologii, oraz 2) podział materiałowy i strukturalny, odnoszący się do fizykochemicznych właściwości materiałów (surowców) oraz architektury ogniwa. Oba podejścia są komplementarne i pozwalają na dokładniejszą analizę aktualnych trendów i kierunków rozwoju fotowoltaiki.

Rys. 1. Podział ogniw ze względu na generację

Klasyfikacja generacyjna – obejmująca trzy (niekiedy cztery) podstawowe grupy – stanowi obecnie powszechnie przyjętą metodę typologii rozwiązań w fotowoltaice [7]. W niniejszym artykule przyjęto trójstopniowy podział, z uwzględnieniem dominujących cech konstrukcyjnych oraz materiałowych. Na rysunku 1 przedstawiono jedną z możliwych klasyfikacji technologii ogniw PV, w oparciu o ich przynależność do generacji, a na rysunku 2 – według grupy materiałowej, związanej z wykorzystanymi surowcami.

Podział ogniw fotowoltaicznych na generacje – jak uprzednio wskazano – może różnić się w zależności od zastosowanej metodologii.

Poniżej przedstawiono najczęściej spotykaną w literaturze klasyfikację, z uwzględnieniem najważniejszych surowców wykorzystywanych w poszczególnych technologiach.

2.1. Pierwsza (I) generacja: ogniwa krzemowe o strukturze grubowarstwowej (bulk crystalline silicon PV)

Technologie pierwszej generacji obejmują ogniwa fotowoltaiczne wytwarzane z monokrystalicznego (m-Si) oraz polikrystalicznego (p-Si) krzemu. W niektórych klasyfikacjach wyodrębnia się również wariant multikrystaliczny (mc-Si), który charakteryzuje się niejednorodnością struktury krystalicznej, plasując się właściwościami pomiędzy ogniwami mono- a polikrystalicznymi. Cechą wyróżniającą tej grupy technologii jest stosowanie wafli krzemowych o znacznej grubości – typowo w zakresie 180–300 μm , co przekłada się na wysokie zapotrzebowanie materiałowe, ale jednocześnie zapewnia dobre parametry konwersji fotowoltaicznej (sprawności komercyjnej dochodzące do 22–24%). W tej grupie uwzględnia się również ogniwa oparte na związkach półprzewodnikowych z grupy III–V układu okresowego, takich jak związki galu (Ga), indu (In), arsenu (As) czy antymonu (Sb) — przykładem są stosunkowo popularne w niektórych zastosowaniach jednozłączowe struktury zbudowane z arsenku galu (GaAs). Mimo że grubość warstwy aktywnej w tego typu ogniwach jest istotnie mniejsza (zazwyczaj nie przekracza kilku mikrometrów), technologie te są często klasyfikowane jako reprezentujące I generację, ze względu na ich wysoki stopień komercyjnego zaawansowania, potwierdzoną efektywność konwersji energii (w ogniwach GaAs przekraczającą 29%) oraz specjalistyczny profil zastosowań (np. systemy zasilania w sektorze kosmicznym, lotnictwie czy technologiach wojskowych). Niemniej jednak, biorąc pod uwagę parametry strukturalne, takie jak ograniczona grubość warstwy czynnej oraz wykorzystanie technik epitaksjalnych w procesie wytwarzania, możliwe jest także ich zaklasyfikowanie do rozwiązań II generacji. Ze względu na marginalny obecnie udział w rynku ogniw GaAs oraz ograniczenia (bardzo wysoki koszt wytwarzania, złożoność technologiczna, niska dostępność i znaczny koszt galu, czy też wysoka toksyczność arsenu) technologia ta znajduje zastosowanie jedynie w niszowych rozwiązaniach i nie będzie tutaj szerzej omawiana.

2.2. Druga (II) generacja: ogniwa cienkowarstwowe (thin-film PV technologies)

Technologie drugiej generacji stanowią odpowiedź na konieczność ograniczenia zużycia surowców pierwotnych (szczególnie krzemu) oraz obniżenia kosztów jednostkowych produkcji. Ich podstawową cechą jest zastosowanie cienkich warstw aktywnych – rzędu 0,3 do kilku μm – osadzanych na podłożach szklanych, metalicznych lub polimerowych. W porównaniu z ogniwami grubowarstwowymi, rozwiązania

cienkowarstwowe wykazują mniejszą masę, większą elastyczność i potencjał do zastosowań w systemach zintegrowanych z infrastrukturą.

Do technologii tej generacji zaliczają się m.in.:

- Krzem amorficzny (a-Si)
- Krzem mikrokryształiczny ($\mu\text{c-Si}$)
- Tellurek kadmu (CdTe)
- Związki chalcogenkowe (CIS, CIGS)

Technologie II generacji charakteryzują się wysokim potencjałem wdrożeniowym w kontekście produkcji masowej, jednak ich rozwój jest silnie uzależniony od dostępności pierwiastków krytycznych (np. Te, In, Se) oraz regulacji środowiskowych (szczególnie dla związków kadmu).

2.3. Trzecia (III) generacja: technologie postkrzemowe i materiały zaawansowane

Trzecia generacja obejmuje szerokie spektrum technologii będących aktualnie w fazie intensywnych badań lub we wczesnych etapach komercjalizacji. Charakteryzują się one nowatorskimi koncepcjami konwersji energii słonecznej, często wykorzystującymi zjawiska kwantowe, procesy transferu elektronów ekscytonowych oraz nanomateriały. Czasami, spotkać można jeszcze oddzielnie definiowaną czwartą (IV) generację, w skład której wchodzi rozwiązania będące na etapie badań, lub też, w zależności od klasyfikacji, niektóre z poniżej przedstawionych technologii. Poniżej została ujęta III generacja, obejmująca wszystkie rozwiązania, nie należące do dwóch pierwszych generacji ogniw PV.

Do grupy tej zaliczane są m.in.:

- Ogniwa barwnikowe (DSSC)
- Ogniwa organiczne (OPV)
- Perowskity
- Ogniwa z kropkami kwantowymi (QD-PV)
- Rozwiązania z zastosowaniem materiałów 2D (np. grafen, dichalkogenki metali przejściowych).

Technologie te oferują bardzo atrakcyjne parametry w zakresie elastyczności, przetwarzania niskotemperaturowego i integracji z niestandardowymi powierzchniami, lecz ich wdrożenie na skalę przemysłową ograniczane jest przez szereg czynników, m.in.: niską stabilność i szybką degradację, problemy ze skalowaniem procesów produkcyjnych, a także w niektórych rozwiązaniach niepewność dotyczącą długoterminowej dostępności wybranych materiałów.

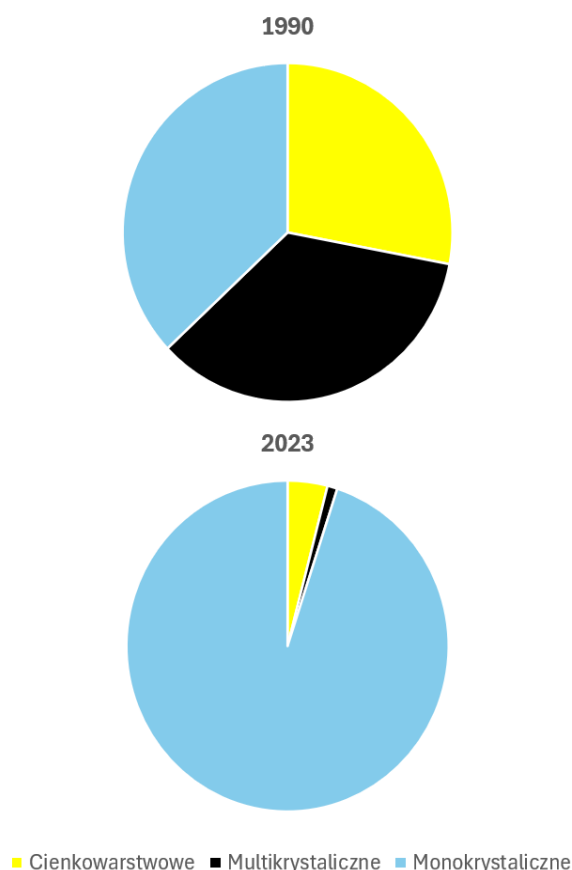
3. Ogniwa I generacji – technologie krzemowe

3.1. Charakterystyka technologii I generacji

Technologie I generacji obejmują ogniwa fotowoltaiczne oparte na krzemie krystalicznym (c-Si), zarówno monokrystalicznym (mono-Si), jak i polikrystalicznym (p-Si); czasami oddzielnie także klasyfikowane są tutaj ogniwa multikrystaliczne (mc-Si). Rozwiązania bazujące na krzemie krystalicznym (c-Si) stanowią obecnie technologię dojrzałą i wysoko rozwiniętą pod względem komercjalizacji, odpowiadając za około 95% światowej produkcji

modułów fotowoltaicznych. Ich dominacja rynkowa sukcesywnie zwiększa się, stopniowo ograniczając znaczenie rozwiązań typowych dla tzw. II generacji.

Na rysunku 3 zilustrowano zmiany w strukturze udziałów rynkowych pomiędzy rozwiązaniami krzemowymi (I generacja) a cienkowarstwowymi (II generacja), porównując dane z roku 1990 (górny wykres kołowy) i 2023 (dolny wykres kołowy).



Rys. 3. Struktura udziału technologii ogniw PV w roku 1990 oraz 2023

Źródło: opracowanie własne na podstawie [8]

Krzem, jako materiał półprzewodnikowy, oferuje liczne zalety: odpowiednie pasmo wzbronione (1,1 eV), wysoką czystość przemysłową (zarówno dla rozwiązań p-type, jak i n-type), stabilność chemiczną i stosunkowo prostą obróbkę fizyczną.

Podstawowa struktura ogniwa krzemowego opiera się na złączu p-n, wytworzonym najczęściej przez dyfuzję fosforu do wafla p-typu. Wersje n-typu są droższe, ale oferują wyższą odporność na degradację światłem (LID) i stabilniejsze parametry elektryczne. Obecnie, rozwój ukierunkowany jest właśnie na technologię n-type, ze względu na większy potencjał rozwojowy tego rozwiązania. Masowa produkcja wafla n-type doprowadziła do znacznego spadku kosztów i prawie ich wyrównania z waflami typu p. W celu poprawy właściwości ogniwa wprowadzono liczne warianty konstrukcyjne – różniące się pasywacją powierzchni, lokalizacją styków, materiałami przewodzącymi i technologią osadzania.

Należy podkreślić, że pomimo faktu przynależności do I generacji, najnowsze rozwiązania oparte o c-Si, takie jak TOPCon, SHJ czy IBC cechują się zaawansowanymi technikami produkcyjnymi, obniżonym zapotrzebowaniem na surowce oraz bardzo dobrymi parametrami (m.in. wysoką sprawnością konwersji oraz niskim współczynnikiem degradacji), przy korzystnym profilu kosztowym. Przewiduje się, że technologie te będą dalej rozwijane w perspektywie średnio- i długoterminowej, utrzymując dominującą pozycję na globalnym rynku fotowoltaiki w najbliższych dekadach [9]. Poniżej szczegółowo omówiono kluczowe technologie I generacji.

3.2. Al-BSF (Aluminum Back Surface Field)

Technologia Al-BSF to klasyczna konstrukcja krzemowego ogniwa fotowoltaicznego, która przez wiele lat dominowała na rynku. Pole tylne (BSF) tworzone jest poprzez osadzenie warstwy aluminium na tylnej stronie wafla krzemowego i jej wypalenie, co powoduje tworzenie dyfuzyjnej bariery energetycznej redukującej rekombinację nośników.

Cechy:

- Typ podłoża: p-type
- Sprawność: 16–19%
- Zalety: niska złożoność technologiczna, niskie koszty produkcji
- Wady: ograniczona pasywacja tylnej powierzchni, większe straty rekombinacyjne, podatność na LID.

Po kilku dekadach, Al-BSF został wyparty przez bardziej zaawansowane technologie jak omówiony poniżej PERC.

3.3. PERC (Passivated Emitter and Rear Cell)

Ogniwa PERC stanowią obecnie dominujący standard przemysłowy. Technologia ta modyfikuje strukturę Al-BSF poprzez wprowadzenie cienkiej warstwy dielektrycznej (np. Al_2O_3 , SiN_x) na tylnej stronie ogniwa, zapewniającej lepszą pasywację powierzchni oraz częściową refleksję światła.

Cechy:

- Typ podłoża: p-type lub n-type
- Sprawność: 20–22% (komercyjna)
- Zalety: zwiększona długość życia nośników, łatwa modyfikacja technologii względem Al-BSF
- Wady: ograniczona zdolność do dalszej minimalizacji strat rekombinacyjnych, efekt nasycenia przy wyższych temperaturach.

Technologia ta osiągnęła wysoki poziom optymalizacji, jednak zbliża się do granicy teoretycznej wydajności (~24%). Mimo że obecnie stanowi dominujące rozwiązanie wśród krzemowych technologii PV, prognozy na najbliższe lata wskazują na stopniowe ograniczenie jej udziału w produkcji na rzecz bardziej zaawansowanych struktur, takich jak ogniwa typu TOPCon.

3.4. TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact)

TOPCon jest kolejną generacją ogniw krzemowych (w ramach I generacji PV), bazującą na strukturze z tunelowym tlenkiem krzemu (SiO_x) oraz polikrystalicznym krzemem domieszkowanym (poly-Si). Warstwy te tworzą pasywowany kontakt tylnej powierzchni, pozwalający na transport nośników przy minimalnych stratach rekombinacyjnych.

Cechy:

- Typ podłoża: n-type
- Sprawność: 22–24% (komercyjna), >26% (laboratoryjna)
- Zalety: bardzo dobra pasywacja, niskie straty kontaktowe, wysoki potencjał rozwojowy
- Wady: większa złożoność technologiczna, wymagana precyzja wytwarzania warstw tunelowych.

Technologia TOPCon odnotowuje w ostatnim czasie dynamiczny wzrost udziału w globalnej produkcji ogniw fotowoltaicznych, co wynika z jej wyższej sprawności, relatywnie niskich kosztów wdrożenia oraz kompatybilności z istniejącą infrastrukturą wytwarzania ogniw PERC. Przewiduje się, że w najbliższych latach (do ok. 2035 r.) będzie ona głównym rozwiązaniem, bazującym na krzemie krystalicznym [10].

3.5. SHJ (Silicon Heterojunction, HJT)

SHJ jest rozwiązaniem opartym na heterozłączu pomiędzy krzemem monokrystalicznym (c-Si) a amorficznym krzemem (a-Si:H). Cienkie warstwy krzemu a-Si, osadzone z obu stron wafla, pełnią funkcję warstw pasywujących oraz emiterów, co zapewnia bardzo dobre parametry rekombinacyjne.

Cechy:

- Typ podłoża: n-type c-Si
- Sprawność: 22–24% (komercyjna), >26% (laboratoryjna)
- Zalety: niski współczynnik temperaturowy ($\sim -0,25\%/^{\circ}\text{C}$), bardzo wysoka pasywacja, prostota struktury (brak dyfuzji)
- Wady: wysoka wrażliwość na czystość procesów, kosztowna technologia TCO (przezroczyste tlenki przewodzące).

Ogniwa SHJ wydają się szczególnie predysponowane do zastosowań w architekturach tandemowych, zwłaszcza w połączeniu z perowskitami, ze względu na ich wysoką stabilność termiczną oraz optyczną przezroczystość warstwy frontowej, co umożliwi efektywne wykorzystanie spektrum promieniowania w układach wielozłączowych.

3.6. IBC (Interdigitated Back Contact)

IBC to technologia, w której wszystkie styki elektryczne umieszczone są na tylnej stronie ogniwa. Przód ogniwa jest całkowicie pasywny i nieprzesłonięty, co maksymalizuje absorpcję światła i redukuje straty spowodowane zacienieniem warstwy aktywnej.

Cechy:

- Typ podłoża: n-type c-Si
- Sprawność: do 24–26% (komercyjna)
- Zalety: najwyższa wydajność spośród ogniw krzemowych, brak zacienienia od elektrod
- Wady: skomplikowany proces litografii kontaktów tylnych, wyższy koszt jednostkowy.

Technologia IBC wyróżnia się konkurencyjnością w zastosowaniach wymagających wysokiej gęstości mocy przy ograniczonej powierzchni montażowej, takich jak systemy dachowe w budynkach mieszkalnych i komercyjnych, oferując jednocześnie estetyczną, jednolitą powierzchnię bez widocznych elementów metalizacyjnych. Rozwinięciem koncepcji IBC jest ABC (All Back Contact), w którym wszystkie warstwy funkcjonalne, w tym pasywacja i selektywne kontakty, są zintegrowane wyłącznie na tylnej stronie ogniwa. Przykładem takiej technologii jest rozwiązanie firmy AIKO, które osiąga sprawności na poziomie 26,5% w produkcji masowej. ABC charakteryzuje się uproszczoną strukturą, co oprócz podwyższenia sprawności może prowadzić do obniżenia kosztów produkcji i zwiększenia niezawodności samych modułów [11].

3.7. Perspektywy rozwoju

Wraz z wyczerpywaniem potencjału wzrostu sprawności ogniw Al-BSF i PERC, masowa produkcja przesuwa się ku zaawansowanym technologiom takim jak TOPCon, SHJ i IBC. Porównać to można do technologii telefonii komórkowej, gdzie rozwiązania 2G (Al-BSF) oraz 3G (PERC) są zastępowane przez kolejne generacje: 4G (TOPCon), 5G (SHJ, IBC) a w dalszej przyszłości być może jeszcze kolejne, np. 6G (Tandem lub inne).

Obecnie, wydaje się, że szczególnie atrakcyjne są struktury n-typu, które lepiej tolerują defekty i mają wyższy potencjał sprawności. Rozwój technologii tandemowych (np. perowskit/c-Si) sugeruje, że krzemowe podłoża jeszcze długo będą kluczowym elementem ogniw nowej generacji.

4. Ogniwa II generacji – technologie cienkowarstwowe

4.1. Charakterystyka technologii II generacji

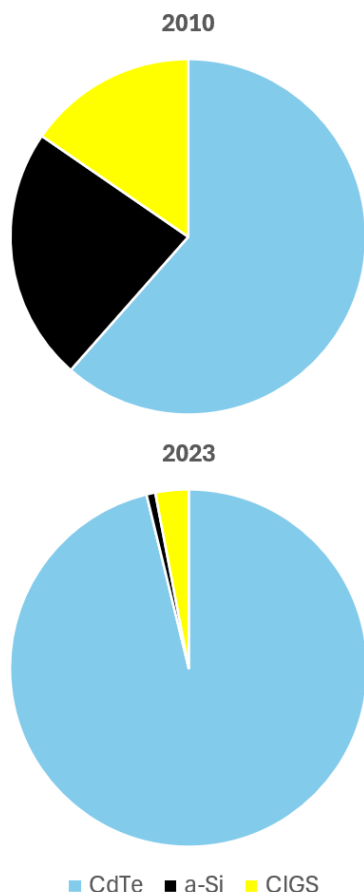
Ogniwa II generacji charakteryzują się zastosowaniem cienkowarstwowych warstw aktywnych ($<3\ \mu\text{m}$) zamiast grubych waflów krzemowych ($\sim 180\text{--}300\ \mu\text{m}$). Dzięki temu technologie te oferują niższe zużycie materiału, niższą masę modułów, potencjalnie tańszy proces produkcji (np. przez osadzanie z fazy gazowej, nanoszenie inkjet) oraz elastyczność (np. folie, laminaty).

Główne materiały II generacji to:

- CdTe (tellurek kadmu) – dominująca cienkowarstwowa technologia komercyjna
- CIGS ($\text{Cu}(\text{In,Ga})\text{Se}_2$) – stop miedzi, indu, galu i seleniu o regulowanym paśmie wzbronionym

- a-Si (amorficzny krzem) – pierwotna cienkowarstwowa alternatywa dla krzemu krystalicznego.

Na rysunku 4 przedstawiono porównanie kształtowania się rynku technologii cienkowarstwowych w roku 2010 (górny wykres kołowy) oraz w roku 2023 (dolny wykres kołowy).



Rys. 4. Struktura udziału technologii ogniw cienkowarstwowych w roku 2010 oraz 2023

Źródło: opracowanie własne na podstawie [8]

Widoczny jest wyraźny wzrost udziału rozwiązań opartych na CdTe, przy jednoczesnym spadku znaczenia pozostałych ogniw cienkowarstwowych. Każda z tych trzech technologii ma swoje cechy charakterystyczne, które zostaną omówione poniżej.

4.2. CdTe – Tellurek Kadmu

Tellurek kadmu (CdTe) to związek II-VI o pasmie wzbronionym $\sim 1,45$ eV, bliskim optimum wg krzywej Shockleya-Queissera dla pojedynczego złącza. Jak wskazano wcześniej, materiał ten odgrywa kluczową rolę w segmencie cienkowarstwowych ogniw PV, będąc dominującym rozwiązaniem wśród koncepcji należących do tzw. II generacji.

Struktura ogniwa:

- Podłoże szklane (lub elastyczne)
- Warstwa TCO (SnO_2 lub Cd_2SnO_4)
- Warstwa buforowa CdS ($0,05\text{--}0,1\ \mu\text{m}$)

- Warstwa aktywna CdTe ($1\text{--}3\ \mu\text{m}$)
- Kontakt tylny: grafit, Mo, ZnTe, Cu/Au

Zalety:

- Wysoka absorpcja
- Krótki czas osadzania
- Odporność na fotodegradację

Ograniczenia:

- Ograniczona dostępność telluru
- Toksyczność kadmu
- Trudności z formowaniem efektywnego kontaktu tylnego (duży opór)

Sprawność:

- Komercyjna: 15-16%
- Laboratoryjna: ponad 22%.

4.3. CIGS – Miedź–Ind–Gal–Selen

CIGS (Cu(In,Ga)Se_2) to półprzewodnik o regulowanym paśmie wzbronionym (od $\sim 1,0$ do $1,7$ eV w zależności od stosunku Ga/In), co pozwala na projektowanie struktur o zoptymalizowanym dopasowaniu spektralnym. CIGS cechuje się bardzo wysokim współczynnikiem absorpcji i możliwością osadzania na różnych podłożach, w tym elastycznych.

Struktura ogniwa:

- Podłoże: szkło, folia polimerowa, inne
- Warstwa tylna: Mo
- Warstwa aktywna: CIGS ($1\text{--}2\ \mu\text{m}$)
- Warstwa buforowa: CdS lub Zn(S,O)
- TCO: ZnO:Al

Zalety:

- Wysoka sprawność
- Możliwość wykonania elastycznych modułów
- Brak krzemowych strat rekombinacyjnych, dobra pasywacja ziarna

Ograniczenia:

- Koszty i ograniczona dostępność indu i galu
- Niestabilność ogniw, podatność na degradację
- Skomplikowany proces kalibracji gradientu składu (In/Ga)

Sprawność:

- Komercyjna: 14–20%
- Laboratoryjna: ponad 23%.

4.4. a-Si – Krzem amorficzny

Amorficzny krzem (a-Si:H) był pierwszym cienkowarstwowym materiałem stosowanym w fotowoltaice, szczególnie popularnym w latach 80. i 90. XX wieku. Technologia ta cechuje się prostotą produkcji oraz niskim kosztem osadzania (PECVD), jednak ograniczoną efektywnością, z uwagi na defekty strukturalne i niski zasięg dyfuzji nośników.

Struktura ogniwa:

- Warstwa TCO (ITO, ZnO)
- Warstwa emisyjna: a-Si:H (n)
- Warstwa aktywna: a-Si:H (i)
- Warstwa kolektora: a-Si:H (p)
- Kontakt tylny: Ag, Al.

Zalety:

- Niskotemperaturowy proces ($<250^\circ\text{C}$)
- Możliwość nanoszenia na folie, szkło elastyczne

- Odporny na zacinienie, wysoki współczynnik absorpcji światła

Ograniczenia:

- Wysoki efekt fotodegradacji
- Niska mobilność nośników
- Niewielka sprawność
- Trudności w doborze materiałów domieszkowych

Sprawność:

- Komercyjna: 5–12%
- Laboratoryjna: ponad 13%.

4.5. Perspektywy rozwoju

Mimo że technologie II generacji ustępują krzemowi pod względem udziału rynkowego, nadal mają istotne znaczenie w niszowym i przemysłowym zastosowaniu (aplikacjach):

- CdTe: główne rozwiązanie w wielkoskalowych instalacjach PV w USA, ze znaczącymi inwestycjami w tandemowe struktury (CdTe:Se/CdSe)
- CIGS: rozwój elastycznych i zintegrowanych z budynkami (BIPV) ogniw, możliwa integracja z perowskitami
- a-Si: wykorzystywany w niewielkich urządzeniach (np. kalkulatory, sensory IoT) oraz jako warstwa pasywująca w strukturach heterozłączowych (np. SHJ).

Obecnie, postęp technologiczny koncentruje się na hybrydowych architekturach cienkowarstwowych, lepszej pasywacji złączy oraz wykorzystaniu nowych materiałów TCO o lepszej transparentności i przewodnictwie.

5. Ogniwa III i IV generacji – technologie przyszłości

5.1. Charakterystyka technologii III i IV generacji

Ogniwa III oraz IV generacji obejmują nowatorskie technologie fotowoltaiczne wykraczające poza klasyczne złącza p-n. W założeniu mają przekroczyć ograniczenia sprawności Shockleya–Queissera dla pojedynczego złącza (teoretycznie ~33% dla $E_g = 1,34$ eV), wykorzystując mechanizmy zwiększonego pochłaniania światła, rekombinację ograniczoną radiacyjnie, struktury tandemowe czy też nowo odkryte zjawiska kwantowe.

Cechą charakterystyczną w tych rozwiązaniach są: niskotemperaturowe procesy, łatwa integracja z podłożami elastycznymi, możliwość nanoszenia za pomocą druku, oraz potencjalnie niskie koszty. Niemniej jednak, główną barierą pozostaje stabilność (szczególnie w długim okresie), skalowalność, powtarzalność parametrów oraz potencjalne ograniczenia materiałowe.

Poniżej omówiono kilka rozwiązań, które są zaliczane do III, ew. IV generacji (w zależności od przyjętej klasyfikacji) ogniw fotowoltaicznych.

5.2. a-Si – Perowskity (PSC – Perovskite Solar Cells)

Perowskity to związki o strukturze krystalicznej ABX_3 , gdzie A – kation organiczny (np. MA^+ , FA^+), B – kation metalu (Pb^{2+} , Sn^{2+}), X – anion halogenkowy (I^- , Br^- , Cl^-). Najczęściej stosowanym materiałem jest $MAPbI_3$ lub jego modyfikacje.

Zalety:

- Regulowane pasmo Eg
- Wysoka absorpcja światła, szerokie spektrum
- Długa dyfuzja nośników
- Możliwość budowy struktur tandemowych (z krzemem lub CIGS)
- Niskotemperaturowa produkcja, możliwość nanoszenia metodą druku

Wyzwania:

- Degradacja pod wpływem wilgoci, UV, wysokiej temperatury
- Toksyczność ołowiu
- Trwałość poniżej standardu przyjętego dla modułów PV

Sprawność:

- Monozłącze: 26,1%
- Tandem (z krzemem): 33,7%.

5.3. Ogniwa organiczne (OPV – Organic Photovoltaics)

Ogniwa organiczne bazują na cienkowarstwowych związkach półprzewodnikowych na bazie polimerów lub małych cząsteczek (np. P3HT, PCBM, Y6). Konwersja zachodzi poprzez rozdział ekscytonów na granicy donor–akceptor.

Zalety:

- Elastyczność, przezroczystość, dowolne kolory
- Produkcja rolowana (roll-to-roll), wytwarzanie niskotemperaturowe
- Możliwość znacznego ograniczenia kosztów wytwarzania na etapie produkcji wielkoskalowej.

Wyzwania:

- Krótkie życie ekscytonów, konieczność nanofazowego wymieszania
- Niska mobilność nośników
- Fotodegradacja polimerów i utlenianie
- Niska powtarzalność parametrów wytwarzanych ogniw
- Zmiana jednego komponentu w celu ulepszenia danego parametru może negatywnie wpłynąć na inny, prowadząc do kompromisów w zakresie wydajności

Sprawność:

- Komercyjna: 8–10%
- Laboratoryjna: ok. 19%.

5.4. Ogniwa barwnikowe (DSSC – Dye-Sensitized Solar Cells)

Ogniwa DSSC działają na zasadzie fotochemicznej: światło pada na warstwę barwnika (np. rutenowego), który absorbuje fotony i przechodzi w stan wzbudzony, następnie elektron z cząsteczki

barwnika przechodzi do półprzewodnikowego tlenku metalu (najczęściej nanokrystalicznego TiO_2) i trafia do obwodu zewnętrznego. Utleniony barwnik regenerowany jest przez elektrolit, który z kolei regenerowany jest na elektrodzie przeciwnej (zazwyczaj z platyną).

Zalety:

- Wyższa, niż w przypadku innych technologii sprawność przy słabym i rozproszonym oświetleniu (np. wewnętrznym)
- Estetyka i przezroczystość (dowolne kolory)
- Niskotemperaturowy proces produkcji
- Niski koszt surowców, nieskomplikowany proces wytwarzania

Wyzwania:

- Obniżona stabilność operacyjna wynikająca z fotochemicznej degradacji barwnika oraz elektrochemicznej niestabilności ciepłego elektrolitu w długim horyzoncie czasowym
- Relatywnie niska efektywność konwersji energii (standardowo wynosząca 7-11%)
- Konieczność hermetyzacji układu

Sprawność:

- Światło naturalne: do 13,0%
- Światło sztuczne: do 38%.

5.5. Ogniwa z kropkami kwantowymi (QD-PV)

Kropki kwantowe (quantum dots, np. PbS , CdSe , InP) to nanokryształy o wielkości <10 nm. Właściwości optyczne zależą od rozmiaru (kwantowe ograniczenie). Mogą emitować i absorbować w szerokim zakresie – idealne nadają się do aplikacji tandemowych.

Zalety:

- Możliwość absorpcji w podczerwieni
- Dopasowanie pasma przez zmianę rozmiaru nanokryształu
- Możliwość nanoszenia metodą druku

Wyzwania:

- Toksyczność materiałów (kadm, ołów)
- Straty rekombinacyjne na granicach faz i w objętości QD
- Skalowalność i jednorodność procesu wytwarzania.
- Stabilność długookresowa (degradacja w warunkach atmosferycznych)

Sprawność:

- Maksymalna ok. 18%.

5.6. Perspektywy rozwoju

Czwarta generacja ogniw fotowoltaicznych obejmuje technologie będące efektem hybrydyzacji koncepcji trzeciej generacji z zaawansowanymi rozwiązaniami nanomateriałowymi, inżynierią fotoniczną oraz architekturą wielozłączową [12]. Przykładowo, szczególne zainteresowanie budzą wielowarstwowe struktury tandemowe, takie jak układy perowskit-krzem, perowskit-CIGS, czy w pełni perowskitowe (perowskit-perowskit), które pozwalają na przekroczenie limitów pojedynczego złącza

wynikających

z krzywej Shockleya-Queissera.

Do tej kategorii zalicza się również inne technologie będące wciąż na wczesnym etapie rozwoju – obejmującym badania podstawowe, prace laboratoryjne oraz próby prototypowania. Spośród rozwiązań czwartej generacji, ogniwa perowskitowe uznawane są za najbardziej zaawansowane pod względem gotowości technologicznej, ze względu na istniejące już pilotażowe linie produkcyjne, wykorzystujące różne podejścia do ich wytwarzania (m.in. nanoszenie metodą drukowania, metoda slot-die czy procesy roll-to-roll).

Natomiast organiczne ogniwa fotowoltaiczne (OPV) oraz barwnikowe ogniwa słoneczne (DSSC), mimo ograniczeń związanych z trwałością i sprawnością, znalazły niszowe zastosowania w sektorze elektroniki o niskim zapotrzebowaniu energetycznym, takich jak sensory i znaczniki RFID (Radio-Frequency Identification), elementy zasilania urządzeń Internetu rzeczy (IoT, ang. Internet of Things), czy zintegrowane z budynkami systemy fotowoltaiczne (BIPV, ang. Building-Integrated Photovoltaics), które łączą funkcję generacji energii z komponentami konstrukcyjnymi i estetycznymi budynków.

Technologie wykorzystujące kropki kwantowe (QD-PV) oraz inne innowacyjne koncepcje z zakresu nanofotoniki i optoelektroniki pozostają głównie w fazie eksperymentalnej, jednak ze względu na ich unikalne właściwości (np. możliwość dostosowania pasma wzbronionego) uznawane są za perspektywiczne kierunki dalszego rozwoju niskoenergetycznych i wysokowydajnych systemów fotowoltaicznych nowej generacji.

6. Podsumowanie

Rozwój ogniw fotowoltaicznych charakteryzuje się wyraźną ewolucją – od dominujących technologii krzemowych I generacji, przez cienkowarstwowe rozwiązania II generacji, aż po zaawansowane materiały i struktury wielozłączowe III oraz IV generacji.

Każda z tych generacji wносиła istotne usprawnienia:

- I generacja (oparta na krzemie) cechuje się dominacją rynkową, wysoką stabilnością oraz rosnącą efektywnością, dzięki technologiom takim jak PERC, TOPCon, IBC czy SHJ;
- II generacja oferuje oszczędność materiałową i tańsze procesy produkcji, jednak kosztem niższej sprawności i wyzwań związanych z trwałością;
- natomiast III i IV generacja koncentrują się na nowych materiałach: organicznych, perowskitach, kropkach kwantowych czy też strukturach wielozłączowych, zmierzając do przełamania teoretycznych ograniczeń efektywności pojedynczego złącza.

Obecne kierunki rozwoju to m.in. hybrydyzacja materiałów (np. perowskit w połączeniu z krzemem), rozwój niskotemperaturowych procesów produk-

cyjnych oraz integracja ogniw z budynkami i elektroniką, co, jak wspomniano, sprzyja rozwojowi takich zastosowań, jak BIPV i IoT.

Warto podkreślić, że coraz większe znaczenie zyskują także aspekty ekologiczne i gospodarka cyrkularna, zwłaszcza w kontekście toksycznych składników oraz recyklingu.

Główne wyzwania technologiczne obejmują trwałość nowych materiałów, skalowanie produkcji do poziomu przemysłowego oraz ograniczenia wynikające z dostępności surowców krytycznych. Prognozy wskazują na dalszy spadek kosztów energii, pochodzącej z fotowoltaiki, możliwość wdrożenia tandemów perowskitowo-krzemowych do 2040 roku, a także przyszły potencjał technologii IV generacji w znaczącym zwiększeniu efektywności, przy założeniu, że zostaną przezwyciężone obecne uwarunkowania i ograniczenia fizykochemiczne.

Reasumując, rozwój fotowoltaiki to ciągły proces innowacji, w którym różne generacje ogniw współistnieją, tworząc komplementarny ekosystem technologiczny. Kluczowe znaczenie mają interdyscyplinarne badania materiałowe, automatyzacja produkcji oraz elastyczność rozwiązań, które są niezbędne dla globalnej transformacji energetycznej i realizacji celów neutralności klimatycznej.

Literatura

1. IEA, 2021, Net Zero by 2050, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>, Licence: CC BY 4.0
2. Solar (photovoltaic) panel prices vs. cumulative capacity, Our World in Data, <https://ourworldindata.org/grapher/solar-pv-prices-vs-cumulative-capacity>
3. Machín A., Márquez F., Advancements in Photovoltaic Cell Materials: Silicon, Organic, and Perovskite Solar Cells, *Materials* 2024, 17(5), 1165; <https://doi.org/10.3390/ma17051165>
4. Lugo-Laguna D., Arcos-Vargas A., Nuñez-Hernandez F., A European Assessment of the Solar Energy Cost: Key Factors and Optimal Technology, *Sustainability* 2021, 13(6), 3238; <https://doi.org/10.3390/su13063238>
5. Muteri V., Cellura M., Curto D., Franzitta V., Longo S., Mistretta M., Parisi M.L., Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels, *Energies* 2020, 13(1), 252; <https://doi.org/10.3390/en13010252>
6. Jia H., Liang L., Xie J., Zhang J., Environmental Effects of Technological Improvements in Polysilicon Photovoltaic Systems in China – A Life Cycle Assessment, *Sustainability* 2022, 14(14), 8670; <https://doi.org/10.3390/su14148670>
7. Pastuszak J., Węgierek P., Photovoltaic Cell Generations and Current Research Directions for Their Development, *Materials* 2022, 15(16), 5542; <https://doi.org/10.3390/ma15165542>
8. Photovoltaics Report, 2025.

<https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Photovoltaics-Report.pdf>

9. Vodapally S.N., Ali M.H., A Comprehensive Review of Solar Photovoltaic (PV) Technologies, Architecture, and Its Applications to Improved Efficiency, *Energies* 2023, 16(1), 319; <https://doi.org/10.3390/en16010319>
10. Fischer M., Woodhouse M., Baliozian P., International Technology Roadmap for Photovoltaics (ITRPV) 2023 Results, VDMA, 15. Edition, May 2024, <https://www.qualenergia.it/wp-content/uploads/2024/06/ITRPV-15th-Edition-2024-2.pdf>
11. The rise of back contact cell architecture, January 23, 2024, AIKO, <https://www.pv-magazine-india.com/2024/01/23/the-rise-of-back-contact-cell-architecture>
12. Rasi A., Safdar A., Irfan R., Optical Optimization of Tandem Solar Cells: A Systematic Review for Enhanced Power Conversion, *Nanomaterials* 2023, 13(23), 2985; <https://doi.org/10.3390/nano13232985>

Streszczenie

W dobie globalnej transformacji energetycznej oraz konieczności ograniczenia emisji gazów cieplarnianych, odnawialne źródła energii odgrywają kluczową rolę dla zrównoważonego rozwoju. Rozwój fotowoltaiki spowodował dynamiczny przyrost instalacji, stawiając ten rodzaj OZE za jedno z najbardziej perspektywicznych rozwiązań produkcji „zielonej energii”. Niniejszy artykuł przedstawia kompleksowy przegląd aktualnych technologii ogniw PV, z klasyfikacją według generacji, rodzaju zastosowanych materiałów oraz poziomu dojrzałości technologicznej. Szczególny nacisk położono na pierwszą generację ogniw opartych na krzemie krystalicznym), obejmującą technologie PERC, TOPCon, SHJ i IBC, które dominują obecnie w światowej produkcji modułów PV. W dalszej części omówiono technologie cienkowarstwowe drugiej generacji (CdTe, CIGS, a-Si), a także nowatorskie koncepcje trzeciej i czwartej generacji, takie jak ogniwa perowskitowe (PSC), organiczne (OPV), barwnikowe (DSSC) oraz z kropkami kwantowymi (QD-PV). Przeanalizowano ich możliwości wdrożeniowe, kierunki rozwoju oraz aktualne ograniczenia, m.in. związane z degradacją, toksycznością materiałów czy skalowalnością produkcji. Szczególną uwagę poświęcono aspektom surowcowym, które stanowią istotny czynnik ryzyka rozwoju większości technologii PV. Artykuł przedstawia również zalety i wady poszczególnych typów ogniw oraz identyfikuje kluczowe wyzwania technologiczne, których przezwyciężenie może skutkować dalszym rozwojem ogniw fotowoltaicznych – bądź ewolucyjnym, bądź rewolucyjnym.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, PV, ogniwa fotowoltaiczne

Abstract

In the era of global energy transition and the pressing need to reduce greenhouse gas emissions, renewable energy sources play a key role in achieving sustainable development. The rapid advancement of photovoltaics (PV) has led to a significant increase in installed capacity, positioning this technology as one of the most promising solutions for clean electricity generation. This article provides a comprehensive overview of current PV cell technologies, classified by generation, material composition, and technological maturity. Particular emphasis is placed on first-generation crystalline silicon (c-Si) technologies—namely PERC, TOPCon, SHJ, and IBC—which currently dominate global PV module production. The review further examines second-generation thin-film technologies (CdTe, CIGS, a-Si), as well as innovative third- and fourth-generation concepts, including perovskite solar cells (PSC), organic photovoltaics (OPV), dye-sensitized solar cells (DSSC), and quantum dot photovoltaics (QD-PV). Their commercialization potential, development directions, and current limitations—such as material degradation, toxicity, and scalability—are critically analyzed. Special attention is given to raw material availability, which constitutes a significant risk factor for the development of many PV technologies. The article also discusses the key advantages and disadvantages of different cell types and identifies major technological challenges, the resolution of which may lead to either evolutionary or breakthrough progress in photovoltaic technology.

Keywords: photovoltaics, PV, photovoltaic cells

System kaucyjny dla butelek PET w Polsce – przegląd legislacji, dobre praktyki na tle doświadczeń krajów europejskich

1. Wprowadzenie

System kaucyjny stanowi mechanizm selektywnej zbiórki odpadów, umożliwiający efektywniejsze ich pozyskiwanie z rynku oraz przyczyniający się do zwiększenia poziomu recyklingu i odzysku poprzez wprowadzenie kaucji na określone produkty. Zwrot kaucji następuje w momencie oddania opakowania przez użytkownika. W literaturze przedmiotu mechanizm ten bywa określany zamiennie mianem systemu depozytowego lub kaucyjnego, jednak w obowiązujących regulacjach prawnych dotyczących opakowań przyjęto jednolitą nomenklaturę: system kaucyjny [1].

Obecnie zasadniczym czynnikiem determinującym rozwój systemów kaucyjnych są regulacje legislacyjne na poziomie Unii Europejskiej, które nakładają na państwa członkowskie obowiązek organizacji selektywnej zbiórki odpadów opakowaniowych. Implementacja tych wymogów wiąże się jednak z występowaniem szeregu wyzwań natury legislacyjnej oraz pozalegisłacyjnej, obejmujących między innymi kwestie operacyjne, administracyjne, finansowe i infrastrukturalne. Rewizja Dyrektywy w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych określa minimalne wymagania odnoszące się do funkcjonowania systemów kaucyjnych, które powinny zostać spełnione przez państwa członkowskie [2].

Szczególnie istotnym obszarem problemowym pozostaje sektor opakowań z tworzyw sztucznych jednorazowego użytku, w przypadku którego jedynie 14% generowanych opakowań podlega procesom recyklingu [3]. Dodatkowo, w perspektywie wieloletniej obserwuje się systematyczny wzrost ilości odpadów opakowaniowych z tworzyw sztucznych. Średni poziom generacji tego typu odpadów w przeliczeniu na jednego mieszkańca Unii Europejskiej wynosi 36,1 kg rocznie, z czego zaledwie 41% poddawane jest recyklingowi [4]. W Polsce proces legislacyjny zmierzający do wdrożenia systemu kaucyjnego pozostaje na etapie procedowania, przy czym aktualny poziom zbiórki butelek PET kształtuje się na poziomie 43% [5]. W świetle celów wyznaczonych przez prawo unijne wskazany poziom pozostaje niewystarczający. W związku z powyższym, celem niniejszego opracowania jest analiza wymogów legislacyjnych oraz uwarunkowań rozwoju systemu kaucyjnego dla butelek PET w kontekście regulacji

unijnych, krajów członkowskich oraz uwarunkowań krajowych. Ponadto, artykuł ma na celu identyfikację kluczowych wyzwań oraz dobrych praktyk w zakresie wdrażania systemu.

2. Ramy europejskiego systemu kaucyjnego

Zgodnie z polityką Unii Europejskiej, celem w zakresie opakowań jest, aby do 2030 roku wszystkie z nich nadawały się do recyklingu, a do 2035 roku możliwe było pełne wdrożenie tych działań [2]. Jednym z kluczowych obszarów w tym zakresie są opakowania z tworzyw sztucznych, które odpowiadają za 40% popytu na ten surowiec [6].

Istotnym krokiem w kierunku ograniczenia negatywnego wpływu tworzyw sztucznych było opublikowanie pierwszej europejskiej strategii na rzecz tworzyw sztucznych [7]. Dokument ten zwraca uwagę m.in. na problem nadmiernego wykorzystywania jednorazowych produktów z plastiku, w tym butelek PET. Kontynuacją tych działań była tzw. Dyrektywa Single Use Plastic [8], która zobowiązuje państwa członkowskie Unii Europejskiej do zapewnienia selektywnej zbiórki jednorazowych butelek z tworzyw sztucznych na poziomie:

- 77% do 2025 roku,
- 90% do 2029 roku.

Jednym z kluczowych narzędzi służących osiągnięciu tych celów jest wprowadzenie systemu depozytowego lub innych skutecznych metod zbiórki tego typu opakowań.

Dodatkowym działaniem wspierającym cyrkularność butelek PET jest rewizja Dyrektywy w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych [2]. Nowe regulacje wprowadzają minimalne wymagania dotyczące zawartości materiału pochodzącego z recyklingu w opakowaniach PET:

- 30% do 2030 roku,
- 50% do 2040 roku.

Rewizja przewiduje również minimalne standardy dla systemów kaucyjnych wdrażanych w krajach członkowskich, dotyczące ich funkcjonowania, organizacji, etykietowania oraz monitorowania. Celem tych zapisów jest zapewnienie spójności działania systemów kaucyjnych w całej Unii Europejskiej.

3. System kaucyjny w Europie

Wśród państw, które skutecznie wdrożyły system kaucyjny dla opakowań jednorazowych, w tym butelek PET, można wymienić: Finlandię, Holandię, Chorwację, Islandię, Litwę, Łotwę, Słowację, Niemcy, Norwegię, Szwecję, Maltę, Rumunię, Węgry, Irlandię oraz Austrię. W pozostałych krajach członkowskich Unii Europejskiej toczą się obecnie dyskusje legislacyjne lub wdrażane są przepisy umożliwiające praktyczne uruchomienie takich systemów.

Za pionierów w zakresie wdrażania systemu kaucyjnego uznawane są kraje nordyckie, które od wielu lat efektywnie prowadzą działania w tym zakresie, opierając systemy głównie na automatach zwrotnych RVM (reverse vending machines) [9]. Wśród przykładów dobrych praktyk wyróżnić można:

- Szwecję, gdzie system kaucyjny dla butelek PET został wdrożony już w 1984 roku jako jeden z pierwszych w Europie. W 2024 roku organizacja Pantamera, odpowiedzialna za funkcjonowanie tego systemu, poinformowała, że poziom recyklingu butelek PET wyniósł 86,3% [10]. Wysoki poziom zaangażowania konsumentów stanowi wartość dodaną systemu, istotnie wpływając na jego skuteczność [11].
- Danię, gdzie system został wdrożony w latach 90. i obecnie osiąga najwyższy odsetek zwrotu butelek z tworzyw sztucznych na poziomie 95%, z czego 81% poddawanych jest recyklingowi. Kluczowym czynnikiem sukcesu tego modelu jest zaangażowanie wszystkich interesariuszy w całym łańcuchu wartości [12].
- Norwegię, gdzie system kaucyjny dla butelek PET oraz puszek został wprowadzony w 1999 roku, osiągając poziom zwrotu butelek z tworzyw sztucznych na poziomie 92,3% [13]. Istotnym elementem wpływającym na efektywność systemu jest rozbudowana sieć automatów zwrotnych [11].
- Finlandię, gdzie system depozytowy dla butelek PET funkcjonuje od 2008 roku, a w 2023 roku poziom zwrotu osiągnął 90% [14]. Sukces tego systemu oparty jest na wysokiej świadomości ekologicznej konsumentów oraz sprawnie funkcjonującym modelu operacyjnym.

Poza krajami nordyckimi, do przykładów efektywnego wdrożenia systemu kaucyjnego zalicza się również Niemcy - selektywna zbiórka odpadów oparta jest na dobrze zorganizowanej sieci automatów zwrotnych, uzupełnianej przez zbiórkę manualną, co zapewnia wysoką skuteczność działania systemu [15]. Przykładem udanego wdrożenia systemu w Europie Środkowo-Wschodniej jest również Litwa, gdzie przed wprowadzeniem systemu kaucyjnego poziom selektywnej zbiórki butelek PET wynosił 34,3%, natomiast po dwóch latach działania systemu osiągnął imponujący poziom 91,9%. Efektywność litewskiego

modelu wynika zarówno z dobrze funkcjonującego systemu operacyjnego, jak i z wysokiej świadomości konsumentów [16].

Jednocześnie należy zauważyć, że część krajów europejskich nadal boryka się z wyzwaniami związanymi z wdrożeniem systemów depozytowych. Przykładem są Francja i Hiszpania, gdzie prowadzone są programy pilotażowe, Portugalia, która planuje pełne wdrożenie systemu dopiero w 2026 roku, a także Włochy i Grecja, gdzie brakuje odpowiednich mechanizmów operacyjnych wspierających funkcjonowanie takich systemów.

4. System kaucyjny w Polsce

Ustawa z dnia 13 lipca 2023 r. o zmianie ustawy o gospodarce opakowaniami i odpadami opakowaniowymi oraz niektórych innych ustaw wprowadziła w Polsce system kaucyjny. Zgodnie z pierwotnymi planami, system ten miał zostać wdrożony już w 2023 roku [17]. Jednak na poziomie krajowym prace nad jego pełnym uruchomieniem nadal trwają. Całkowity koszt operacyjny funkcjonowania systemu w okresie 2025–2034 szacowany jest na 23,1 mld zł [18]. W ramach systemu kaucyjnego będą objęte następujące opakowania:

- butelki jednorazowego użytku z tworzyw sztucznych przeznaczone na napoje o pojemności do trzech litrów,
- puszki metalowe o pojemności do jednego litra,
- butelki szklane wielokrotnego użytku o pojemności do półtora litra.

5.

Kluczowym celem wprowadzenia systemu kaucyjnego jest osiągnięcie wymaganych wskaźników dotyczących selektywnej zbiórki odpadów, w szczególności butelek PET. W perspektywie do 2029 roku założono, że 90% tych butelek powinno być zebrane w ramach systemu. Z punktu widzenia konsumentów oraz punktów handlowych szczególne znaczenie mają następujące zasady dotyczące butelek PET:

- sklepy o powierzchni przekraczającej 200 m² będą zobowiązane do uczestnictwa w systemie, natomiast mniejsze sklepy będą mogły przystąpić do niego dobrowolnie,
- wysokość kaucji za każde opakowanie objęte systemem wyniesie 50 groszy,
- wszystkie opakowania objęte systemem będą oznaczone specjalnym logotypem,
- zwrot opakowań nie będzie wymagał okazania paragonu,
- zwracane opakowania nie mogą być zgniecione przed oddaniem.

Powyższe zasady mają na celu maksymalne ułatwienie udziału konsumentów w systemie oraz zwiększenie poziomu odzysku opakowań, przy jednoczesnym zapewnieniu transparentności i jednolitych standardów działania.

Istotnym elementem funkcjonowania systemu kaucyjnego jest wyznaczenie operatorów odpowiedzialnych za jego organizację i obsługę. Do

chwili obecnej zezwolenie na prowadzenie systemu kaucyjnego otrzymało pięć organizacji [19] :

- ZWROTKA S.A.,
- POLKA S.A.,
- OK OPERATOR KAUCYJNY S.A.,
- EKO-OPERATOR S.A.,
- RESELEKT S.A.

Zgodnie z art. 40 ust. 1 ustawy, operator systemu kaucyjnego odpowiada za organizację selektywnego zbierania, transportu oraz przetwarzania opakowań i odpadów opakowaniowych. Do jego zadań należy także prowadzenie ewidencji, rozliczanie kaucji oraz finansowanie kosztów zbiórki. Operatorzy zobowiązani są do zapewnienia odbioru opakowań od punktów handlowych oraz do wypłaty kaucji użytkownikom końcowym [20].

Na skuteczność działania systemu kaucyjnego wpływa nie tylko działalność operatorów i konsumentów, ale również zaangażowanie innych uczestników ekosystemu. Kluczową rolę w tym zakresie odgrywają:

- gminy,
- sortownie odpadów,
- sieci handlowe,
- pojedyncze sklepy uczestniczące w systemie.

Ich współpraca oraz poziom dostosowania infrastruktury do wymogów systemu będą miały bezpośrednie przełożenie na jego efektywność i możliwość osiągnięcia założonych poziomów selektywnej zbiórki.

Ważnym aspektem wdrażania systemu pozostaje również dalsze doprecyzowywanie przepisów prawnych oraz zasad funkcjonowania systemu na poziomie pozalegisłacyjnym. Temu celowi służy Ustawa z dnia 21 listopada 2024 r. o zmianie ustawy o gospodarce opakowaniami i odpadami opakowaniowymi oraz niektórych innych ustaw, która rozwija i precyzuje istniejące regulacje.

6. Podsumowanie

Wdrażanie systemu kaucyjnego w Polsce stanowi istotny krok w kierunku realizacji celów unijnych w zakresie gospodarki o obiegu zamkniętym oraz zwiększenia poziomu selektywnej zbiórki odpadów opakowaniowych. Kluczowym elementem sukcesu tego systemu będzie zapewnienie odpowiedniej infrastruktury, sprawnej organizacji oraz skutecznej komunikacji z konsumentami. Istotne pozostaje także konsekwentne doprecyzowywanie przepisów oraz efektywna współpraca wszystkich interesariuszy, w tym operatorów, punktów handlowych, gmin i konsumentów. Doświadczenia innych krajów europejskich pokazują, że dobrze zaprojektowany system kaucyjny może znacząco podnieść poziom recyklingu butelek PET oraz innych opakowań objętych systemem. Ostateczny sukces wdrażanego rozwiązania będzie zależał od umiejętnego połączenia rozwiązań prawnych, technicznych oraz społecznych, które razem stworzą spójny i efektywny model działania

Literatura

1. Badowska-Domagała E.: System kaucyjny – analiza prawna. *Studia Administracyjne*, (20), 5-24, 2024.
2. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2025/40 z dnia 19 grudnia 2024 r. w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych, zmiany rozporządzenia (UE) 2019/1020 i dyrektywy (UE) 2019/904 oraz uchylecia dyrektywy 94/62/WE.
3. Ellen MacArthur Foundation: *The New Plastics Economy: Catalysing action*. Ellen MacArthur Foundation, 2017.
4. Eurostat:
https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-eurostat-news/w/ddn-20241024-3?utm_source= (dostęp 21.04.2025)
5. Piontek W., Sidorczuk-Pietraszko E., Rachwał T.: Will Deposit-Return System will be effective in achieving the objectives of Single Use Plastic Directive for plastic bottles in Poland?. *Economics and Environment*, 2024.
6. Plastic Europe: *Plastics – the Facts 2022*, <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-facts-2022/>, 2022.
7. Komisja Europejska: *Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady, Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów, Europejska strategia na rzecz tworzyw sztucznych w gospodarce o obiegu zamkniętym*, COM(2018) 28 final, 2018.
8. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2019/904 z dnia 5 czerwca 2019 r. w sprawie zmniejszenia wpływu niektórych produktów z tworzyw sztucznych na środowisko.
9. Rudewicz J.: Rola systemów depozytowo-zwrotnych (kaucyjnych) w organizacji recyklingu odpadów komunalnych w państwach Europy. *Wykorzystanie automatów RVM (butelkomatów)*. Prace Komisji Geografii Przemysłu Polskiego Towarzystwa Geograficznego, 34(2), 50-70, 2020.
10. Pantamera:
<https://www.pantamera.nu/en/private-citizen/facts--statistics/deposit-statistics>. ((dostęp 21.04.2025)
11. Lakhan C.: Evaluating the effectiveness, costs, and challenges of deposit return systems for beverage containers: A meta-analysis. *Costs, and Challenges of Deposit Return Systems for Beverage Containers: A Meta-Analysis* (September 03, 2024).
12. Dansk Retur System: *The story of a deposit system for a circular economy*, https://danskreturssystem.dk/app/uploads/2022/04/DRS_Whitepaper_2022_04_UK-low_final.pdf, 2022.

13. TOMRA: Norway deposit return scheme, <https://www.tomra.com/reverse-vending/media-center/feature-articles/norway-deposit-return-scheme>, (dostęp 22.04.2025)
14. Palpa: Deposit refund system, <https://www.palpa.fi/beverage-container-recycling/deposit-refund-system/>, (dostęp 22.04.2025)
15. TOMRA: Germany deposit return scheme, <https://www.tomra.com/reverse-vending/media-center/feature-articles/germany-deposit-return-scheme> (dostęp 24.04.2025)
16. Interreg Europe: Lithuanians deposit system, <https://www.interregeurope.eu/good-practices/lithuanians-deposit-system>. (dostęp 23.04.2025)
17. Zarębski A., Zarębska J., Marosek K.: Implementation of the deposit system in Poland as a tool for implementing the circular economy. *Energies*, 17(21), 5489, 2024.
18. Deloitte: System kaucyjny - koszty, perspektywy, szanse, <https://www.deloitte.com/pl/pl/services/consulting-risk/research/raport-sytem-kaucyjny-w-Polsce-koszty-perspektywy-szanse.html>, 2024.
19. Ministerstwo Klimatu i Środowiska: System kaucyjny - operatorzy, <https://www.gov.pl/web/klimat/system-kaucyjny-operatorzy>, (dostęp 23.04.2025)
20. Ustawa z dnia 13 lipca 2023 r. o zmianie ustawy o gospodarce opakowaniami i odpadami opakowaniowymi oraz niektórych innych ustaw wprowadzona system kaucyjny w Polsce.

Streszczenie

Artykuł przedstawia analizę uwarunkowań prawnych oraz organizacyjnych dotyczących wdrażania systemu kaucyjnego dla butelek PET w Polsce, w kontekście regulacji Unii Europejskiej i doświadczeń innych państw członkowskich. Opisano cele oraz minimalne wymagania wynikające z Dyrektywy Single Use Plastic oraz rewizji Dyrektywy w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych, podkreślając znaczenie selektywnej zbiórki oraz zawartości recyklatu w opakowaniach. Przeanalizowano modele funkcjonujących systemów kaucyjnych w Europie, wskazując na dobre praktyki oraz kluczowe czynniki sukcesu, takie jak sprawna organizacja, infrastruktura i zaangażowanie konsumentów. W części dotyczącej Polski omówiono stan prac legislacyjnych, planowany zakres systemu oraz rolę operatorów. Zwrócono uwagę na wyzwania związane z implementacją, podkreślając konieczność współpracy wszystkich uczestników systemu i dalszego doprecyzowywania przepisów.

Słowa kluczowe: system kaucyjny, butelki PET, recykling, odpady opakowaniowe

Abstract

The article presents an analysis of the legal and organizational conditions for implementing a deposit return system for PET bottles in Poland, in the context of European Union regulations and the experiences of other member states. It outlines the goals and minimum requirements set by the Single Use Plastics Directive and the revision of the Packaging and Packaging Waste Directive, emphasizing the importance of selective collection and the use of recycled content in packaging. The article reviews functioning deposit systems across Europe, highlighting best practices and key success factors such as effective organization, infrastructure, and consumer engagement. The section on Poland discusses the current legislative process, the planned scope of the system, and the role of system operators. The challenges related to implementation are addressed, stressing the need for cooperation among all stakeholders and the continuous refinement of legal frameworks.

Keywords: deposit return system, PET bottles, recycling, packaging wast

Normy i zalecenia dotyczące kruszyw z recyklingu w różnych krajach

1. Wprowadzenie.

W obliczu globalnych wyzwań, takich jak zmiany klimatyczne, rosnąca urbanizacja oraz wyczerpywanie się zasobów naturalnych, efektywne wykorzystanie odpadów budowlanych nabiera kluczowego znaczenia. Kruszywa z recyklingu, pozyskiwane z materiałów takich jak beton, asfalt czy ceramika, stanowią ekologiczne i ekonomiczne rozwiązanie, które nie tylko redukuje ślad węglowy, ale także zmniejsza ilość odpadów (Pacheco-Torgal et al., 2013). Wprowadzenie tych surowców do branży budowlanej to jeden z najważniejszych kroków na drodze do zrównoważonego rozwoju.

W wielu krajach obowiązują różne normy i zalecenia dotyczące jakości oraz stosowania kruszyw z recyklingu. Regulacje te uwzględniają lokalne uwarunkowania geograficzne, technologiczne i społeczne, a także poziom rozwoju branży budowlanej (González-Fonteboa et al., 2019). Przykładowo, w krajach skandynawskich, gdzie ochrona środowiska jest priorytetem, normy jakościowe dotyczące kruszyw RCA (Recycled Concrete Aggregate) są wyjątkowo rygorystyczne, co gwarantuje ich wysoką jakość i bezpieczeństwo w zastosowaniach budowlanych (Bunluesin et al., 2019). Z kolei w niektórych krajach rozwijających się, gdzie potrzeby infrastrukturalne są ogromne, kruszywa z recyklingu mogą być stosowane na większą skalę. Brak odpowiednich regulacji lub ich niedostateczne rozwinięcie może jednak ograniczać bezpieczne i efektywne wykorzystanie tych materiałów (Kumar et al., 2020). Wdrożenie kompleksowych norm jest kluczowe dla zapewnienia trwałości i bezpieczeństwa konstrukcji, a także ochrony środowiska.

Normy dotyczące kruszyw z recyklingu obejmują szereg aspektów, takich jak wymagania jakościowe, metody produkcji, klasyfikacja oraz testowanie materiałów. W Europie normy EN regulują techniczne parametry dla kruszyw, co ma na celu zapewnienie ich bezpieczeństwa i trwałości (European Committee for Standardization, 2017). Przykładem krajowych rozwiązań są Niemcy, gdzie recykling kruszyw stał się integralną częścią procesu budowlanego. Niemieckie przepisy nie tylko promują wykorzystanie materiałów z recyklingu, ale również oferują zachęty finansowe dla projektów stosujących takie rozwiązania (Schiller, 2018). Tego

rodzaju działania sprzyjają rozwojowi bardziej ekologicznych metod budownictwa oraz przyczyniają się do redukcji emisji CO₂.

W Stanach Zjednoczonych istnieją różne programy certyfikacji wspierające wykorzystanie materiałów z recyklingu w budownictwie, co sprzyja rozwojowi innowacji technologicznych w tej dziedzinie (Miller et al., 2019). Analiza zróżnicowanych podejść do recyklingu kruszyw w różnych krajach pokazuje, że kluczowym elementem sukcesu jest współpraca między sektorem publicznym a prywatnym (Zhao et al., 2020). Takie partnerstwo umożliwia skuteczniejsze wdrażanie norm oraz promuje szersze zastosowanie kruszyw z recyklingu w branży budowlanej.

Zrównoważone podejście do budownictwa wymaga nie tylko odpowiednich regulacji, ale również edukacji oraz zwiększania świadomości społecznej na temat korzyści wynikających z wykorzystania materiałów z recyklingu. W miarę jak świat dąży do bardziej zrównoważonego rozwoju, recykling kruszyw staje się nie tylko koniecznością, lecz także kluczowym krokiem w stronę bardziej ekologicznej przyszłości (Tam et al., 2020). Ostatecznie, szerokie wdrażanie tych praktyk przyczynia się do zrównoważonego rozwoju całego sektora budowlanego.

Niniejszy artykuł przedstawia analizę norm i zaleceń dotyczących kruszyw z recyklingu w różnych krajach, ze szczególnym uwzględnieniem ich wpływu na zrównoważony rozwój w branży budowlanej. Celem jest zidentyfikowanie różnorodności regulacji, ocena ich wpływu na jakość i bezpieczeństwo materiałów oraz wskazanie barier i najlepszych praktyk, które mogą wspierać ich szersze zastosowanie. Prezentując kompleksowy przegląd aktualnych praktyk i regulacji, artykuł dostarcza wskazówek zarówno dla decydentów, jak i praktyków, chcących wspierać zrównoważone budownictwo.

2. Zróżnicowanie norm i regulacji dotyczących kruszyw z recyklingu w różnych krajach.

Kruszywa z recyklingu powstają w wyniku przetwarzania odpadów budowlanych, takich jak beton cementowy, żelbet, cegły czy ceramika, które poddaje się procesowi kruszenia. Kruszenie to

mechaniczny proces, w którym materiały są rozdrabniane na mniejsze frakcje, różniące się wielkością – od grubszego kruszywa po drobniejsze cząstki przypominające piasek. Otrzymany materiał jest następnie sortowany i przesiewany w celu uzyskania odpowiednich frakcji, które mogą zastąpić kruszywo naturalne (Babiak et al., 2017).

Kruszywo z recyklingu, w zależności od rodzaju pierwotnego materiału, wykazuje zróżnicowane właściwości mechaniczne i fizyczne. Na przykład kruszywa pozyskiwane z betonu cementowego zazwyczaj charakteryzują się lepszymi parametrami wytrzymałościowymi w porównaniu z kruszywami pochodzącymi z gruzu ceglanego (Corinaldesi, Isolani i Moriconi, 2017). Kruszywa te mogą być wykorzystywane w produkcji betonu cementowego, zastępując częściowo lub całkowicie kruszywa naturalne. Takie podejście przyczynia się zarówno do zmniejszenia zużycia surowców naturalnych, jak i redukcji ilości odpadów budowlanych (de Andrade Salgado i de Andrade Silva, 2022).

Ważne jest jednak, aby materiały z recyklingu spełniały określone normy jakości, obejmujące takie parametry jak odpowiednia absorpcja wody, wytrzymałość mechaniczna oraz niska zawartość zanieczyszczeń (Babiak et al., 2017). Dzięki skutecznej kontroli jakości, kruszywa z recyklingu mogą być z powodzeniem stosowane nie tylko w produkcji betonu konstrukcyjnego, ale również w innych zastosowaniach budowlanych, takich jak podbudowy drogowe, fundamenty czy stabilizacja gruntów (Corinaldesi, Isolani i Moriconi, 2017). Rekomendacje normy RILEM TC 121-DRG TF1 klasyfikują kruszywa z recyklingu pochodzące z rozbiórki na trzy kategorie:

- typ I – kruszywo pochodzące wyłącznie z gruzu ceglanego,

- typ II – kruszywo pochodzące wyłącznie z gruzu betonowego,
- typ III – kruszywo mieszane składające się z co najmniej 80% kruszywa naturalnego i maksymalnie 10% kruszywa typu I (Babiak et al., 2017).

Przepisy oraz wytyczne dotyczące stosowania kruszyw z recyklingu różnią się w zależności od kraju, co wynika zarówno z odmiennych regulacji prawnych, jak i specyficznych uwarunkowań technologicznych. W niektórych krajach, na przykład we Włoszech, wykorzystanie kruszyw z recyklingu jest ograniczone do zastosowań takich jak budowa dróg oraz fundamenty podłogowe. Zgodnie z włoską normą UNI 8520-1, do konstrukcji żelbetowych dopuszcza się jedynie kruszywa naturalne.

W Holandii norma NEN 5905:1997 dopuszcza możliwość stosowania kruszyw z recyklingu w betonie konstrukcyjnym. Ogólne specyfikacje są zbliżone do tych obowiązujących dla kruszyw naturalnych. W szczególności, kruszywo z recyklingu może być traktowane na równi z naturalnym, gdy zastępuje ono mniej niż 20% kruszywa naturalnego lub gdy mniej niż 10% tego zamiennika pochodzi z gruzu murarskiego. Jeśli wymiana przekracza 20%, co najmniej 95% kruszyw z recyklingu musi pochodzić z gruzu betonowego (Corinaldesi, Isolani i Moriconi, 2017). W wielu aplikacjach betonów z kruszywem recyklingowym podkreśla się, że starannie wyselekcjonowany materiał, produkowany zgodnie z odpowiednim reżimem technologicznym, może stanowić wartościowy materiał budowlany. Technologie usuwania pozostałości starego zaczynu lub eliminacji ich szkodliwego wpływu, które są w fazie opracowywania, dają nadzieję na przemysłowe odzyskiwanie kruszyw różnorodnego pochodzenia, których jakość będzie zbliżona do jakości kruszyw naturalnych.

Tabela 1. Specyfikacje dotyczące kruszyw pochodzących z recyklingu gruzu betonowego.

Normy/dane		RILEM TC 121 Wytyczne '93	Holandia NEN 5905:1997	Japan Prop. Stand. '81	Germany Guideline '98
Masa objętościowa (kg/m ³)	suchy	≥ 2000	≥ 2000	≥ 2000* ≥ 2200**	≥ 2000
	SSD***	≥ 2200 dla ≥ 90% ≥ 1800 dla ≥ 99%	≥ 2100 dla ≥ 90%	≥ 2200* ≥ 2300**	
Absorpcja wody (% wagowy)		≤ 10		≤ 13* ≤ 7**	≤ 10* ≤ 15**

Siarczany (SO ₃ %)		≤ 1	≤ 1			≤ 1
Cl ⁻ (%)	beton zbrojony		≤ 0.1* ≤ 0.05**			≤ 0.04
	beton sprężony		≤ 0.015* ≤ 0.007**			≤ 0.04
Materiał organiczny		≤ 0.5	nieobecny			nieobecny
Krzemionka alkaliczna materiał reaktywny			nieobecny			nieobecny
Składniki niekamieniste (% wagowo)		Szkło + bitum ≤ 1 Metale ≤ 1	Drewno: ≤ 0,5* ≤ 1,0** Bitum + guma +metal +szkło ≤1 Kruchy mat. ≤1		Zanieczyszcze nie A (głina, wapno.) ≤10 kg/m ³ Zanieczyszcze nie B (wełna, papier, bitum...) ≤ 2 kg/m ³	Cegły + gazobeton + asfalt ≤ 5 Mata nie zawierająca minerałów. + szkło ≤ 0,2
Piasek (frakcja < 2 mm)		≤ 5 % (< 4 mm)			nieobecny	≤ 7 % do użytku wewnętrznego nieobecny do użytku zewnętrznego
Bardzo cienki materiał (frakcja < 75 μm)		Maks. 2 % (< 63 μm)	Maks. 4 % (< 63 μm)		≤ 7 %* ≤ 1.5 %**	
Wielkość ziarna Dystrybucja			Procent na sito (% wag.)			
Frakcja (mm)			0 - 4	4 -16		
Sito (mm)	16		-	0 - 5		
	8		-	55-57		
	4		0-10	85-100		
	2		25-31	95-100		
	1		50-62	-		
	0.250	80-87	-			
	0.063	96-100	99-100			

* drobna frakcja (< 2 mm); ** frakcja gruba (> 2 mm); *** nasyceny suszony powierzchniowo

Źródło: Corinaldesi, Isolani and Moriconi, 2017.

Tabela 2. Właściwości fizyczne różnych frakcji kruszyw z recyklingu zgodnie z normami UNI 8520.

Frakcja		A	B	C	D	M1	M2
Rozmiar (mm)		0-5	5-15	15-30	30-120	0-15	0-120
Masa objętościowa (kg/m ³)	suchy	2045	2110	2275	2113	2225	2099
	SSD*	2204	2226	2355	2213	2387	2320
Absorpcja wody (% wagowo)		7.8	5.3	5.8	8.7	6.9	9.1
Porowatość (% objętości)		22,6	11,4	15,2	18,4	20,3	18,4
Średni rozmiar porów (Å)		12128	392	1022	1740	5140	3120
Rozkład wielkości ziaren		Skumulowany procent na sicie (% wagowo)					
Sito (mm):	127	0	0	0	0	0	0
	101,6	0	0	0	9	0	4
	76,2	0	0	0	16	0	17
	50,8	0	0	0	57	0	27
	38,1	0	0	0	89	0	36
	25,4	0	0	6	98	0	50
	19,1	0	0	35	99	4	53
	12,7	0	8	95	99	15	68
	9,52	0	37	97	99	20	74
	4,76	10	96	98	99	41	86
	2,38	39	97	98	100	56	91
	1,19	64	97	98	100	66	93
	0,595	82	98	99	100	82	95
	0,297	95	98	99	100	95	98
	0,149	98	99	100	100	99	99
	0,074	99	100	100	100	99	100
	dno	100	100	100	100	100	100

*Suszony powierzchniowo

Źródło: Corinaldesi, Isolani and Moriconi, 2017.

Masa objętościowa kruszyw z recyklingu jest zwykle mniejsza niż masa kruszyw naturalnych, co wynika z obecności oryginalnej zaprawy przylegającej do powierzchni ziaren (szczególnie mniejszych), co również zwiększa ich absorpcję wody. Może to stanowić problem przy ustalaniu odpowiedniego stosunku woda/cement, a także przy kontroli mieszanki. Szybkość wchłaniania wody po

wstępnym wymieszaniu różni się w zależności od rodzaju materiału, co utrudnia kontrolę urabialności. Zasadniczo, im wyższa zawartość drobnego materiału, tym wyższa absorpcja wody (Tabela 1). Zgodnie z normą UNI 8520-2, badane materiały nie spełniają wymagań dotyczących masy objętościowej ($\geq 2300 \text{ kg/m}^3$) oraz absorpcji wody ($\leq 5\%$) (Corinaldesi, Isolani i Moriconi, 2017).

Zawartość siarczanów, chlorków, materiałów organicznych oraz materiałów alkaliczno-krzemionkowych oceniano zgodnie z metodami zalecanymi przez normę UNI 8520 (Tabela 3). W odniesieniu do tych parametrów badane materiały mogą być akceptowane i zakwalifikowane do klasy A. Tabela 4 przedstawia normy regulujące stosowanie kruszyw z recyklingu w różnych krajach.

Międzynarodowe normy ograniczają stosowanie kruszyw z recyklingu w betonach konstrukcyjnych, a dopuszczalna zawartość kruszywa z recyklingu zależy od pożądanej klasy wytrzymałości betonu oraz właściwości samego kruszywa, takich jak skład, gęstość w stanie suchym, absorpcja wody oraz procent zanieczyszczeń.

Tabela 3. Skład i zawartość substancji chemicznych w różnych frakcjach sitowych materiałów pochodzących z recyklingu.

Ułamek		A	B	C	D	M1	M2
Rozmiar (mm)		0-5	5-15	15-30	30-120	0-15	0-120
Waga (%)	murarstwo	32	25	29	35	30	30
	obojętny	30	29	25	22	33	17
	beton	35	45	41	39	34	49
	asfalt	2	0.5	4	3	2	3
	drewno, szkło, gips	1	0.5	1	1	1	1
Siarczany (SO_3 % wagowo)		0.154	0.070	0.082	0.094	0.120	0.098
Chlorki (Cl^- % wagowo)		0.042	0.035	0.029	0.031	0.026	0.023
Węglan wapnia (% wagowo)		49	67	59	38	44	47
Składniki organiczne		nieobecny	nieobecny	nieobecny	nieobecny	nieobecny	nieobecny
Alkaliczno-krzemionkowy materiał reaktywny		nieobecny	nieobecny	nieobecny	nieobecny	nieobecny	nieobecny

Źródło: Corinaldesi, Isolani and Moriconi, 2017

Tabela 4. Porównanie międzynarodowych standardów recyklingu.

Kraj recyklingu	Norma	Źródło	Rodzaj gruboziarnistego kruszywa z recyklingu	Beton specyfikacje	%RA dozwolony	Charakterystyka kruszywa z recyklingu							
						Beton (%)	Frakcja murarska (%)	Gęstość w stanie suchym (km/m³)	Absorpcja wody (%)	SO4 (%)	Cl (%)	Zanieczyszczenia mineralne (%)	Przepuszczałość sita 75 µm (%)
Brazylia	NBR 15116	(ABNT, 2021)	RCA CRA RMA	Beton konstrukcyjny Beton niekonstrukcyjny Beton niekonstrukcyjny	20% n. d.	100 > 90 < 90	- < 10 ≥ 10	n. d. 	≤ 7 ≤ 12 	≤ 0.1 ≤ 0.2 	≤ 0.1 ≤ 0.2 	≤ 1 	≤ 10 ≤ 12
Portugalia	LNEC E471	(LNEC, 2006)	RCA 1 RCA 2 RMA	C 35/45 C 40/50 n. d.	25% 20% n. d.	> 90 > 70 ≤ 10	≤ 10 ≤ 30 > 90	≥ 2200 ≥ 2000	≤ 7 	≤ 0.8 	n. d.	< 0.2 < 0.5 < 1	n. d.
Niemcy	DIN422-100 DIN12620	(DIN, 2002)	RCA (odpady betonowe) RCA (odpady rozbiórkowe) RBA (gruz ceglany) RMA (mieszany materiał)	Beton konstrukcyjny Beton niekonstrukcyjny	90% 70% 20% n. d.	> 90 > 70 < 20 -	< 10 < 30 > 80 > 80 *	≥ 2000 ≥ 1800 ≥ 1500	≤ 10 ≤ 15 ≤ 20 n. d.	n. d. 	≤ 0.04 ≤ 0.15	≤ 0.2 ≤ 0.5 ≤ 1	n. d.
Włochy	NTC-2008	(DIN, 2008)	RCA	C 30/37	30%	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.	n. d.
Holandia	NEN 5905	(Royal Netherlands Standardization Institute, 1997)	RCA RMA	C 45/55 Beton niekonstrukcyjny	20% n. d.	n. d.	n. d.	≥ 2100 ≥ 2000	n. d.	≤ 1	≤ 1	≤ 1	n. d.
Wielka Brytania	BS 8500-2	(BSI, 2002)	RCA RA	C 20/25 i C 40/50 C 16/20	20% 100%	> 95 -	< 5 < 100	n. d.	n. d.	≤ 1 n. d.	n. d.	≤ 0.5 ≤ 1	≤ 5 ≤ 3
RILEM		(RILEM, 1994)	RCA 1 RCA 2 RMA	C 50/50 C 16/20 Bez limitu	100% 100% 20%	n. d.	n. d.	≥ 2000 ≥ 1500 ≥ 2400	≤ 10 ≤ 20 ≤ 3	≤ 1	n. d.	n. d.	n. d.
Japonia	JIS A 5021	(Japan Society of Civil Engineers, 2021)	RCA	Klasa C 45/55	n. d.	n. d.	< 2	≥ 2500	≤ 3	n. d.	≤ 0.04	≤ 1	≤ 1
Chiny	DG/TJ 07/008	(Li, 2008)	RCA RMA	n. d.	n. d.	≥ 95 ≤ 90	< 5 > 10	n. d.	< 10 n. d.	< 1 n. d.	< 0.25 n. d.	< 1 n. d.	< 2 n. d.
Australia	HB 155:2002	(Li, 2009)	RCA (klasa 1A) RCA (klasa 1B)	C 40 C 25	30% 100%	< 100 < 70	- > 30	≥ 2100 ≥ 1800	≤ 6 ≤ 8	n. d.	n. d.	< 1 < 2	n. d. n. d.

*20% materiałów bitumicznych i innych.

Źródło: de Andrade Salgado and de Andrade Silva, 2022.

Tabela 5. Indyjskie standardowe zalecenia dotyczące stosowania kruszywa betonowego z recyklingu do betonu.

Rodzaj prac	Maksymalny procent zamiennika	Klasa betonu
Chudy beton	100% z RA	Do M15
Zwykły beton	25% z RA	-
Beton zbrojony	20% z RA	Do M25

Źródło: Mistri et. al., 2020.

Do 2020 roku w Brazylii kruszywa z recyklingu były ograniczone do zastosowań niekonstrukcyjnych. Jednak rewizja normy ABNT NBR 15116:2021 dopuściła stosowanie do 20% kruszywa z recyklingu w betonie konstrukcyjnym dowolnej klasy wytrzymałości, pod warunkiem spełnienia określonych wymagań, takich jak absorpcja wody do 7%, zawartość SO_4 i Cl poniżej 0,1% oraz zawartość zanieczyszczeń mniejsza niż 1% (de Andrade Salgado & de Andrade Silva, 2022). Ogólnie rzecz biorąc, normy dotyczące kruszyw z recyklingu wykazują znaczące różnice w zależności od kraju, co wpływa na ich zastosowanie w budownictwie. Włochy i Niemcy mają bardziej restrykcyjne regulacje, podczas gdy Holandia i Brazylia wykazują większą elastyczność, co może sprzyjać szerszemu wykorzystaniu kruszyw z recyklingu. Normy w Indiach wskazują na chęć eksploracji potencjału recyklingu, umożliwiając bardziej liberalne podejście w budownictwie.

3. Polskie przepisy i normy w zakresie recyklingu kruszyw.

Recykling kruszyw w Polsce staje się coraz bardziej istotny, zarówno z powodu ograniczonych zasobów surowców naturalnych, jak i rosnącego zapotrzebowania na materiały budowlane w związku z rozwojem mieszkalnictwa oraz dużą liczbą wyeksploatowanych obiektów budowlanych. W Polsce istnieje wiele budynków, które zostały wzniesione w poprzednich dekadach i wymagają rozbiórki lub renowacji z powodu złego stanu technicznego. Choć dokładne dane dotyczące liczby wyeksploatowanych obiektów nie są łatwo dostępne, można zauważyć pewne istotne trendy w budownictwie. Na przykład, w 2023 roku w

Polsce oddano do użytkowania około 221,3 tys. mieszkań, co wskazuje na dużą liczbę nowych inwestycji. W tym samym czasie, w pierwszej połowie 2023 roku, organy nadzoru budowlanego wydały 1692 nakazy rozbiórki, co wskazuje na znaczną liczbę obiektów w złym stanie (Główny Urząd Nadzoru Budowlanego, 2023). Spadek liczby mieszkań oddanych do użytku w 2024 roku (o 18% w porównaniu do roku poprzedniego) podkreśla potrzebę efektywnego zarządzania zasobami budowlanymi i recyklingiem kruszyw (GUS, 2023).

Polskie przepisy i normy w zakresie recyklingu kruszyw, w tym normy jakościowe oraz wymagania dotyczące zanieczyszczeń, odgrywają kluczową rolę w zapewnieniu wysokiej jakości materiałów budowlanych. Zgodnie z polskimi normami, recykling kruszyw powinien być zgodny z wymaganiami dotyczącymi dopuszczalnych stężeń zanieczyszczeń, co zapewnia zgodność materiałów z normami budowlanymi. Zanieczyszczenia obecne w kruszywach w dużej mierze zależą od miejsca ich wydobywania lub składowania. W przypadku kruszyw recyklingowych mogą pojawić się dodatkowe zanieczyszczenia, wynikające zarówno z eksploatacji obiektu przed wyburzeniem, jak i z samego procesu wyburzania.

W polskim budownictwie istotna jest jakość kruszyw, klasyfikowanych w ramach kategorii LA, które oceniają ich odporność na rozdrabnianie. Kategorie te określane są na podstawie badań laboratoryjnych, a klasyfikacja obejmuje oznaczenia od LA20 do LA100. Kruszywa w kategorii LA20 charakteryzują się najwyższą jakością i najniższą podatnością na rozdrabnianie, co czyni je odpowiednimi do bardziej wymagających zastosowań budowlanych. Kategoria LA30 obejmuje kruszywa o umiarkowanej odporności, natomiast wyższe numery, takie jak LA50, LA55, LA73 czy LA100, wskazują na niższą jakość i większą podatność na rozdrabnianie (Babiak et al., 2017).

Zrozumienie tych kategorii jest kluczowe dla zapewnienia odpowiedniej jakości materiałów budowlanych oraz zgodności z normami, co ma bezpośredni wpływ na trwałość i bezpieczeństwo konstrukcji. Właściwy dobór kruszyw, uwzględniający zarówno ich czystość, jak i kategorię LA, jest niezbędny do efektywnego zarządzania zasobami w branży budowlanej, zwłaszcza w kontekście recyklingu. Najlepszy wynik w przykładowym badaniu odporności na rozdrabnianie (Tabela 6) uzyskał melafir, który przypisano do kategorii LA20. Pozostałe kruszywa łamane zaklasyfikowano do niższej kategorii LA30. Kategorię LA30 uzyskały również kruszywa naturalne oraz żużel. Najlepsze parametry spośród

kruszyw recyklingowych osiągnęła próbka z niefrakcjonowanym, pokruszonym betonem, która również trafiła do kategorii LA30. Pozostałe kruszywa z recyklingu, takie jak kruszony beton o frakcji 0/63 mm, gruz ogólnobudowlany oraz cegła, uzyskały wyniki odpowiednio 46,5; 55 i 73. Najgorszy wynik zanotowano dla gazobetonu, który przesiał się w 100% przez sito 1,6 mm (Babiak et al., 2017).

Tabela 6. Wyniki oznaczenia odporności na rozdrabnianie badanych próbek kruszyw.

Kruszywo	Pozostałość na sicie 1,6 mm [g]	Wyniki badań	Kategoria LA
Żwir „A” 0/315	3665	26,7	LA30
Granit „B” 0/31,5	3590	28,2	LA30
Bazalt „C” 0/31,5	3724	25,5	LA30
Melafir „D” 0.63	4236	15,3	LA20
Recykling „E” 0/63	2251	55,0	LA55
Recykling „F”	3626	27,5	LA30
Recykling „G”	2673	46,5	LA50
Recykling „H”	1350	73,0	LA73
Recykling „I”	0	100	LA100

Źródło: Babiak et. al., 2017.

Badane betony na bazie kruszyw naturalnych i wtórnych wykazują większe zróżnicowanie cech w porównaniu do betonu zwykłego. Ze względu na różnorodne źródła pochodzenia oraz skład kruszywa recyklingowego, konieczne jest jego szczegółowe badanie zgodnie z zaleceniami zawartymi w normach dotyczących kruszyw do mieszanek betonowych. Właściwości fizykochemiczne kruszyw z betonu zależą od pierwotnej klasy betonu, stopnia hydratacji cementu oraz zanieczyszczeń, w tym starej matrycy cementowej otaczającej kruszywo. Kruszywo wtórne uzyskane z rozkruszenia betonu o średniej wytrzymałości na

ściskanie może stanowić pełnowartościowy składnik nowego betonu cementowego.

Zmienność parametrów kruszyw odzyskanych z rozbiórki i wyburzeń w porównaniu do kruszyw naturalnych jest znaczna i zależy m.in. od staranności selekcji oraz sortowania materiału, co wpływa na jakość recyklatu. Niekorzystnymi cechami kruszyw recyklingowych są wysoka porowatość i nasiąkliwość, spowodowane głównie obecnością zaczynu lub zaprawy przylegającej do ziaren kruszywa. Należy jednak zauważyć, że niższa gęstość recyklatu, wynikająca z porowatości, może być korzystnie rozpatrywana pod względem ekonomicznym, ponieważ takie kruszywo jako składnik mieszanki betonu towarowego zajmuje większą objętość.

Analizy ekonomiczne przeprowadzane w wielu krajach wskazują, że warunkiem koniecznym dla zapewnienia rentowności zakładu przerobczego są stałe dostawy gruzu, wysokie ceny kruszyw naturalnych oraz wysokie koszty składowania odpadów budowlanych. Pozytywnym aspektem stosowania kruszyw wtórnych, zarówno z perspektywy ekonomicznej, jak i ekologicznej, jest zazwyczaj niższy koszt transportu materiału w porównaniu do sprowadzania kruszyw naturalnych do dużych aglomeracji miejskich, co wynika z mniejszych odległości między producentem a odbiorcą.

4. Podsumowanie.

Różnorodność norm i zaleceń dotyczących kruszyw z recyklingu w różnych krajach odzwierciedla specyficzne potrzeby i uwarunkowania lokalne. W krajach takich jak Niemcy czy Włochy, regulacje są stosunkowo restrykcyjne, co sprzyja wysokiej jakości i bezpiecznemu wykorzystaniu tych materiałów, szczególnie w konstrukcjach budowlanych o dużych wymaganiach wytrzymałościowych. Z kolei w krajach rozwijających się, takich jak Indie czy Brazylia, bardziej elastyczne przepisy umożliwiają szersze wykorzystanie kruszyw z recyklingu, lecz stwarzają wyzwania w zakresie utrzymania jakości materiałów.

W Europie normy, takie jak EN oraz krajowe regulacje wprowadzają szczegółowe wymagania dotyczące jakości, klasyfikacji i testowania kruszyw z recyklingu. Dzięki temu materiały te mogą być stosowane w budownictwie bez ryzyka obniżenia trwałości i bezpieczeństwa konstrukcji. Przykład Niemiec pokazuje, jak promowanie recyklingu w połączeniu z zachętami finansowymi sprzyja zrównoważonemu rozwojowi sektora budowlanego.

W krajach takich jak Japonia czy Stany Zjednoczone kluczową rolę odgrywają programy

certyfikacji oraz wsparcie dla innowacji technologicznych. Pozwalają one rozwijać zaawansowane metody przetwarzania odpadów budowlanych, co zwiększa jakość i bezpieczeństwo stosowania kruszyw z recyklingu.

Ważnym aspektem skutecznego wdrażania kruszyw z recyklingu jest współpraca sektora publicznego i prywatnego. Działania rządu, instytucji naukowych oraz firm budowlanych prowadzą do opracowania regulacji i technologii zapewniających bezpieczne i efektywne wykorzystanie tych materiałów. Jednocześnie edukacja i zwiększanie świadomości społecznej na temat korzyści recyklingu w budownictwie odgrywają istotną rolę w dążeniu do zrównoważonego rozwoju. W szczególności w krajach rozwijających się, gdzie zapotrzebowanie na materiały budowlane jest ogromne, połączenie elastycznych regulacji z dbałością o jakość kruszyw pozwoli uniknąć problemów związanych z trwałością i bezpieczeństwem konstrukcji.

Wnioski z analizy różnych podejść do recyklingu kruszyw wskazują, że jest to kluczowy element zrównoważonego rozwoju sektora budowlanego. Recykling pozwala zmniejszyć presję na zasoby naturalne i ograniczyć negatywny wpływ na środowisko. Wdrażanie odpowiednich regulacji, rozwój technologii przetwarzania odpadów budowlanych, edukacja społeczna oraz współpraca międzynarodowa są fundamentami dalszego rozwoju tego sektora.

Podsumowując, recykling kruszyw z odpadów budowlanych odpowiada na wyzwania związane z ograniczonymi zasobami naturalnymi i rosnącymi potrzebami infrastrukturalnymi, jednocześnie wspierając walkę ze zmianami klimatycznymi. Zintegrowanie regulacji, innowacji technologicznych, edukacji i współpracy międzynarodowej umożliwi stworzenie bardziej ekologicznej i trwałej przyszłości.

Literatura

- [1]. Al-Shamaa, M. F. K., Ali, A. A., & Ahmed Al-Mulla, I. F. (2024). Mechanical characteristics of structural concrete using building rubbles as recycled coarse aggregate. *Journal of the Mechanical Behavior of Materials*, 33(1), 20240001.
- [2]. Babiak, M., Błaszczyński, T., Ratajczak, A., & Węgliński, S. (2017). Przydatność kruszyw z recyklingu do produkcji betonu. *Przegląd Budowlany*, 88(10), 60-63.
- [3]. Babiak, M., Nowak, A. and Kowalski, P. (2017). *Recykling materiałów budowlanych*. Warszawa: PWN.
- [4]. Badziąg, B. (2012). Wybrane aspekty stosowania kruszyw z recyklingu w betonie. W: Dni Betonu 2012 – Materiały konferencyjne, Wisła, 8–10 października 2012, Polski Cement, 3-9.
- [5]. Bunluesin, T., et al. (2019). Performance of recycled aggregate concrete: A review. *Construction and Building Materials*, 198, 299-313.
- [6]. Chen, H. J., Yen, T., & Chen, K. H. (2003). Use of building rubbles as recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 33(1), 125-132.
- [7]. Corinaldesi, V., Isolani, L. and Moriconi, G. (2017). Use of rubbles from building demolition as aggregates for structural concretes.
- [8]. de Andrade Salgado, F., & de Andrade Silva, F. (2022). Recycled aggregates from construction and demolition waste towards an application on structural concrete: A review. *Journal of Building Engineering*, 52, 104452.
- [9]. European Committee for Standardization (2017). EN 12620: Aggregates for concrete. Brussels.
- [10]. Fardis, M.N. (2011). *Innovative Materials and Techniques in Concrete Construction*. Springer, 115–130.
- [11]. González-Fontes, B., et al. (2019). Recycled aggregates in concrete: A review of the effects on the mechanical properties. *Materials*, 12(9), 1495.
- [12]. Kulekci, G., Yilmaz, A. O., & Cullu, M. (2021). Experimental investigation of usability of construction waste as aggregate. *Journal of Mining and Environment*, 12(1), 63-76.
- [13]. Kumar, P., et al. (2020). Barriers to the adoption of recycled aggregate concrete in developing countries. *Resources, Conservation and Recycling*, 155, 104673.
- [14]. Miller, S.A., et al. (2019). Sustainable practices in construction: The role of recycled materials. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(7), 04019049.
- [15]. Mistri, A., Bhattacharyya, S. K., Dhama, N., Mukherjee, A., & Barai, S. V. (2020). A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials. *Construction and Building Materials*, 233, 117894.
- [16]. Pacheco-Torgal, F., et al. (2013). Recycling of waste glass in construction materials: A review. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 73(3), 82-96.
- [17]. PN-EN 1097:2000-2002. Badanie mechanicznych i fizycznych właściwości kruszyw.
- [18]. PN-EN 12620:2002+A1:2008. Kruszywa do betonu.
- [19]. Schiller, R. (2018). The role of recycled materials in sustainable construction. *Sustainable Cities and Society*, 39, 4-15.
- [20]. Tam, V.W.Y., et al. (2020). A review on the role of public policy in promoting sustainable

construction. Journal of Cleaner Production, 242, 118459.

- [21].Zhao, X., et al. (2020). Collaboration between public and private sectors in sustainable construction practices. International Journal of Project Management, 38(4), 239-248.

Streszczenie

Recykling kruszyw budowlanych odgrywa coraz większą rolę w zrównoważonym rozwoju sektora budownictwa, odpowiadając na globalne wyzwania związane z ograniczonymi zasobami naturalnymi i rosnącymi potrzebami infrastrukturalnymi. Wykorzystanie tych materiałów wymaga uwzględnienia lokalnych uwarunkowań, regulacji oraz dostępnych technologii, co prowadzi do znaczących różnic w podejściu między poszczególnymi krajami. W krajach rozwiniętych, takich jak Niemcy, Włochy i Japonia, restrykcyjne normy oraz zaawansowane technologie zapewniają wysoką jakość i bezpieczeństwo kruszyw z recyklingu, podczas gdy w krajach rozwijających się, jak Indie czy Brazylia, elastyczne przepisy sprzyjają szerszemu wykorzystaniu tych materiałów, niosąc jednak wyzwania w zakresie kontroli jakości. Kluczowe znaczenie mają również współpraca publiczno-prywatna, edukacja społeczna oraz międzynarodowa wymiana doświadczeń, które wspierają zrównoważony rozwój. Wdrożenie skutecznych regulacji, innowacji technologicznych oraz działań edukacyjnych pozwala na ochronę zasobów naturalnych, ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko i zaspokojenie rosnących potrzeb infrastrukturalnych.

Słowa kluczowe: recykling kruszyw budowlanych, zrównoważony rozwój, normy i regulacje, jakość materiałów z recyklingu, innowacje technologiczne, współpraca publiczno-prywatna.

Abstract

Recycling of construction aggregates is playing an increasingly important role in the sustainable development of the construction sector, responding to the global challenges of limited natural resources and growing infrastructure needs. The use of these materials requires consideration of local conditions, regulations and available technologies, leading to significant differences in approach between countries. In developed countries such as Germany, Italy and Japan, stringent standards and advanced technologies ensure the high quality and safety of recycled aggregates, while in developing countries such as India and Brazil, flexible regulations encourage greater use of these materials, but bring challenges in terms of quality control. Public-private cooperation, public education and international exchange of experiences are also key to promoting sustainability. The implementation of effective regulations, technological innovations, and educational efforts help to conserve natural resources, reduce environmental impacts, and meet growing infrastructure needs.

Keywords: construction aggregate recycling, sustainability, standards and regulations, quality of recycled materials, technological innovation, public-private cooperation.

Spis Treści

dr inż. Jacek Długopolski, Prof. dr hab. inż. Maria Richert , WPLYW GEOMETRII KONSTRUKCJI RADIATORA RUROWEGO NA ODPROWADZANIE I ROZPRASZANIE	CIEPŁA 2
mgr inż. arch. Justyna M. Kobylarczyk, dr Agnieszka Nowaczek METODY PRZEROBU KRUSZYW BUDOWLANYCH Z RECYKLINGU	10
dr hab. inż. Natalia Iwaszczuk prof. AGH, mgr Jarosław Baran PRZEGLĄD TECHNOLOGII OGNIW FOTOWOLTAICZNYCH – STAN OBECNY I PERSPEKTYWY ROZWOJU.....	18
mgr inż. Agnieszka Czaplicka-Kotas SYSTEM KAUCYJNY DLA BUTELEK PET W POLSCE – PRZEGLĄD LEGISLACJI, DOBRE PRAKTYKI NA TLE DOŚWIADCZEŃ KRAJÓW EUROPEJSKICH	28
mgr inż. arch. Justyna M. Kobylarczyk, dr Agnieszka Nowaczek NORMY I ZALECENIA DOTYCZĄCE KRUSZYW Z RECYKLINGU W RÓŻNYCH KRAJACH.....	32

WYDAWCA: KRAKOWSKIE TOWARZYSTWO TECHNICZNE

30-563 Kraków, ul. Malborska 10/6

Redaguje: **KOMITET**

Redaktor Naczelny: dr **OLGA JANIKOWSKA**, IGSMiE PAN, Kraków, e-mail: olgajan@min-pan.krakow.pl

Z-ca Redaktora Naczelnego: dr hab. **JOANNA KULCZYCKA**, prof. AGH

Sekretarz: mgr inż. **NATALIA GENEROWICZ- CABA**, IGSMiE PAN, Kraków

Redaktor zeszytu nr 201:

dr hab. **JOANNA KULCZYCKA**, prof. AGH

Kolegium Redakcyjne:

dr inż. **JERZY BANAŚ**

mgr inż. **MIECZYŚLAW MAJCHER**

dr inż. **WIESŁAWA STYKA**

Redakcja Naukowa:

prof. dr hab. inż. **AGNIESZKA GENEROWICZ**

dr hab. inż. **NATALIA IWASZCZUK**, prof. AGH

dr hab. **JOANNA KULCZYCKA**, prof. AGH

prof. **GENNADIY PIVNYAK**,

prof. **ROMAN EMILIAN DYCHKOVSKYI**,

prof. **NATALIIA IVANIVNA SHTEMENKO**

prof. dr hab. inż. **RYSZARD TADEUSIEWICZ**

Redaktor techniczny - skład i łamanie tekstu: mgr **MACIEJ MAŃKA**

Redakcja nie zwraca nadesłanych materiałów.

W publikowanych artykułach redakcja zastrzega sobie prawo dokonywania skrótów.

Redakcja nie odpowiada za treść ogłoszeń.

© Copyright by Krakowskie Towarzystwo Techniczne 2025

ISSN 1425-8390

NR INDEKSU 334006

The context

Transitions towards low-carbon energy systems and net-zero economies have started to be comprehensive and demanding, requiring substantial public support, new business models and new governance practices.

The project



SITRANS aims to elaborate on the complex and challenging nature of decarbonisation in coal regions considering the social, economic and environmental factors that influence the transition process and develop a robust framework for citizens to flourish on an individual and/or collective basis.

SITRANS will support coal regions in their transition processes following the guiding principle “leaving no one behind” through a fully functionally **JUST ENERGY TRANSITION OBSERVATORY**, a place-based governance approach and tailor-made transformative policies in areas that are intensely experiencing the coal phase out.

The Demo Regions

To reach its goal, SITRANS will implement its methodologies and approaches in 4 coal regions that represent an ideal test beds to analyse a transition process to a zero-carbon economy that is highly contested.

GREECE - Western Macedonia is an area that is highly dependent on lignite and that started its transition process in 2019;

POLAND - Silesia Region is a place whose economy has been based on the coal industry for centuries;

ITALY - Sardinia, one of the Italian regions where the economy is still based on coal and fuel oil power and that is now planning to convert to methane and/or biomass;

BULGARIA - Stara Zagora, the Energy heart of Bulgaria where most of the coal mines are located with long term plans for coal phase out.



Learn more on www.sitrans-project.eu

LinkedIn: @SITRANSeu

Twitter: @sitranseu



Bruksela
Biuro Promocji Nauki PolSCA
Polskiej Akademii Nauk



Biuro Promocji Nauki PolSCA PAN

w Brukseli jest przedstawicielstwem Polskiej Akademii Nauk przy instytucjach Unii Europejskiej. PolSCA wspiera uczestnictwo polskich środowisk naukowych, w tym jednostek PAN, w europejskich programach badawczo-innowacyjnych, zwłaszcza w programie **Horyzont Europa**.

Działając w sercu europejskiego procesu legislacyjnego i strategicznego planowania polityk badawczych, Biuro PolSCA śledzi, analizuje i przekazuje informacje kluczowe dla rozwoju polskiej nauki. Moderuje również dialog między nauką a polityką, promując zaangażowanie w tworzenie polityk opartych na nauce i współpracę międzynarodową.

W 2025 roku, w ramach wsparcia **Polskiej Prezydencji w Radzie UE**, Biuro PolSCA jest/było zaangażowane szereg wydarzeń w Brukseli, np. prezentacji priorytetów Polski w zakresie badań i innowacji w UE ([IGLO Open](#) – styczeń 2025), promocji innowacyjnych systemów żywnościowych ([Advancing food systems in Europe](#) – marzec 2025) lub dyskusji na temat zielonej transformacji ([Towards a Fair Green Transition](#) – czerwiec 2025).

Biuro prowadzi również działania informacyjne i szkoleniowe, kierowane zarówno do naukowców, jak i administracji akademickiej.

W ostatnich miesiącach Biuro PolSCA zorganizowało dwie wizyty studyjne: [Science for Policy](#) (dla naukowców) oraz [Focus on MSCA](#) (dla kadry administracyjnej).

Wraz z partnerami dwa razy do roku Biuro PolSCA organizuje trzydniowe [V4 Training for Research Project Managers](#).

Uruchomiliśmy nieformalną sieć menadżerów badań w instytutach PAN, tzw. **Horizon Europe Navigators** jako platforma wiedzy, wymiany doświadczeń i podnoszenia kompetencji.

Więcej informacji o działalności Biura dostępnych jest na [stronie internetowej](#), [Facebooku](#) (PL) oraz [Linkedinie](#) (EN).

Bend the trend

Pathways to a liveable planet as
resource use spikes



International
Resource
Panel

Global Resources Outlook
2024

Global Resources Outlook 2024

Authors: UNEP, International Resource Panel (IRP)

Link: <https://www.unep.org/resources/Global-Resource-Outlook-2024>

Navigating New Horizons

A global foresight report on planetary
health and human wellbeing



**International
Science Council**
The global voice for science

A global foresight report on planetary health and human wellbeing

Authors: UNEP

Link: <https://www.unep.org/resources/global-foresight-report>