



CZASOPISMO TECHNICZNE KTT

KWARTALNIK KRAKOWSKIEGO TOWARZYSTWA TECHNICZNEGO

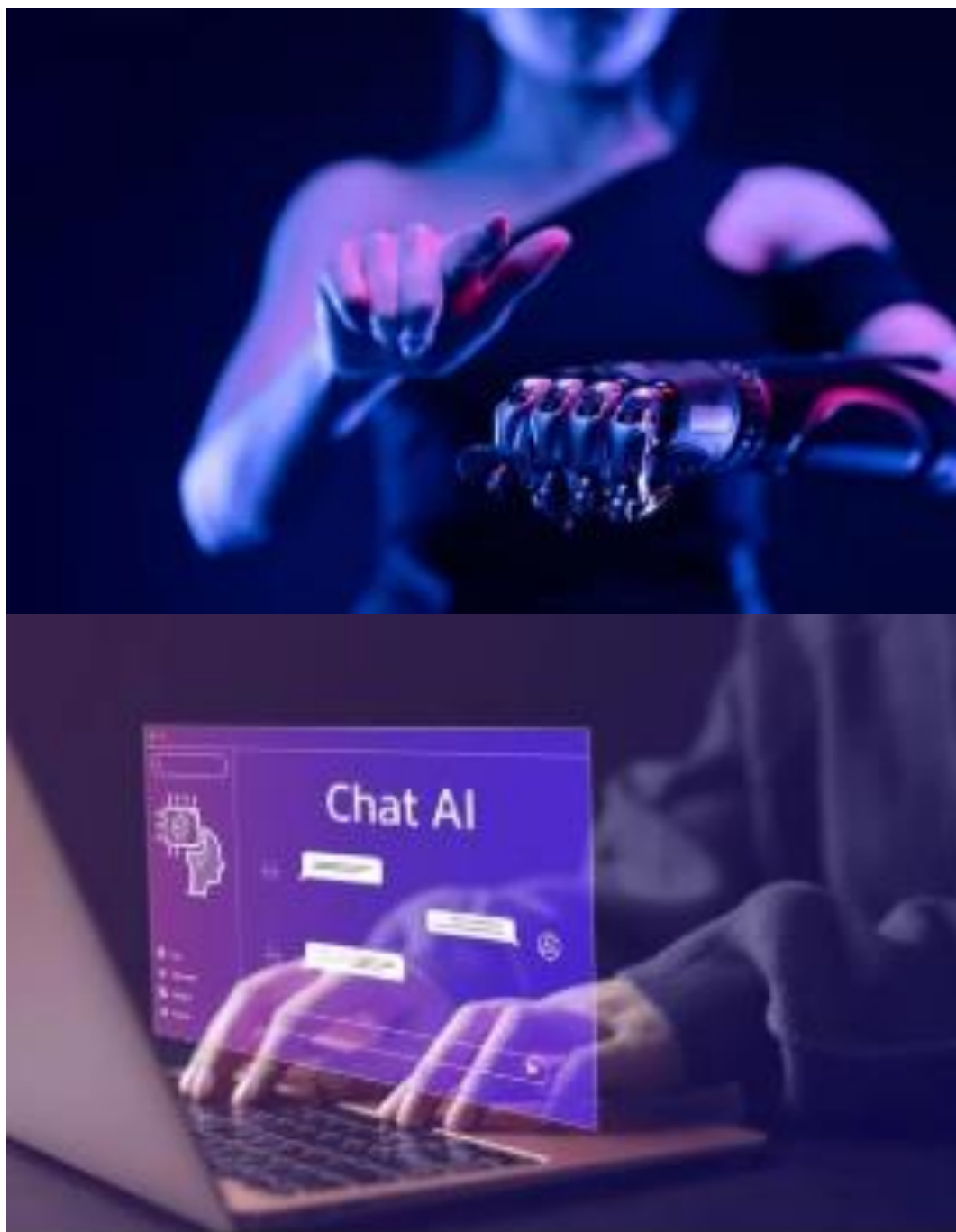
Nr 203 Rok 145

Kraków 2025 r.

Wrzesień-Listopad

Nr Indeksu 334008

ISSN: 1425-8390



RECENZOWANE ARTYKUŁY NAUKOWE

mgr inż. Jacek Witek¹⁾

1) Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, Szkoła Doktorska PK, Wydział Informatyki i Telekomunikacji

Ewolucja Sztucznej Inteligencji

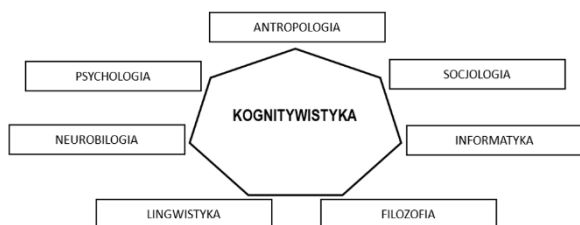
1. Wprowadzenie

W ostatnich dekadach komputery rozwijały się w tak zawrotnym tempie, że dziś są nieodłączną częścią naszego codziennego życia. Łatwo zapomnieć, jak młoda jest ta technologia — pierwsze cyfrowe komputery powstały zaledwie kilka dekad temu! W niniejszym opracowaniu podjęto próbę wyjaśnienia, czym właściwie jest sztuczna inteligencja (SI). Przedstawiono wybrane (choć nie wszystkie) kamienie milowe kształtujące rozwój koncepcji z nią związanych — od wczesnych prób kombinatorycznego myślenia i mechanicznego wspomagania tworzenia wiedzy, przez postępy w uczeniu maszynowym i sieciach neuronowych, aż po współczesne osiągnięcia w tej dziedzinie.

2. Sztuczna inteligencja

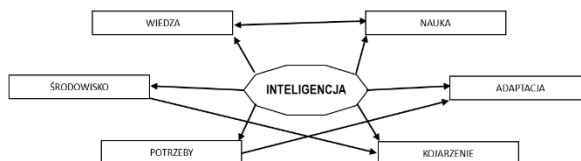
W publikacji „Sztuczna inteligencja – osiągnięcia, zagrożenia, perspektywy” autor zauważa, że definicja sztucznej inteligencji nie jest klarowna. Nie istnieje jeden właściwy sposób jej przedstawiania. Na samo pojęcie składa się przymiotnik ‘sztuczny’, oznaczający coś wytwarzanego lub produkowanego przez człowieka, a nie występującego naturalnie, oraz rzeczownik ‘inteligencja’, który wyraża zdolność do zdobywania i stosowania wiedzy oraz umiejętności [1].

Kognitywistyka, jako interdyscyplinarna dziedzina nauki, zajmuje się badaniem umysłu, procesów poznawczych oraz mechanizmów leżących u podstaw ludzkiego myślenia, percepcji, emocji i działania. Jej głównym celem jest zrozumienie, jak funkcjonuje umysł — jakie ma struktury, w jaki sposób przetwarza informacje oraz jak umożliwia człowiekowi rozumienie i interakcję ze światem zewnętrznym [2].



Rys. 1. Schemat obszarów dziedzinowych kognitywistyki. Źródło: Opracowanie własne na podstawie prezentacji Wstęp do SI [2]

Idąc dalej, inteligencja to pojęcie niezwykle złożone, które odnosi się do zdolności człowieka w zakresie przetwarzania informacji, adaptacji do nowych sytuacji, rozwiązywania problemów, a także do uczenia się i wykorzystywania zdobytej wiedzy w praktyce. Co istotne, nie jest to jedna zdolność, lecz raczej zbiór różnych umiejętności poznawczych, które działają razem, aby umożliwić jednostce efektywne funkcjonowanie w różnych kontekstach. Zatem w kontekście inteligencji obszary: wiedza, nauka, potrzeby, kojarzenie, adaptacja, środowisko odgrywają kluczową rolę w procesie przetwarzania informacji, rozwiązywania problemów oraz adaptacji do zmieniającego się świata [2].



Rys. 2. Uogólniony schemat inteligencji w ujęciu obszarowym. Źródło: Opracowanie własne na podstawie prezentacji Wstęp do SI [2]

Sztuczna inteligencja w istocie łączy elementy kognitywistyki, nauk ścisłych oraz koncepcji inteligencji, gdzie kognitywistyka stanowi inspirację w zakresie działania umysłu i procesów poznawczych, nauki ścisłe stanowią mechanizmy wykonawcze (narzędzia), natomiast koncepcja inteligencji człowieka stanowi cel SI w postaci zdolności systemów komputerowych do przetwarzania informacji, uczenia się i podejmowania decyzji [2].

W efekcie sztuczną inteligencję wyróżnia [2]:

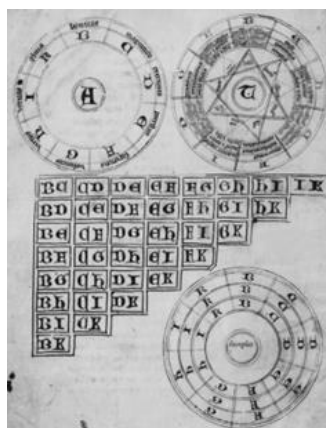
- Autonomiczna zdolność formowania wiedzy.
- Zdolność aktywnego i pasywnego uczenia się.
- Wbudowane mechanizmy motywacyjne (potrzeby).
- Automatyczne utrwalanie związków między obiektami.
- Automatyczna kontekstowa konsolidacja danych.
- Automatyczne grupowanie danych i klasteryzacja.
- Automatyczne definiowanie pojęć i klasyfikacja.
- Automatyczne uogólnianie i tworzenie abstrakcji.

W tej części pragnę podkreślić, że sztuczna inteligencja jest czymś więcej niż tylko technologią – to ambitna próba odwzorowania niektórych z najważniejszych aspektów ludzkiego umysłu i inteligencji. Póki co w rzeczywistości, większość współczesnych zaawansowanych systemów SI jest wciąż bardzo ograniczona w porównaniu do ludzkiej inteligencji. Można powiedzieć, że sztuczna inteligencja jest inteligentna jedynie w sensie funkcjonalnym – jej inteligencja sprowadza się do osiągania wyników poprzez rozwiązywanie problemów w ramach ściśle określonych ram i procedur. Ostatecznie brakuje jej wciąż świadomości, rozumienia kontekstu, intuicji.

Niemniej jednak sztuczna inteligencja łączy technologię i naukę w celu opisania procesów poznawczych, które definiują ludzką inteligencję. Pomimo imponujących postępów sztuczna inteligencja obecnie pozostaje technologią o wysokiej przydatności, która ma swoje ograniczenia w zakresie „inteligencji” w ludzkim sensie tego słowa. Największa wartość sztucznej inteligencji płynie z jej potencjału do wspierania ludzi w rozwiązywaniu złożonych problemów, automatyzacji procesów oraz podejmowaniu decyzji opartych na danych.

3. Wybrane fakty rozwoju koncepcji sztucznej inteligencji

Rok 1308: Kataloński poeta i teolog Ramon Llull publikuje *Ars generalis ultima* (Ostateczną sztukę ogólną). Dzieło opisuje autorską metodę wykorzystywania mechanicznych środków papierowych do tworzenia nowej wiedzy z kombinacji pojęć. Ramon Llull uważany jest za pierwotnego wynalazcę kombinatoryki zastosowanej w konstrukcji maszyny logicznej.



Rys. 3. Cztery figury „Ars generalis ultima 1308 r. Źródło: [3]

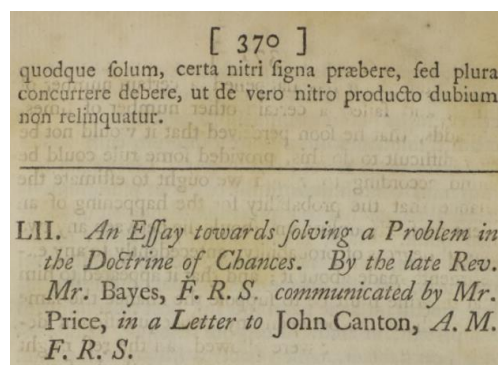
Rok 1666: Niemiecki matematyk i filozof Gottfried Leibniz publikuje *Dissertatio de arte combinatoria* (O sztuce kombinatorycznej), podążając za Ramonem Llullem w proponowaniu alfabetu ludzkiej myśli, argumentując, że wszystkie idee są niczym innym jak kombinacjami stosunkowo niewielkiej liczby prostych pojęć.



Rys. 4. Wycinek: *Dissertatio de arte combinatoria* 1690 r. Źródło: [4]

Rok 1763: Brytyjski matematyk Thomas Bayes opracowuje ramy wnioskowania o prawdopodobieństwie zdarzeń. Naukowiec specjalizuje się w teorii prawdopodobieństwa, jeden z prekursorów statystyki. Wnioskowanie bayesowskie stanie się wiodącym podejściem w uczeniu maszynowym.

Rys. 5. Wycinek: *Essay Towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances* 1763 r. Źródło:



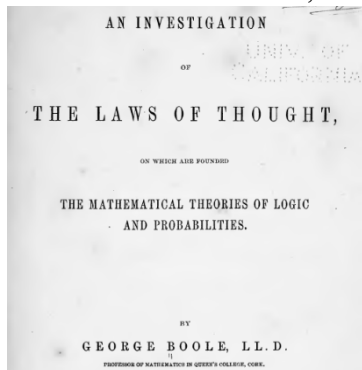
[5]

Rok 1854: Brytyjski matematyk i filozof George Boole twierdzi, że logiczne rozumowanie może być przeprowadzane systematycznie w taki sam sposób, jak rozwiązywanie układu równań. Publikacja *An Investigation of the Laws of Thought* (Dochodzenie w sprawie praw myśli) jest wariantem algebry elementarnej różniącej się wartościami, operacjami i prawami. Zamiast zwykłej algebry liczb, algebra Boole'a jest algebrą

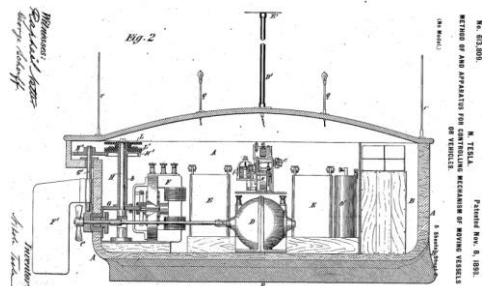
wartości prawdy 0 i 1, lub równoważnie podzbiorów danego zbioru.

Rys. 6. Wycinek: An Investigation of the Laws of Thought 1854 r. Źródło: [6]

Rok 1898: Chorwacki elektrotechnik, radiotechnik



i wynalazca Nicola Tesla ma wystawie elektrycznej w Madison Square Garden (Nowy York) demonstruje pierwszy na świecie statek sterowany radiowo „Teleautomat”. Łódź była wyposażona w, jak to określił Tesla, „pożyczony umysł”.



Rys. 7. Wycinek: Patent Teleautomatu Nikola Tesli. Źródło: [7]



Rys. 8. Wycinek: Torres and His Remarkable Automatic Devices 1914 r. Źródło: [8]

Rok 1914: Hiszpański inżynier Torres y Quevedo demonstruje pierwszą maszynę do gry w szachy –

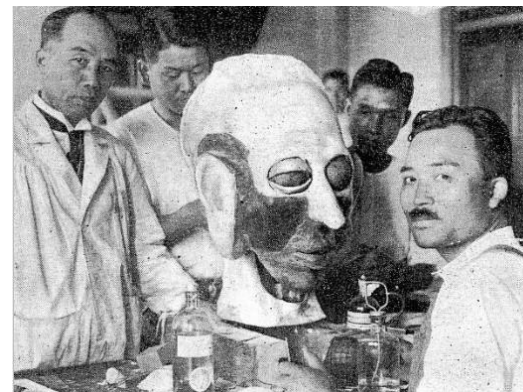
El Ajedrecista, zdolną do gry królem i wieżą przeciwko królowi bez interwencji człowieka. Automat został po raz pierwszy zaprezentowany publicznie na Targach Światowych w Paryżu w 1914 r.

Rok 1921: Amerykańscy inżynierowie Radio Air Service zaprezentowali publicznie w bazie testowej sił powietrznych McCook w Dayton w stanie Ohio 5 sierpnia 1921 r. pierwszy pojazd zdalnie sterowany.



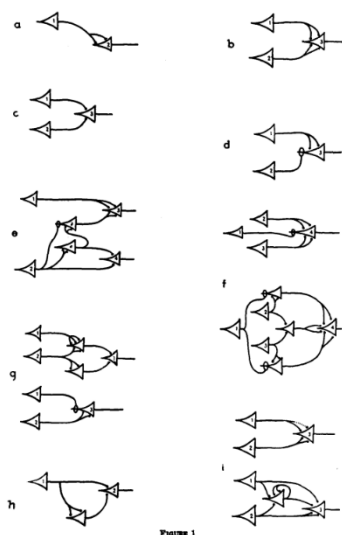
Rys. 9. Wycinek: Pierwszy pojazd zdalnie sterowany 1921 r. Źródło: [9]

Rok 1929: Japoński biolog i wynalazca Makoto Nishimura projektuje Gakutensoku - „uczącego się z praw natury”, pierwszego robota zbudowanego w Japonii. Mógł on zmieniać wyraz twarzy oraz poruszać głową i rękami za pomocą mechanizmu ciśnienia powietrza.



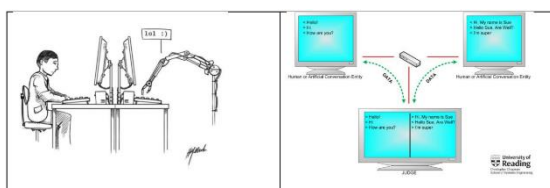
Rys. 10. Wycinek: Makoto Nishimura (po lewej) i jego zespół zaprojektowali głowę Gakutensoku, 1929 r. Źródło: [10]

Rok 1943: Amerykański neuropsycholog i cybernetyk Warren S. McCulloch i amerykański logik Walter Pitts publikują *A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity* (Logiczny rachunek idei zawartych w aktywności nerwowej) w *Bulletin of Mathematical Biophysics*. Wpływowy artykuł, który omawia sieci wyidealizowanych i uproszczonych sztucznych „neuronów” wraz sposobem wykonywania prostych funkcji logicznych. Artykuł stanowi inspirację dla komputerowych sieci neuronowych, a później głębokiego uczenia się.



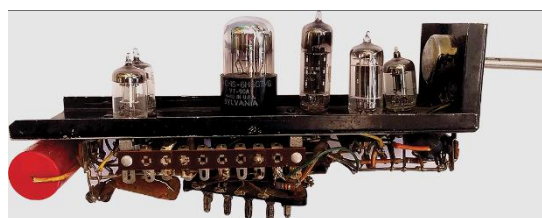
Rys. 11. Wycinek: Interpretacja graficzna i analityczna dla grafów McCulloch W, Pitts W, 1943 r. Źródło: [11]

Rok 1950: Brytyjski matematyk, informatyk i wojskowy Alan Turing publikuje *Computing Machinery and Intelligence* (Maszyny obliczeniowe i inteligencja), w której proponuje grę imitacyjną, znaną później jako „Test Turinga”.



Rys. 12. Wycinek: Dwa testy Turinga dla jego gry imitacyjnej: Po lewej - jeden do jednego; Po prawej - jeden sędzia-dwóch ukrytych rozmówców 1950 r. Źródło: [12]

Rok 1951: Amerykański naukowiec Marvin Minsky i elektronik wolontariusz Dean Edmunds budują SNARC - Stochastic Neural Analog Reinforcement Calculator - pierwszą sztuczną sieć neuronową, wykorzystując 3000 lamp próżniowych do symulacji sieci 40 neuronów. Neurokomputer symulował szczura znajdującego drogę przez labirynt.



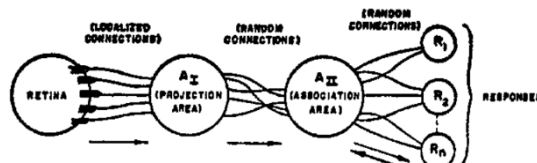
Rys. 13. Wycinek: Pojedynczy sztuczny neuron SNARC, 1951 r. Źródło: [13]

Rok 1956: Warsztaty, które odbyły w lipcu i sierpniu 1956 roku, są powszechnie uważane za oficjalną datę narodzin nowej dziedziny – sztucznej inteligencji. Termin „sztuczna inteligencja” został ukuty w propozycji „2-miesięcznego, 10-osobowego badania sztucznej inteligencji” złożonej przez Johna McCarthy'ego (Dartmouth College), Marviną Minsky'ego (Harvard University), Nathaniela Rochesterą (IBM) i Claude'a Shannona (Bell Telephone Laboratories) – publikacja 1955.



1.1 Rys. 14. Wycinek: Letni projekt badawczy Dartmouth na temat sztucznej inteligencji, 1956 r. Źródło: [14]

Rok 1957: Amerykański psycholog Frank Rosenblatt opracowuje Perceptron, wczesną sztuczną sieć neuronową umożliwiającą rozpoznawanie wzorców w oparciu o dwuwarstwową komputerową sieć uczącą się. *New York Times* donosi, że Perceptron jest „zarodkiem elektronicznego komputera, który oczekuje, że będzie w stanie chodzić, mówić, widzieć, pisać, reprodukować się i być świadomym swojego istnienia”.



Rys. 15. Wycinek: struktura perceptronu Rosenblatt'a, 1957 r. Źródło: [15]

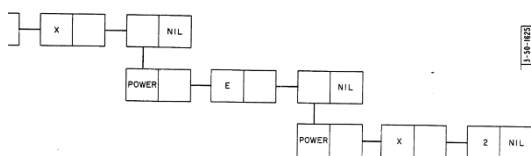
Rok 1958: Amerykański informatyk i kognitywista John McCarthy opracowuje język programowania Lisp, który staje się najpopularniejszym językiem programowania używanym w badaniach nad sztuczną inteligencją.

Here is EVAL.

```
(LABEL EVAL (LAMBDA (E A)
  (COND ((ATOM E)
    (COND ((EQ E NIL) NIL)
          ((EQ E T) T)
          (T (CDR (LABEL ASSOC
            (LAMBDA (E A)
              (COND ((NULL A) NIL)
                    ((EQ E (CAR A)) (CAR A))
                    (T (ASSOC E (CDR A)))))))
    (CDR (ASSOC E (CDR A)))))))
```

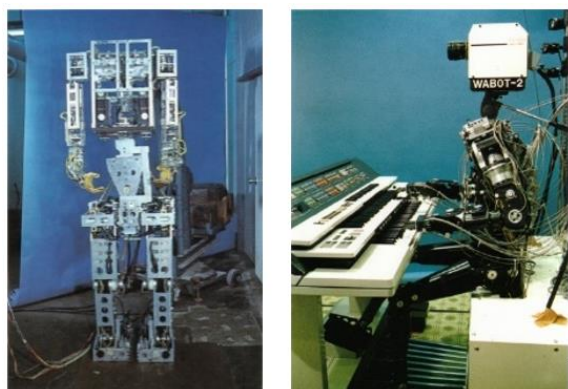
Rys. 16. Wycinek: Fragment przykładowego kodu Lisp, 1958 r. Źródło: [16]

Rok 1961: Amerykański informatyk James Slagle opracowuje SAINT (Symbolic Automatic INTEgrator), program heurystyczny rozwiązujący problemy z całkowaniem symbolicznym w rachunku różniczkowym. Maszyna została opracowana jako część pracy doktorskiej Slagle'a na MIT, z pomocą Marvin'a Minsky'ego. SAINT jest uważany za pierwszy system ekspercki.



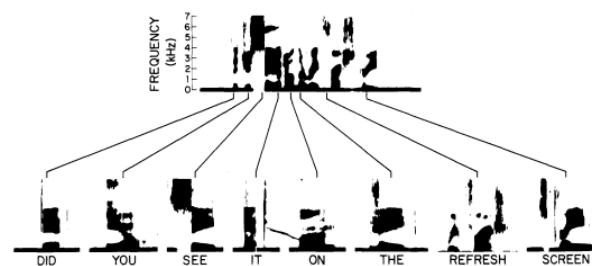
Rys. 17. Wycinek: reprezentacja komputerowa wyrażenia, 1961 r. Źródło: [17]

Rok 1970: Pierwszy robot antropomorficzny - WABOT-1, zostaje zbudowany na Uniwersytecie Waseda w Japonii. Składał się on z systemu kontroli kończyn, systemu wizyjnego i systemu konwersacyjnego. W 1980 roku laboratorium ponownie dołączyło do wspólnego projektu w efekcie czego powstał WABOT-2, robot potrafił grać na instrumencie klawiszowym.



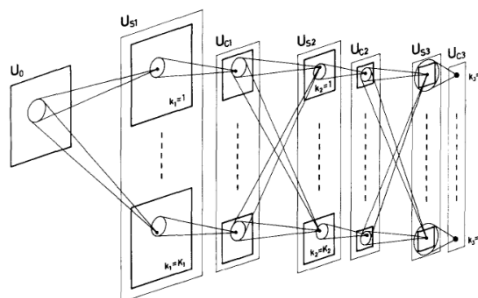
Rys. 18. Wycinek: projekt w Humanoid Robotics Institute, Waseda University. Po lewej - WABOT-1 (1970~1973). Po prawej - WABOT-2 (1980~1984). Źródło: [18]

Rok 1976: Indyjsko-amerykański informatyk D. R. Reddy publikuje Speech Recognition by Machine: A Review". Publikacja podsumowuje wcześnie prace nad przetwarzaniem języka naturalnego (NLP).



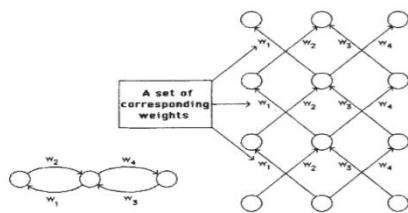
Rys. 19. Wycinek: spektrogram słów „did you see it on the refresh screen?”, 1976 r. Źródło: [19]

Rok 1980: Japoński informatyk Kunihiko Fukushima publikuje Neocognitron: A Self-organizing Neural Network Model for a Mechanism of Pattern Recognition Unaffected by Shift in Position („Neocognitron”: Samoorganizujący się model sieci neuronowej dla mechanizmu rozpoznawania wzorców bez wpływu zmiany pozycji). „Neocognitron” to model sieci neuronowej przeznaczony do rozpoznawania wzorców wizualnych niezależnie od ich położenia. Model czy się w sposób nienadzorowany, organizując się w celu rozpoznawania kształtów.



Rys. 20. Wycinek: Schemat ilustrujący połączenia między warstwami sieci „Neocognitron”, 1976 r. Źródło: [20]

Rok 1986: Amerykański psycholog i kognitywista David Rumelhart, kanadyjsko-brytyjski informatyk, psycholog poznawczy Geoffrey Hinton i amerykański informatyk Ronald Williams publikują Learning representations by back-propagating errors (Uczenie się reprezentacji poprzez wsteczną propagację błędów) w którym opisują nową procedurę uczenia się, wsteczną propagację, dla sieci jednostek podobnych do neuronów.



Rys. 21. Wycinek: Symchroniczna sieć interaktywna uruchamiana dla trzech interakcji z równoważną siecią warstwową, 1986 r. Źródło: [21]

Rok 1990: Australijski matematyk i informatyk Rodney Brooks publikuje książkę *Elephants Don't Play Chess* (Słonie nie grają w szachy), w której proponuje nowe podejście do sztucznej inteligencji - budowanie inteligentnych systemów, w szczególności robotów, od podstaw i na podstawie ciągłej fizycznej interakcji ze środowiskiem: „Świat jest swoim najlepszym modelem... Sztuką jest wyczuć go odpowiednio i wystarczająco często” [22].



Rys. 22. Wycinek: Roboty mobilne MIT, 1990 r. Źródło: [22]

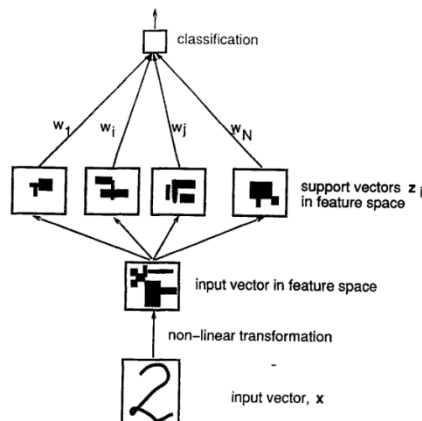
Rok 1995: Amerykański autor Richard Wallace opracowuje chatbota A.L.I.C.E. (Artificial Linguistic Internet Computer Entity), zainspirowanego programem ELIZA Josepha Weizenbauma, ale z dodatkiem gromadzenia danych w języku naturalnym na bezprecedensową skalę, możliwą dzięki pojawieniu się sieci.

ASK
ALICE

ARTIFICIAL INTELLIGENCE MACHINE LEARNING AI IN EDUCATION ABOUT · a

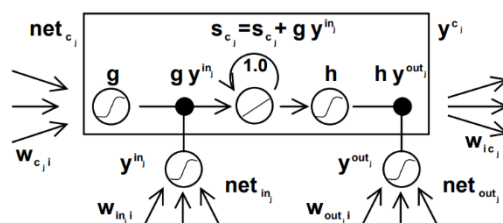
Rys. 23. Wycinek: Czat bot: A.L.I.C.E., 1995 r. Źródło: [23]

Rok 1995: Uzbekistański naukowiec Vladimir Vapnik wraz z Zespołem AT&T Bell Labs publikują artykuł SVM - Support-Vector Networks, w którym opisują „sieć wektorów wspierających”. SVM jest nową maszyną uczącą dla problemów klasyfikacji dwugrupowej.



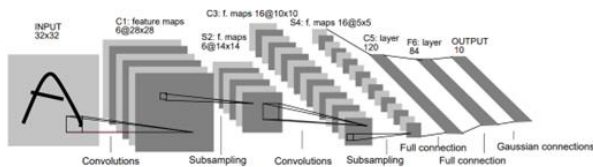
Rys. 24. Wycinek: Model SVM, 1995 r. Źródło: [24]

Rok 1997: Niemieccy informatycy Sepp Hochreiter i Jürgen Schmidhuber publikują artykuł LSTM - Long short-term memory (Długa pamięć krótkotrwała) w którym zaproponowano nową architekturę sieci neuronowych. Celem LSTM jest pokonanie problemów związanych z „zanikaniem gradientu” przy uczeniu przez propagację wsteczną w sieciach rekurencyjnych, szczególnie dla długich odstępów czasowych między zależnościami.



Rys. 25. Wycinek: Architektura komórki pamięci l c j (pudełko) i jej bramek in j ; out j, 1997 r. Źródło: [25]

Rok 1998: Francusko-amerykański informatyk Yann LeCun (i inni) publikują artykuł Gradient Based Learning Applied to Document Recognition (Uczenie oparte na gradientach zastosowane do rozpoznawania dokumentów) opisuje podstawy i architekturę Konwolucyjnych Sieci Neuronowych (CNNs - Convolutional Neural Networks) w zakresie zastosowania ich w rozpoznawaniu wzorców, zwłaszcza w kontekście klasyfikacji dokumentów.



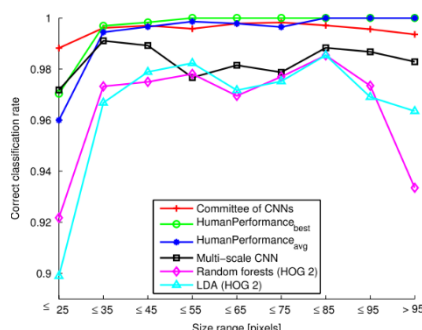
Rys. 26. Wycinek: Architektura LeNet-5 jako konwolucyjna sieć neuronowa (CNN) do rozpoznawania cyfr. , 1998 r. Źródło: [26]

Rok 2009: Naukowcy Uniwersytetu Stanforda Rajat Raina, Anand Madhavan i Andrew Ng publikują Large-scale Deep Unsupervised Learning using Graphics Processors (Głębokie uczenie bez nadzoru na dużą skalę z wykorzystaniem procesorów graficznych). Publikacja argumentuje, że nowoczesne procesory graficzne znacznie przewyższają możliwości obliczeniowe procesorów wielordzeniowych i mogą zrewolucjonizować zastosowanie metod głębokiego uczenia bez nadzoru.

Package	Architecture	576x1024	1024x4096	2304x16000	4096x11008
Goto BLAS	Single CPU	563s	3638s	172803s	223741s
Goto BLAS	Dual-core CPU	497s	2987s	93586s	125381s
GPU		38.6s	184s	1376s	1726s
GPU Speedup		12.9x	16.2x	68.0x	72.6x

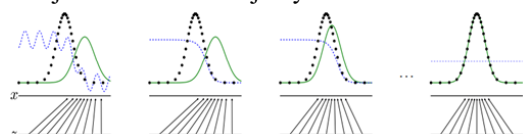
Rys. 27. Wycinek: porównanie średniego czasu działania w sekundach przy przetwarzaniu 1 miliona przykładów wejściowych, 2009 r. Źródło: [27]

Rok 2011: Konwolucyjna sieć neuronowa wygrywa niemiecki konkurs rozpoznawania znaków drogowych z dokładnością 99,46% (w porównaniu z ludźmi na poziomie 99,22%).



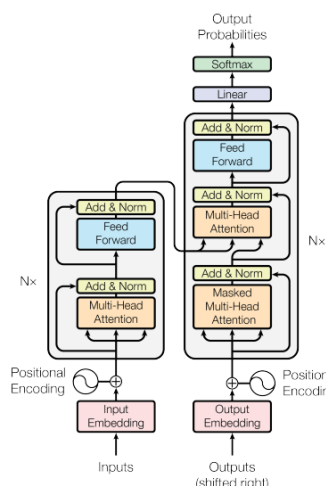
Rys. 28. Wycinek: wyniki wydajności rozpoznawania w zależności od rozmiaru obrazu, 2011 r. Źródło: [28]

Rok 2014: Amerykański naukowiec Ian Goodfellow wraz z Zespołem publikuje GAN - Generative Adversarial Nets (Generatywne sieci kontrykcyjne). Publikacja opisuje nowe ramy do szacowania modeli generatywnych za pomocą procesu kontrykcyjnego, w którym jednocześnie trenujemy dwa modele.



Rys. 29. Wycinek: odpowiedź generatywnej sieci kontrykcyjnej, 2014 r. Źródło: [29]

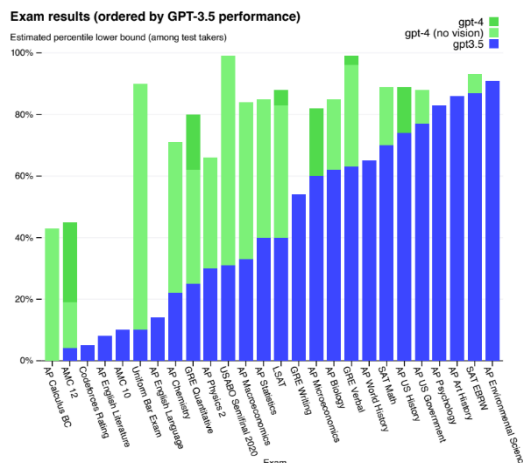
Rok 2017: Naukowcy Google.com publikują Attention Is All You Need (Uwaga jest wszystkim, czego potrzebujesz). Publikacja opisuje i wprowadza architekturę Transformer'a, która w pełni opiera się na mechanizmach uwagi (attention), eliminując potrzeby użycia rekurencyjnych lub konwolucyjnych sieci neuronowych. Dzięki temu model skraca czas treningu i poprawia wydajność. Transformatory osiągają rekordowe wyniki jakościowe w tłumaczeniach z angielskiego na niemiecki i francuski, a kluczowymi elementami są mechanizmy multi-head attention i kodowanie pozycyjne.



Rys. 30. Wycinek: transformator - modelowa architektura, 2017 r. Źródło: [30]

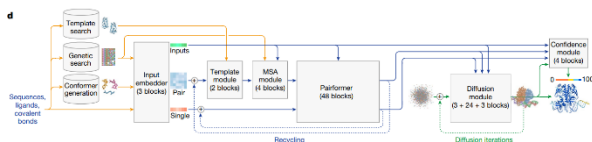
Lata 2018 - 2023: Firma OpenAI założona w 2015 roku początkowo jako organizacja non-profit, skupiła się na opracowywaniu zaawansowanych modeli językowych i promowaniu bezpiecznego rozwoju sztucznej inteligencji. Wprowadzenie modeli GPT - Generative Pre-trained Transformer (Wstępnie wytrenowany transformator generatywny), w tym ChatGPT, przyczyniło się do wypromowania firmy jako lidera w tworzeniu modeli przetwarzania języka naturalnego (NLP).

- GPT (2018): Pierwszy model z serii, bazujący na transformatorach, przeszkolony na dużym zbiorze tekstów z internetu.
- GPT-2 (2019): Większy model, zdolny do bardziej płynnych i dłuższych wypowiedzi.
- GPT-3 (2020): Ogromny model z 175 miliardami parametrów, umożliwiający szeroki zakres aplikacji, w tym tłumaczenie, generowanie tekstu i odpowiadanie na pytania.
- GPT-4 (2023): Zoptymalizowana wersja z większą dokładnością, kontekstowością i zdolnością do zarządzania złożonymi zadaniami.



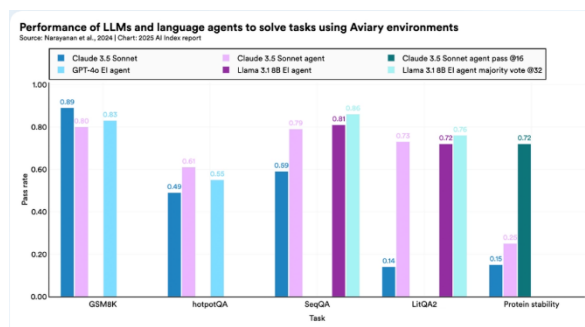
Rys. 31. Wycinek: wyniki modelu GPT na egzaminach akademickich i zawodowych, lata 2018-2023. Źródło: [31]

Rok 2023: Międzynarodowy zespół naukowców z DeepMind i Isomorphic Labs publikuje Accurate structure prediction of biomolecular interactions with AlphaFold 3. Publikacja opisuje i wprowadza nową wersję modelu AlphaFold, który dzięki architekturze dyfuzyjnej (diffusion-based) potrafi przewidywać nie tylko struktury białek, ale także ich interakcje z DNA, RNA, ligandami, jonami i przeciwcałami. Model znacząco przewyższa dotychczasowe narzędzia specjalistyczne w dokładności prognozowania kompleksów biomolekularnych.



Rys. 32. Wycinek: architektura AlphaFold 3, 2023 r..
Źródło: [32]

Rok 2024: Międzynarodowe zespoły badawcze opracowują Aviary, system trenujący agentów językowych (LLM) do realizacji złożonych zadań biologicznych, oraz FireSat, technologię znacząco poprawiającą prognozowanie pożarów lasów. Oba rozwiązania pokazują, jak sztuczna inteligencja coraz mocniej wspiera odkrycia naukowe i praktyczne zastosowania w medycynie oraz ochronie środowiska. Osiągnięcia te zostały wyróżnione w raporcie AI Index 2025, przygotowanym przez Stanford HAI.



Rys. 33. Wycinek: Wydajność modeli językowych (LLM) i agentów językowych w rozwiązywaniu zadań z wykorzystaniem środowisk Aviary, 2024 r.. Źródło: [33]

4. Podsumowanie

Droga rozwoju sztucznej inteligencji — od badań nad możliwością zmechanizowanego myślenia po współczesne zaawansowane modele neuronowe i techniki uczenia maszynowego — to historia sięgająca wielu wieków. Wczesne koncepcje, poczynając od Ramona Llulla (1308), który jako pierwszy sformułował idee kombinatorycznego przetwarzania pojęć, poprzez Gottfrieda Leibniza (1666) i jego teorię „alfabetu myśli”, ukazują długoletnie dążenia do stworzenia zautomatyzowanego systemu logicznego.

Kolejny istotny krok stanowiły przełomowe prace George'a Boole'a nad algebrą logiczną oraz eksperymenty Nikoli Tesli z maszynami sterowanymi radiowo (1898), które stworzyły podstawy logiczne i technologiczne pod przyszłą koncepcję sztucznej inteligencji (SI). Pierwsze mechaniczne formy „rozumowania” ujawniły się wraz z konstrukcją maszyn do gier, takich jak El Ajedrecista autorstwa Torresa y Quevedo (1914), zdolnych do autonomicznego rozgrywania partii szachów.

Kamieniem milowym okazały się jednak badania Warrena McCullocha i Waltera Pittsa (1943), którzy zaproponowali pierwszy model sieci neuronowej – logicznej struktury inspirowanej funkcjonowaniem mózgu. Formalne narodziny SI jako dziedziny naukowej przypisuje się konferencji w Dartmouth w 1956 roku, podczas której po raz pierwszy użyto i zdefiniowano pojęcie „sztucznej inteligencji”. W latach 50. i 60. XX wieku, dzięki takim osiągnięciom jak perceptron Rosenblatta i stworzenie języka LISP, SI zaczęła zyskiwać na znaczeniu. Jednak dopiero rozwój sieci neuronowych w latach 80. i 90. — m.in. dzięki wprowadzeniu algorytmu wstecznej propagacji błędów i potwierdzeniu teorii uniwersalnej aproksymacji — umożliwił modelowanie coraz bardziej złożonych systemów.

Ostatnie dwie dekady to gwałtowny skok rozwoju: pojawienie się głębokiego uczenia (deep learning) oraz przełom w przetwarzaniu języka naturalnego (NLP), czego symbolem są modele oparte na architekturze Transformer i rozwój serii GPT (2018–

2025). Technologie te zrewolucjonizowały zastosowania SI — od analizy języka i obrazu po działanie w autonomicznych systemach interakcyjnych i rzeczywistości rozszerzonej.

Literatura

1. Kalisz M.: Sztuczna inteligencja – osiągnięcia, zagrożenia, perspektywy. Transformacje. Educational Foundations– TRANSFORMATIONS, 2020.
<https://research.ebsco.com/c/nenwjj/search/details/vvnjh3u65j?isDashboardExpanded=true&limiters=FT1%3AY&q=SZTUCZNA+INTELIGENCJA+-+OSI%C4%84GNI%C4%98CIA%2C+ZAGRO%C5%BBENIA%2C+PERSPEKTYWY>, dostęp 10.09.2025 r.
2. Horzyk A.: Wstęp do SI. Serwis Akademicki. Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Inżynierii Biomedycznej, Katedra Biocybernetyki i Inżynierii Biomedycznej, Kraków.
<https://home.agh.edu.pl/~horzyk/lectures/ahdydsi.php>, dostęp 10.09.2025 r.
3. Llull R.: The Four Figures of the Ars generalis ultima, Ramon Llull in 1308, Appendix III, Arras, Bibliothe`que Municipale, Ms. 78, fol. 1v.
<https://www.ub.edu/llulldb/docs/K%C3%B6ln.pdf>, dostęp 10.09.2025 r.
4. Leibniz G. W.: Dissertatio de arte combinatoria. Apud Johannem Simonem Fickium et Johannem Polycarpum Seuboldum. Lipsk 1666.
<https://archive.org/details/ita-bnc-mag-00000844-001/page/n78/mode/thumb>, dostęp 10.09.2025 r.
5. Bayes T., Price R.: An Essay towards Solving a Problem in the Doctrine of Chances. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Royal Society of London, Londyn 1763.
<https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstl.1763.0053>, dostęp 10.09.2025 r.
6. Boole G. W.: An Investigation of the Laws of Thought on Which Are Founded the Mathematical Theories of Logic and Probabilities. Walton & Maberly. Londyn 1854.
<https://www.ccapitalia.net/descarga/docs/1847-boole-laws-of-thought.pdf>, dostęp 10.09.2025 r.
7. Tesla N.: Method of and Apparatus for Controlling Mechanism of Moving Vessels or Vehicles. U.S. Patent No. 613,809, United States Patent Office, Waszyngton (Washington) 1898.
<https://patentimages.storage.googleapis.com/6b/b5/5d/3dc49d9a2758de/US613809.pdf>, dostęp 10.09.2025 r.
8. Waddell J.: Weights of Elements. Scientific American Supplement, Nature America, Inc., Nowy Jork 1915 (Supplement 80, No. 2079, 6 listopada 1915)
https://ia902302.us.archive.org/20/items/sim_scientific-american-supplement_1915-11-06_80_2079/sim_scientific-american-supplement_1915-11-06_80_2079.pdf, dostęp 10.09.2025 r.
9. Maurer M., Gerdes J. C., Lenz B., Winner H. (red.): Autonomous Driving. Technical, Legal and Social Aspects. Springer, Berlin – Heidelberg 2016.
<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-662-48847-8.pdf>, dostęp 10.09.2025 r.
10. Zdjęcie: <https://spectrum.ieee.org/the-short-strange-life-of-the-first-friendly-robot>, dostęp 10.09.2025 r.
11. McCulloch W., Pitts W.: A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity. Bulletin of Mathematical Biophysics. Vordenker, Winter Edition, Nowy Jork 2008 (oryg. 1943).
<https://www.cse.chalmers.se/~coquand/AUTOMATA/mcp.pdf>, dostęp 10.09.2025 r.
12. Shah H., Warwick K.: Machine Humour: Examples from Turing Test Experiments. Coventry University Repository, Coventry 2017.
<https://pure.coventry.ac.uk/ws/files/7730835/ws.pdf>, dostęp 10.09.2025 r.
13. Zdjęcie: <https://feed.jeronimomartins.com/society/culture/following-ai-breadcrumbs/>, dostęp 10.09.2025 r.
14. Zdjęcie: FUTUROLOGY CHRONICLE No 24 - A.I 2.0 - REALITY CHECK
https://issuu.com/frank.blue/docs/futurology_chronicle_no_24-ai_2.0-_reality_check/12, dostęp 10.09.2025 r.
15. Rosenblatt F.: The Perceptron: A Probabilistic Model for Information Storage and Organization in the Brain. Cornell Aeronautical Laboratory, Psychological Review, Vol. 65, No. 6, Waszyngton 1958.
<https://www.ling.upenn.edu/courses/cogs501/Rosenblatt1958.pdf>, dostęp 10.09.2025 r.
16. McCarthy J.: A Micro-manual for LISP – Not the Whole Truth. Artificial Intelligence Laboratory, Stanford University, Stanford 1960.
<https://www.ee.torontomu.ca/~elf/pub/misc/micromanualLISP.pdf>, dostęp 10.09.2025 r.
17. Slagle J.: A Heuristic Program That Solves Symbolic Integration Problems in Freshman Calculus (SAINT). Massachusetts Institute of Technology, Cambridge 1961.
<https://dspace.mit.edu/bitstream/handle/1721.1/11997/31225400-MIT.pdf>, dostęp 10.09.2025 r.
18. Kato I.: Humanoid Robotics Institute. Waseda University, Tokio 1970.
http://www.humanoid.waseda.ac.jp/booklet/kato_2.html, dostęp 10.09.2025 r.
19. Reddy D. R.: Speech Recognition by Machine: A Review. Proceedings of the IEEE, vol. 64, no. 4, pp. 502–512, Waszyngton 1976.
<https://rr.cs.cmu.edu/sr.pdf>, dostęp 10.09.2025 r.
20. Fukushima K.: Neocognitron: A Self-organizing Neural Network Model for a Mechanism of Pattern Recognition Unaffected by Shift in Position. Biological Cybernetics 36, 193 202 (1980), Springer, Berlin 1980.
<https://www.rctn.org/bruno/public/papers/Fukushima1980.pdf>, dostęp 10.09.2025 r.
21. Rumelhart D. E., Hinton G. E., Williams R. J.: 10.09.2025 r.

- Learning Representations by Back-propagating Errors. *Nature*, vol. 323, Nature Publishing Group, Londyn 1986.
<https://gwern.net/doc/ai/nn/1986-rumelhart-2.pdf>,
dostęp 10.09.205 r.
22. Brooks R.: *Elephants Don't Play Chess*. MIT Artificial Intelligence Laboratory, Cambridge 1990.
<https://people.csail.mit.edu/brooks/papers/elephants.pdf>,
dostęp 10.09.205 r.
23. Zdjęcie: <https://alicebot.org/>,
dostęp 10.09.2025 r.
24. Cortes C., Vapnik V.: *Support-Vector Networks*. Kluwer Academic Publishers, Machine Learning, vol. 20, Boston 1995.
<https://link.springer.com/article/10.1007/BF00994018>,
dostęp 10.09.2025 r.
25. Hochreiter S., Schmidhuber J.: Long Short-Term Memory. *Neural Computation*, vol. 9, no. 8, MIT Press, Cambridge (MA) 1997.
<https://www.bioinf.jku.at/publications/older/2604.pdf>,
dostęp 10.09.2025 r.
26. LeCun Y., Bottou L., Bengio Y., Haffner P.: Gradient-Based Learning Applied to Document Recognition. *Proceedings of the IEEE*, vol. 86, no. 11, IEEE, Nowy Jork 1998.
<https://hal.science/hal-03926082v1/document>,
dostęp 10.09.2025 r.
27. Raina R., Madhavan A., Ng A. Y.: *Large-scale Deep Unsupervised Learning Using Graphics Processors*. Computer Science Department, Stanford University, Stanford 2009.
<https://robotics.stanford.edu/~ang/papers/icml09-LargeScaleUnsupervisedDeepLearningGPU.pdf>,
dostęp 10.09.2025 r.
28. Stallkamp J., Schlipsing M., Salmen J., Igel C.: *Man vs. Computer: Benchmarking Machine Learning Algorithms for Traffic Sign Recognition*. Neural Networks, SciVerse ScienceDirect, Amsterdam 2011.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0893608012000457>,
dostęp 10.09.2025 r.
29. Goodfellow I., Pouget-Abadie J., Mirza M., Xu B., Warde-Farley D., Ozair S., Courville A., Bengio Y.: *Generative Adversarial Nets*. Département d'informatique et de recherche opérationnelle, Université de Montréal, Montreal 2014.
<https://arxiv.org/pdf/1406.2661>,
dostęp 10.09.2025 r.
30. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N., Uszkoreit J., Jones L., Gomez A. N., Kaiser Ł., Polosukhin I.: Attention Is All You Need. *Advances in Neural Information Processing Systems*, vol. 30, Curran Associates, Red Hook (NY) 2017.
https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/file/3f5ee243547dee91fbd053c1c4a845aa-Paper.pdf,
dostęp 10.09.2025 r.
31. OpenAI Team: *GPT-4 Technical Report*. OpenAI, San Francisco 2023.
<https://cdn.openai.com/papers/gpt-4.pdf>,
dostęp 10.09.2025 r.
32. Abramson J. i in.: Accurate Structure Prediction of Biomolecular Interactions with AlphaFold 3. *Nature*, vol. 630, no. 8016, Springer Nature, Londyn 2024, s. 493–500.
https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11168924/pdf/41586_2024_Article_7487.pdf,
dostęp 10.09.2025 r.
33. Maslej N., Fattorini L., Perrault R., Gil Y., Parli V. i in.: Chapter 5 – Science and Medicine. *Artificial Intelligence Index Report 2025*. Stanford Institute for Human-Centered Artificial Intelligence, Stanford 2025.
https://hai.stanford.edu/assets/files/hai_ai-index-report-2025_chapter5_final.pdf,
dostęp 10.09.2025 r.

Streszczenie

W niniejszym opracowaniu zaprezentowano syntetyczny przegląd wybranych etapów rozwoju sztucznej inteligencji (SI) — od jej historycznych korzeni po najnowsze osiągnięcia technologiczne. Punktem wyjścia jest refleksja nad wczesnym stadium rozwoju technologii komputerowej oraz próba zdefiniowania pojęcia SI w kontekście kognitywistyki, nauk ścisłych i koncepcji ludzkiej inteligencji. Przeanalizowano kluczowe właściwości systemów SI, takie jak zdolność do uczenia się, przetwarzania i tworzenia wiedzy oraz automatycznej klasyfikacji danych. Szczególną uwagę poświęcono przełomowym dokonaniom ostatnich lat.. W części podsumowującej ukazano ewolucję idei SI — od średniowiecznych koncepcji kombinatoryki po współczesne systemy oparte na głębokim uczeniu. Celem opracowania jest nie tylko przybliżenie historii i mechanizmów funkcjonowania SI, ale również podkreślenie jej interdyscyplinarnego charakteru i rosnącego znaczenia we współczesnej nauce oraz codziennym życiu.

Słowa kluczowe: sztuczna inteligencja (SI), historia SI, sieci neuronowe, głębokie uczenie, interdyscyplinarność, rozwój technologiczny

The Evolution of Artificial Intelligence

Abstract

This paper presents a concise overview of selected stages in the development of artificial intelligence (AI) — from its historical roots to the most recent technological advancements. The starting point is a reflection on the early phase of computer technology and an attempt to define the concept of AI in the context of cognitive science, the exact sciences, and human intelligence theories. Key characteristics of AI systems are analyzed, such as their ability to learn, process and generate knowledge, and automatically classify data. Particular attention is given to the breakthrough achievements of recent years. In the concluding section, the evolution of the idea of AI is outlined — from medieval combinatorial concepts to contemporary systems based on deep learning. The aim of this study is not only to provide an introduction to the history and functioning mechanisms of AI but also to highlight its interdisciplinary nature and growing importance in modern science and everyday life.

Keywords: artificial intelligence (AI), history of AI, neural networks, deep learning, interdisciplinarity, technological development

GREENWASHING IN THE CIRCULAR ECONOMY: IS EVERYTHING THAT APPEARS GREEN REALLY GREEN?

1. Introduction.

The rapid growth of the world's population has inevitably led to increased resource consumption. Both population growth and unbalanced resource consumption have led to an increase in waste generated by humans. In addition, climate change has also played a significant role in these issues. This situation has led to the reuse or recycling of waste. Considering all these factors, the rise of “green economy” and/or “circular economy” was prominent in the past quarter-century while the emergence of new concepts and practices such as “sustainable resource use” have been revealed in the past half-century. Thus, sustainable resource use is a broad definition and application that encompasses “circular economy” and “green economy” practices.

Firms and companies are the ones that provide goods and services to meet human needs. Therefore, it is essential that both decision-makers and companies comply with these practices. Consumers, who are the final link in this chain, should play an important role in the competitive environment by using their purchasing power and exerting pressure on companies and decision-makers to be more conscious and environmentally sensitive. In order to fulfill these responsibilities, businesses must demonstrate an environmentally conscious approach in their production and management decisions and evaluate production functions and environmental issues together.

Environmental awareness has been growing rapidly in recent years. Businesses use environmentally conscious production technologies both to demonstrate their environmental awareness and to meet consumer demands in this area. One of the important problems that marketing managers may face today is that while consumer demand for environmentally and friendly products is increasing, they need to review their product ranges and make the necessary changes in this direction. Thus, marketing research must be

conducted considering new marketing strategies and it must be developed, and consumers must be informed and convinced about the environmentally and friendly features of the company's products.

However, companies or organizations aim to increase the brand value of sustainable businesses in marketing by considering their environmental impacts and/or minimizing all, appearing as an environmentally and friendly company, and thereby gaining value in the eyes of consumers. In addition, actions such as using environmentally and friendly labels on products without any legal or scientific basis, highlighting only the environmentally and friendly aspects of products while not mentioning their environmental harms, and conducting superficial sustainability efforts without making real revisions can constitute “greenwashing.”

Greenwashing refers to a company misleading consumer about its environmental impact and presenting itself as environmentally and friendly. It creates a misleading scenario by taking advantage of the demand for environmentally and friendly products. The reason for this is that consumers have become more conscious and are increasingly turning to environmentally and friendly solutions when purchasing products or services in recent years. For example, the “Dieselgate” scandal involving Volkswagen, one of Europe's largest automobile manufacturers, came to light in 2015 when it was discovered that Volkswagen had installed “fake software” in its diesel engines to reduce emissions during testing, thereby disregarding environmental pollution, public health, and the law. This situation created a major problem both in terms of environmental pollution and public health. (Learn About Volkswagen Violations, Epa 2015). The delay in detecting polluting production processes due to the concealment of environmental damages by businesses, coupled with the continued production processes under the guise of an environmentally friendly image in the eyes of

customers, has led to an increase in environmental pollution.

Businesses that make environmentally conscious investments, develop innovative products, and integrate this consciousness into their business processes communicate with all their stakeholders through eco-marketing practices. However, the concept of greenwashing comes into play at this stage. Brands that believe green products have a good market and they are using greenwashing to manage public perception by simply advertising products that are not truly green, not produced according to green standards, etc. Use of “green”, as environmental commitment has become an important variable in the competitive environment. It is clear that greenwashing, once recognized by consumers, will negatively affect a company's reputation. This is because today's consumers, especially through new media channels, have access to all information and can disseminate it (Boran, 2023).

In the European Union, regulations such as the Green Claims Directive require that environmental claims be backed by scientific evidence to prevent greenwashing. In Türkiye, the Consumer Protection Agency and the Advertising Board can penalize greenwashing.

In this article, it is discussed about greenwashing, effects of greenwashing on circular economy.

2. Approaches to environmental issues and sustainability.

In the 1990s, environmentally and friendly conscious marketing strategies became increasingly important for companies. This period considered the emergence of green labeling, environmentally and friendly packaging, and advertising strategies that prioritized nature and the environment. However, the lack of standardization and regulations also led to environmental concerns and complaints (Park, 2023; Farbacher, 2023)

However, a significant transformation took place, and this time the issue of greenwashing emerged in the 2000s. This period was included the emergence of strict certification and development programs such as the U.S. Green Building Council's Leadership in Energy and Environmental Design (LEED)

certification for buildings and the Energy Star program for appliances (Zhu et al., 2024; Alvarez-García & Sureda-Negre, 2023).

2.1 Green Marketing.

The concept of green marketing was first discussed at a seminar on “ecological marketing” organized by the American Marketing Association (AMA) in 1975 and found its place in the literature. At this seminar, where the impact of marketing on the natural environment was examined with the contributions of academics, bureaucrats, and other participants, the concept of ecological marketing was defined as follows: Studies related to the positive or negative effects of marketing activities on environmental pollution, energy consumption, and the consumption of other resources (Ozata, 2007).

Green marketing aims to help companies gain sustainable competitive advantage through strategies based on environmental awareness. However, the success of these strategies depends not only on marketing communication but also on the comprehensive support of sustainable practices that are fully implemented in production, demand, and waste management activities. Practices such as optimizing material consumption, ensuring the continuity of the product life cycle, and reducing waste contribute to sustainability.

Green marketing can also be referred to as ecological marketing or environmental marketing. In other words, it involves environmentally conscious and eco-friendly practices. For example, designing sustainable packaging, creating products that benefit the environment, and using green procedures in the production or distribution process can be cited as examples.

Green marketing strategies are business strategies that raise awareness about environmental issues, improve business policies and practices, and then launch innovative programs. The benefits of green strategies include cost savings from reducing or eliminating waste, encouraging programs that can improve business performance, increasing brand awareness, and reducing energy

consumption (Family Business Experts, n.d., 2018).

The key role that regular consumers and consumption behaviors play in achieving a circular economy and sustainable development is widely recognized (Durmuş, Şenyapar, H.N. 2024.).

Sustainable consumption (often used interchangeably with terms such as green consumption and conscious consumption) is a general term that can refer to more efficient and more responsible consumption, reduced consumption or a combination of the above (Choudhury et al., 2023).

The fundamental principle of sustainable consumption is strongly linked to the broader ideas of the circular economy and sustainable development, and its implementation requires consumers to implicitly understand the role of consumption behaviors in achieving a circular and sustainable society. As the world has increasingly focused on environmental issues and more people have been swept up in the green wave of environmentalism, a conscious consumer generation has emerged, compelling companies to pay attention to their environmental footprints and respond to this changing consumer attitude with greener business models, products, and practices (Andreoli, Minciotti, & Batista, 2024; Galletta, Mazzù, Naciti, & Paltrinieri, 2024). A global consumer survey conducted in 2015 revealed that two-thirds of consumers worldwide are willing to pay a higher price for products perceived as more environmentally and friendly (Galletta et al., 2024). Conversely, companies with a weak environmental image are less likely to have consumers purchase their products (Stocking & Leonard, 1990). Anecdotal evidence paints a clear picture that environmental perception is a key factor for a company's success in the modern marketplace. In recent years, more companies are not only implementing green strategies (Andreoli & Minciotti, 2024; Testa et al., 2021) but also making a concerted effort to showcase them. Brands are increasingly emphasizing the green features of their products in their communication claims and labels (Testa et al., 2021).

However, as promising as the global shift toward a green mindset may seem, it leaves companies vulnerable to exploitation by businesses seeking to capitalize on this behavior.

2.2. Circular Economy.

A circular economy is a sustainable economic model that aims to reduce resource use and waste generation to zero by reintegrating the resources and waste required for a product into the product lifecycle. Alternatively, a circular economy can be defined as a production and consumption model based on sharing, reusing, and recycling existing materials for as long as possible. The goal of a circular economy is to minimize waste generation and resource use. A circular economy is an economic model that uses waste as a resource and maintains resources in the cycle for longer periods. It encompasses the reuse, repair, and reuse of end-of-life products, the use of their parts in different products, recycling, and the conversion of waste into energy.

The World Bank published data on the circular economy in the European Union, emphasizing that total material use in the EU has decreased by 9.4% over the past two decades, while the proportion of resources derived from recycled waste has increased by almost 50%. However, the global economy is still only 9.1% circular, representing a significant circularity gap (World Bank, 2023; TRVST, 2023).

The Circular Economy model was first proposed by Chinese scientists in 1998. The foundations of the Circular Economy model, which adopts a more sustainable and environmentally friendly approach than the traditional Linear Economy Model, were laid by Chinese scientists. Today, global overconsumption has reached 175%. Resources are consumed at 75% higher than their expected use. As a result of the Circular Economy implementation, natural resources will be used more efficiently, while the environmental impact of resource consumption will be reduced. By requiring less production, the Circular Economy reduces energy consumption

and contributes to the reduction of greenhouse gas emissions.

On the other hand, the Circular Economy is a system in which materials never become waste and nature is regenerated. In a circular economy, products and materials are kept in circulation through processes such as maintenance, reuse, renewal, remanufacture, recycling, and composting. By separating economic activity from the consumption of limited resources. Thus, the circular economy combats other global problems such as climate change and biodiversity loss, waste, and pollution. The primary goal of the circular economy is to eliminate waste and pollution, keep products and materials in circulation, and renew nature. However, plastic recycling is reported to be both inefficient and results in the loss of 60% of the raw material value (Stuchtey et al., 2016).

The environment and the economy are closely intertwined. The circular economy (RE), in the context of reducing used materials, reusing them, and the 3R (reduce, reuse, recycle) principles of the recycling process, demonstrates the strong connection between these two concepts (Arsan & Demirel, 2024, p. 29).

In recent years, environmental awareness and the impact of climate change have increased. This has led to the increase and development of sustainability. However, while large firms and corporations increase their market share, they may be finding the wrong solutions. It has been stated that what we need for major changes in society and economic affairs is a circular and sustainable economy model (Simon, 2025). The successful implementation of a circular economy requires not only the active participation of consumers but also more importantly, manufacturer-led efforts to drive change within the industry. A concrete example of circular economy practices is IKEA, which repurposes old products through its furniture renewal programs. This practice extends product lifespans, reduces distortions, and supports consumer participation in the circular economy (Architectural Digest, 2024; Forbes, 2025, p. 14). Similarly, Procter & Gamble brands offer

their products in reusable packaging through the Loop platform and allow consumers to return their used packaging. Packaging is collected, cleaned, and then recycled, thus reducing waste volume and making efficient use of resources (Recycling Today, 2024; PackWorld, 2024). For example, the fashion industry's pursuit of sustainability and circularity has been overshadowed by greenwashing tactics and a failure to reduce its negative environmental impact. The manipulation of consumers' ethical beliefs by some large corporations through greenwashing leads to a perpetual cycle of overconsumption, hindering real progress towards a circular economy. Therefore, to pave the way for a more sustainable and environmentally responsible industry, it is imperative that efforts to achieve a circular economy are supported by senior management, legal standards, and material flow transparency guidelines.

The terms "sustainability" and "circular economy" are gaining increasing importance among policymakers, businesses, and NGOs worldwide. Sustainability refers to the balance of the three dimensions of sustainable development: economic, social, and environmental impacts.

3. Green washing.

Greenwashing is a deceptive marketing practice that misleads any company or organization offering goods and services by giving them the impression of being environmentally friendly. The increasing demand for goods and services due to a growing population has led to an increase in environmental problems. This has led to a growing public perception of environmental awareness and environmental friendliness. This term derives from the term "whitewashing," which refers to companies' attempts to conceal errors or mistakes, such as appearing environmentally or friendly, and the word "green," which refers to environmentally or friendly practices. Greenwashing can manifest in various ways, from subtle exaggerations to blatant false claims, whether deliberately covert or overt. Examples include misleading advertising, rebranding products with green packaging that don't offer significant

environmental benefits, or making environmental claims that are vague, irrelevant, or unsupported by evidence. Common tactics also include using vague or ambiguous terms like "eco-friendly" or "natural" without providing concrete evidence or context. Some companies may emphasize minor environmental improvements while ignoring the more significant negative impacts of their operations. Others may use misleading images, such as pristine natural landscapes, in advertising products that contribute to environmental degradation. More sophisticated forms of greenwashing can include selective disclosure of environmental data, the selection of positive statistics, and the omission of less positive information (Durmuş, Şenyapar, H.N. 2024). More than half of EU companies' green claims are reported to be vague or misleading, and 40% are completely unsubstantiated (Segal, 2024). Greenwashing has various examples across different industries. For example, in the cosmetics industry, companies falsely claim to use natural and ecological ingredients. In the food industry, some companies also change packaging to claim the product is GMO-free (Savoldelli, 2021).

3.1. Greenwashing in Circular Consumption.

The influence of the "greenwashing" phenomenon in circular consumption is increasing. Consequently, this phenomenon is attracting the attention of researchers and those working on this topic. It can be argued that awareness of environmental issues is increasing, and companies' sustainability claims are becoming more influential in consumer decisions.

In greenwashing, misleading strategies often include visual imagery, the use of green color, misleading labels, or vague sustainability claims. This can be seen as an unrealistic form of corporate social responsibility that can harm both consumers and society (Courtnell, J. 2021, January 21). Therefore, companies' unethical communication strategies can damage brand equity and undermine social trust. H&M's "Conscious Collection" campaign promoted sustainability and its contribution to the circular economy, claiming that they would recycle products brought to their stores. However, it turned out that the brand recycled only a small

portion of the products it received.(Earth.org,2025) This situation was highly criticized and considered an example of greenwashing. Similarly, Ryanair, Europe's airline with the largest CO2 emissions, has been warned by an ad manufacturer over advertisements claiming to be "Europe's lowest-emission airline." The UK Advertising Authority ruled yesterday that the low-cost airline had misled consumers with claims in its press, TV and radio ads (Transport & Environment, 2020).Studies have shown that conscious consumers, in particular, question the credibility of environmentally and friendly messages. Perceived greenwashing practices have a direct or indirect negative impact on consumers (Santos, Coelho & Marques, 2023; Jog & Singhal, 2020).This is because when consumers believe that environmental promises are insincere, they may become dissatisfied not only with the product but also with the brand itself.

Those who perceive most companies to be using greenwashing tactics are more environmentally conscious and more likely to engage in circular consumption behaviors (Jong, Huluba & Beldad, 2020).This suggests that greenwashing does not always have negative consequences; It has also been shown that it can sometimes trigger environmental awareness in consumers. Therefore, consumers' perception that companies engage in greenwashing practices influences circular consumption intentions by raising consumers' greater awareness and environmental concerns. Therefore, the relationship between greenwashing and circular purchase intentions is not always direct and may be mediated through consumers' environmental concerns (Sun & Shi, 2022; Zhang, Li, Cao & Huang, 2018) Junior et al. (Junior, Martínez, Correa, Moura-Leite & Da Silva, 2019),showed that when a product is perceived as greenwashing, loyalty, satisfaction, and utility are lost, and it becomes a product that causes confusion in its consumption. Bulut et al. (Bulut, Nazli, Aydin & Haque, 2021), on the other hand, indicated that the perception of greenwashing reduces the effects of environmental concerns on green behavior. In other words, even if consumers are environmentally concerned, they may have difficulty translating these concerns into action due to a lack of trust. Zhang et al. (Zhang, Li, Cao & Huang, 2018),confirmed that the

perception of greenwashing has a direct negative impact on green purchase intentions. This suggests that greenwashing can harm sustainability efforts not only at the individual but also at the societal level.

Moreover, greenwashing can lead to distrust of companies and their environmental claims, which can have negative effects on a company's status and sales. In the long term, this reduces the competitiveness of brands and can lead to trust-based divisions within the industry. This is particularly common in sectors with direct contact with consumers. For example, the fashion industry has come under scrutiny for using vague and misleading environmental claims such as "eco-friendly" or "sustainable" without providing any evidence (Sun & Shi, 2022). Fashion brands often promote such claims through advertising campaigns and product labels. In contrast, the food industry has been criticized for using misleading labels such as "natural" or "organic" that may not honestly reflect the product's environmental footprint (Cioca, Bacali, Lakatos & Birgovan, 2022). Because these labels are often unregulated, they create a false sense of trust in consumers, creating a misleading perception. Overall, the literature shows that greenwashing is a widespread phenomenon that can have negative effects on both consumers and society (Jong, Harkink & Barth, 2018). Therefore, combating greenwashing should not only be at the level of individual awareness; It should also be systematically addressed by policy makers, NGOs and media channels.

3.2. *Greenwash and Sustainability.*

Marketing and advertising are among the most powerful tools for companies to communicate with their target consumers. This serves to promote products and services by increasing brand awareness. The goal is to increase sales of goods and services as well as enhance customer loyalty.

In marketing and advertising, excessive exaggeration is often used to create a stronger impact on the target consumers. Efforts to make product and service features more appealing and innovative help brands stand out in the competitive landscape. However, these strategies can include misleading statements that mislead or confuse customers. In recent years, protecting customer rights has become

more important. This issue is not limited to the detection of defective products or poor service; promises that mislead customers are also under scrutiny. Various strategies that create this misleading effect cause organizations to face "greenwashing" lawsuits (Yerlikaya, 2024). Greenwashing is also defined as using statements that overvalue sustainable activities compared to their actual impacts, or even concealing information about non-green activities. In greenwashing, unsubstantiated or exaggerated claims about environmental impacts are made; in other words, a brand emphasizes features that don't reflect reality in an attempt to greenwash its products. For example, packaging may be labeled "natural" or "eco-friendly," but in reality, the product's ingredients or production process may be harmful to the environment.

Another greenwashing method, known as "information hiding", involves ignoring negative environmental impacts while highlighting only the positive aspects. For example, a brand might claim to have increased energy efficiency in its production process while ignoring other environmentally damaging steps, such as waste management or raw material sourcing. Such strategies hinder consumers' ability to make informed choices and make it difficult to develop a realistic environmental awareness.

Discoveries of greenwashing have garnered media and public attention in recent years due to the distrust it creates among consumers. Exaggerations and misinformation by major brands, including some well-known and globally active companies, have been identified. All of these can be considered greenwashing. Greenwashing cases have generated significant public debate, leading to the establishment of civil society organizations not only in Europe but also in other parts of the world to monitor the issue. Volunteer organizations have emerged to monitor and analyze companies and their public statements, advertisements, and announcements, and to publicize their findings (Yerlikaya, 2024).

Regarding greenwashing, the Competition and Markets Authority (CMA) in the UK has introduced the Green Claims Code to combat greenwashing. This Authority has stated that sustainability claims must not be misleading and that companies must present

their environmental claims in a verifiable manner. Greenwashing practices not only damage corporate reputations but also diminish the value of sustainability in the eyes of society and negatively impact all efforts in the sector. In this context, the legal regulations introduced to ensure that consumers are not misled and that sustainability claims are verifiable are an important step towards establishing a credible foundation in the sector. In line with these regulations, which directly affect Türkiye, **4. Conclusion.**

To understand the root causes of greenwashing and create a more transparent and sustainable business environment, (i) Consumer Demand for Green Products, (ii) Competitive Advantage, (iii) Legal Gaps and Insufficient Standardization, (iv) Complex Supply Chains, (v) Short-Term Profit Motives, (vi) Limited Consumer Information, (vii) Media and Public Relations, (viii) Conflict of Thought and Symbolic Behavior, and (ix) Cultural and Organizational Factors are crucial (Durmuş, Şenyapar, H.N. 2024).

The European Council today launched a series of recommendations and measures aimed at protecting consumers from greenwashing. These include the requirements for companies to substantiate and verify their claims and labels regarding the environmental characteristics of products and services. The European Commission implemented a directive in March 2023 that aims to meet the need for reliable and verifiable information for consumers (Segal, 2024).

Because the transition to sustainable and circular models requires not only concrete actions but also transparency, further research and efforts are needed to better understand the

companies must base their sustainability strategies on evidence and ensure accuracy and transparency in their marketing processes. Preventing misleading claims will significantly contribute to building a healthier future in terms of sustainability. Companies that support their sustainability commitments with concrete steps have the potential to protect both consumer trust and brand reputation in the long term (Yerlikaya, 2024).

relationship between these elements in corporate behavior (Todaro and Torelli, 2024).

Preventing greenwashing through laws and regulations alone may not be effective. Therefore, non-legal means of holding organizations accountable for misleading environmental claims are also important. Addressing this issue on a large scale, which is necessary to prevent systemic risks arising from widespread greenwashing, will likely require action in multiple areas. This suggests that businesses must proactively address the risks of greenwashing to maintain their competitiveness during the climate transition. In the hierarchy of consumer decision-making, environmental concern ranks well below price, value, size, quality, style, ease of purchase, materials, and other factors (Mandari et al., 2022). Therefore, sustainability is important, but economics and consumer opportunities are more important. Greenwashing cases like those at Volkswagen and H&M have damaged consumer trust and left a negative impression on brands. On the other hand, companies like Patagonia and IKEA have both increased consumer trust and encouraged circular consumption behavior through transparent sustainability practices.

REFERENCES

1. Álvarez-García O, Sureda-Negre J. Greenwashing and education: An evidence-based approach. *The Journal of Environmental Education* 2023; 54 (4):265–77.
2. Andreoli TP, Minciotti SA, Batista LL. Attention and Skepticism: Influence on Ad Evaluation with Greenwashing. *BBR* 2024:e20231539.
How Do We Avoid Another Greenwash? [https://housingindustryleaders.com/the-circular-economy-how-do-we-avoid-another-greenwash/\(31.07.2025\)](https://housingindustryleaders.com/the-circular-economy-how-do-we-avoid-another-greenwash/(31.07.2025)).
3. (Architectural Digest, 2024; Forbes, 2025, p. 14
4. Arsan, B., & Demirel, A. G. (2024). The impact of e-waste minimization on the actualization of SDG 12: Responsive Consumption and Production. In N. Ketenci (Ed.), *Transition to the Circular Economy Model: The Case of Turkey* (ss. 27–36). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-52700-5_4
5. Bulut, C.; Nazli, M.; Aydin, E.; Haque, A.U. The effect of environmental concern on conscious green consumption of postmillennials: The moderating role of greenwashing perceptions. *Young Consum.* 2021, 22, 306–319
6. Choudhury, R. R., Islam, A. F., & Sujauddin, M. (2023). More than just a business ploy? Greenwashing as a barrier to circular economy and sustainable development: A case study-based critical review. *Circular Economy and Sustainability*, 4, 233–266. <https://doi.org/10.1007/s43615-023-00288-9>
7. Durmuş, Şenyapar, H.N. 2024. Unveiling greenwashing strategies: A comprehensive analysis of impacts on consumer trust and environmental sustainability. *Journal of Energy Systems*, 8(3): 164-181, DOI: 10.30521/jes.1436875
8. Learn About Volkswagen Violations, <https://www.epa.gov/vw/learn-about-volkswagen-violations>
9. Farbacher T. The Federal Trade Commission's Green Guides: Failing the American Consumer and the Planet. *Loy Consumer L Rev* 2023; 36:136.
10. Galletta S, Mazzù S, Naciti V, Paltrinieri A. A PRISMA systematic review of greenwashing in the banking industry: A call for action. *Research in International Business and Finance* 2024; 69:102262.
11. Jong, M.D.T.; Harkink, K.M.; Barth, S. Making Green Stuff? Effects of Corporate Greenwashing on Consumers. *J. Bus. Tech. Commun.* 2018, 32, 77–112.
12. Jong, M.D.T.; Huluba, G.; Beldad, A.D. Different Shades of Greenwashing: Consumers' Reactions to Environmental Lies, Half-Lies, and Organizations Taking Credit for Following Legal Obligations. *J. Bus. Tech. Commun.* 2020, 34, 38–76.
13. Junior, S. B., Martínez, M. P., Correa, C. M., Moura-Leite, R. C., & Da Silva, D. (2019). Greenwashing effect, attitudes, and beliefs in green consumption. *RAUSP Management Journal*, 54(2), 226–241.
14. Mandaric D, Hunjet A, Vukovic D: The impact of fashion brand sustainability on consumer purchasing decisions. *J Risk Financ Manag* 2022, 15:176. <https://doi.org/10.3390/jrfm15040176>.
15. Park K. Green trade marks and the risk of greenwashing. *Intellectual Property Forum: Journal of the Intellectual and Industrial Property Society of Australia and New Zealand* 2023; (131):54–6.
16. PackWorld. (2024, Eylül 27). 2024 Packaging Recycling Summit Draws 500+ Attendees to Explore Collaborative Circular Supply Chain Solutions and Industry Innovations. PMMI. <https://www.pmmi.org/news/2024-packaging-recycling-summit-draws-500-attendees-to-explore-collaborative-circular-supply-chain-solutions-and-industry-innovations>
17. Recycling Today. (2024, Kasım 4). PPRC 2024: Addressing the packaging recovery problem. *Recycling Today*. <https://www.recyclingtoday.com/news/pprc-2024-addressing-the-packaging-recovery-problem/>
18. Santos C, Coelho A, Marques A. A systematic literature review on greenwashing and its relationship to stakeholders: state of the art and future research agenda. *Manag Rev Q* 2023.
19. Savoldelli, F. (2021). From circular economy to greenwashing: how is the sustainability mindset evolving? <https://scaleupnation.com/post/circular-economy-to-greenwashing-how-is-sustainability-mindset-evolving/> (13 July, 2021)
20. Segal, M. (2024). EU Council Agrees on New Rules to Tackle Greenwashing in Product Green Claims. <https://www.esgtoday.com/eu->

council-agrees-on-new-rules-to-tackle-greenwashing-in-product-green-claims/ (June 17, 2024)

21. Simon, S., 2025. Sustainability, Circular Economy and the Danger of Greenwashing.

22.

<https://www.collectivegreen.de/sustainability-circular-economy-and-the-danger-of-greenwashing/31.07.2025>

23. Sun, Y., & Shi, B. (2022). Impact of greenwashing perception on consumers' green purchasing intentions: A moderated mediation model. *Sustainability*, 14, 12119. <https://doi.org/10.3390/su142112119>

24. Stocking H, Leonard JP. Fingering the Bad Guys: Ironies in Environmental Journalism. *Newspaper Research Journal* 1990; 11 (4):2–11.

25. Stuchtey, M., Swartz, S., Vanthournout, H. (2016). Remaking the plastics economy will require innovation in recycling and reuse as well as in design and chemistry. In: *The circular economy: Moving from theory to practice*. McKinsey Center for Business and Environment Special edition, October 2016, Editors: Cait Murphy, Josh Rosenfield). 17-21

26. Szilagyi, A.; Cioca, L.-I.; Bacali, L.; Lakatos, E.-S.; Birgovan, A.-L. Consumers in the Circular Economy: A Path Analysis of the Underlying Factors of Purchasing Behaviour. *Int. J. Environ. Res. Public Health* 2022, 19, 11333

27. Transport & Environment. (2020, 5 Şubat). Ryanair busted over misleading 'low CO₂' claims.

<https://www.transportenvironment.org/articles/ryanair-busted-over-misleading-low-co2-claims>

28. Testa, F., Pretner, G., Iovino, R., Bianchi, G., Tessitore, S., & Iraldo, F. (2021). Drivers to green consumption: A systematic review. *Environment, Development and Sustainability*, 23(4), 4826–4880. <https://doi.org/10.1007/s10668-020-00844-5>

29. Todaro, D. L., Torelli, R., 2024. From greenwashing to ESG-washing: A focus on the circular economy field. *Corporate Social Responsibility and Environmental Management*, 31 (5), 4034-4046. <https://doi.org/10.1002/csr.2786>

30. Yerlikaya, N.S., 2024. Greenwash: The Dark Side of Sustainability. <https://en.escarus.com/greenwash-the-dark-side-of-sustainability/> (25 Nov, 2024).

31. Zhang, L., Li, D., Cao, C., & Huang, S. (2018). The influence of greenwashing perception on green purchasing intentions: The mediating role of green word-of-mouth and moderating role of green concern. *Journal of Cleaner Production*, 187, 740–750. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.063>

32. Zhu Q, Zhao X, Wu M. Third-party certification: how to effectively prevent greenwash in green bond market? –analysis based on signalling game. *Environ Dev Sustain* 2024; 26 (6):16173–99.

33. 10 Companies Called Out For Greenwashing by Deena Robinson, Jul 17th 2022 10 Companies Called Out For Greenwashing | Earth.Org

Abstract

Both population growth and unbalanced resource consumption have led to an increase in waste generated by humans. This situation has led to the reuse or recycling of waste. Depending on it, environmental awareness and the impact of climate change have increased and “green economy” and/or “circular economy” have become important. Thus, companies aim to increase the brand value of sustainable businesses in marketing by considering their environmental impacts and/or minimizing all, appearing as an environmentally and friendly company, and thereby gaining value in the eyes of consumers. However, greenwashing, a deceptive marketing practice that misleads consumers by giving the impression that companies providing goods and services are environmentally friendly, has also increased. In practice, greenwashing can be seen in many different areas and in many different ways. This not only deceives consumers, but also, in reality, may lead to the increased consumption of limited resources and may not actually be environmentally friendly. To prevent this, solutions include the strict enforcement of laws and regulations, as well as consumers and civil society organizations becoming more aware and putting pressure on companies and organizations.

keywords : greenwashing, sustainability, marketing , economy , green marketing

Streszczenie

Wzrost liczby ludności oraz nie zrównoważone zużycie zasobów przyczyniły się do zwiększenia ilości odpadów wytwarzanych przez człowieka. Zjawisko to spowodowało konieczność ponownego wykorzystania i recyklingu odpadów. W konsekwencji wzrosła świadomość ekologiczna oraz znaczenie zmian klimatycznych, a pojęcia takie jak „zielona gospodarka” czy „gospodarka o obiegu zamkniętym” zyskały na znaczeniu. Coraz więcej przedsiębiorstw, dążąc do zwiększenia wartości marki, stara się uwzględniać wpływ swojej działalności na środowisko oraz minimalizować jego negatywne skutki, prezentując się jako firmy przyjazne naturze i zyskując tym samym uznanie w oczach konsumentów. Jednocześnie jednak nasileniu uległo zjawisko greenwashingu – nieuczciwej praktyki marketingowej, polegającej na wprowadzaniu konsumentów w błąd poprzez sugerowanie, że dane towary i usługi są ekologiczne. Greenwashing występuje w wielu sektorach i przybiera różnorodne formy, co nie tylko dezinformuje konsumentów, lecz także może prowadzić do nadmiernego zużycia ograniczonych zasobów oraz pozornych działań proekologicznych. Zapobieganie temu zjawisku wymaga zarówno ścisłego egzekwowania przepisów i regulacji, jak i podnoszenia świadomości konsumentów, aktywizacji organizacji społeczeństwa obywatelskiego oraz wywierania presji na przedsiębiorstwa.

słowa kluczowe: greenwashing, zrównoważony rozwój, marketing, gospodarka, zielony marketing

Prof. dr hab. inż. Maria Richert ¹⁾

1) Akademia Górniczo Hutnicza w Krakowie
<https://orcid.org/0000-0003-2233-6923>

Aluminium – metal przyszłości

Wstęp

Artykuł obejmuje dane dotyczące charakterystyki chemicznej, produkcji i rynku aluminium, w kontekście znaczenia tego metalu dla gospodarki w Polsce i na świecie. Metal ten jest poszukiwany i wykorzystywany w prawie wszystkich dziedzinach gospodarki światowej. Przewiduje się znaczący wzrost zapotrzebowania na aluminium i jego stopy w najbliższych latach, ze względu na jego nadzwyczajne cechy, które powodują, że coraz częściej wypiera inne metale np. stal. W szczególności jest to widoczne w branży motoryzacyjnej i budownictwie. Ostatnim trendem jest produkcja „zielonego” aluminium, które będzie produkowane z jak najmniejszym śladem węglowym. Recykling aluminium obejmuje co najmniej 75% obecnie używanego aluminium. Zarówno w Polsce jak i na świecie produkcja aluminium i jego stopów wzrasta, a prognozy na najbliższe lata wskazują, że jest to utrzymująca się tendencja wynikająca ze wzrastającego zapotrzebowania na ten metal.

1. Wprowadzenie

Jednym z najbardziej wykorzystywanych metali we współczesnej gospodarce jest aluminium i jego stopy. Wynika to z charakterystycznych właściwości tego metalu takich jak: lekkość, łatwość odkształcania, odporność na korozję, stosunkowo niskie temperatury obróbki plastycznej na gorąco, co obniża zapotrzebowanie na energię w porównaniu np. do wyrobów stalowych. Aluminium jest w 100% recyklingowalne, stąd prawie 75% obecnie używanego aluminium pochodzi z recyklingu. Oszczędności energii w przypadku produkcji aluminium wtórnego ze złomu, zamiast z rudy boksytu, sięgają nawet 95% [1]. Aluminium można poddawać recyklingowi w nieskończoność bez utraty jakości. Sprzęty dla gospodarstw domowych, przemysł motoryzacyjny, jachty, statki morskie, budownictwo, przemysł lotniczy i wiele innych branż gospodarki są konsumentami aluminium

i jego stopów. Można stwierdzić, że aluminium jest metalem nie tylko współczesności lecz także przyszłości. Artykuł ma charakter przeglądowy. Dyskutuje, prezentuje dane i analizuje charakterystyczne cechy tego metalu, przedstawia informacje dotyczące recyklingu aluminium i jego znaczenia dla gospodarki, prezentuje rynek aluminium w Polsce i na świecie oraz podaje prognozy dotyczące zapotrzebowania i możliwości produkcyjnych aluminium i jego stopów w następnych latach. Oprócz „Wprowadzenia” zawiera 10 rozdziałów, w których przedstawia przegląd istotnych danych dotyczących aluminium. Kolejne rozdziały po „Wprowadzeniu” to: 2- „Aluminium i jego stopy”; 3- „Charakterystyka chemiczna aluminium”; 4- „Proces produkcyjny aluminium”; 5- „Rodzaje stopów aluminium”; 6- „Recykling aluminium”; 7- „Rynek aluminium”; 8- „Produkcja aluminium i jego stopów w Polsce”; 9- „Aluminium w Polsce – stan obecny, perspektywy”; 10- „Aluminium na świecie”; 11- „Podsumowanie”.

2. Aluminium i jego stopy

Aluminium jest trzecim pierwiastkiem pod względem powszechności występowania na Ziemi. Ustępuje jedynie krzemowi oraz tlenowi (Rys.1). Stanowi około 8 procent skorupy ziemskiej, dlatego biorąc dodatkowo pod uwagę jego możliwości recyklingu, nie ma obaw, że jego zasoby szybko się skurczą [2]. Najważniejszym związkiem chemicznym, z którego wytwarzane jest aluminium to tlenek glinu. Tlenek glinu jest najczęściej występującym w skorupie ziemskiej metalicznym związkiem chemicznym. Najbardziej bogatą w tlenek glinu rudą jest boksyt. Boksyty występują w tropikach i subtropikach, gdzie wydobywa się je w kopalniach odkrywkowych [3]. Nadzwyczajna łatwość recyklingu wyróżnia aluminium na tle innych metali. Aż 95% opakowań aluminiowych jest ponownie wykorzystywana. Warto także podkreślić, że odzysk w żaden

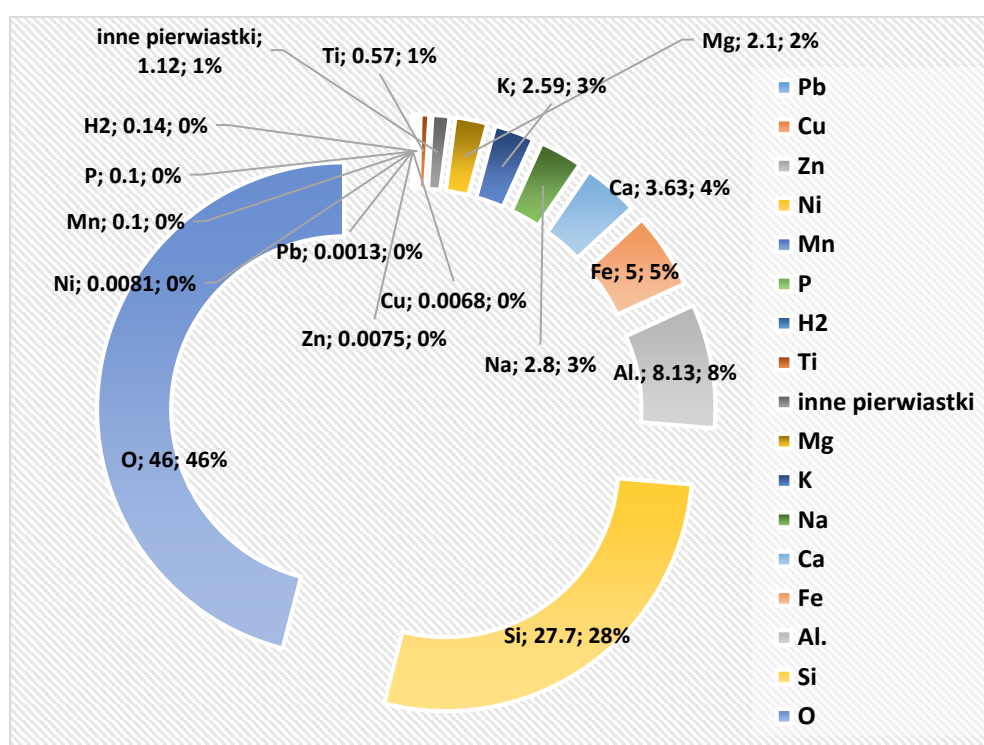
sposób nie obniża jakości aluminium po recyklingu.

W porównaniu do wytrzymałości, jaką charakteryzuje się aluminium, jest to metal bardzo lekki. Jest trzykrotnie lżejszy od stali. Te cechy aluminium doceniane są w branży produkcyjnej, budowlanej i logistycznej – np. znacznie mniejszy ciężar przekłada się na obniżenie zużycia energii podczas transportu. Aluminium można łatwo przerabiać i nadawać mu dowolne kształty stosując walcowanie, wyciskanie lub tłoczenie. Taką przeróbkę plastyczną można stosować zarówno na gorąco, jak i na zimno. Aluminium łatwo tworzy różne stopy zarówno z metalami jak i niemetalami. Umożliwia to osiągnięcie założonych

właściwościach fizycznych i wytrzymałościowych zaprojektowanych stopów.

Głównymi dodatkami stopowymi w stopach aluminium są (klasyfikacja stopów do przeróbki plastycznej wg IADS):

- 1XXX min. 99,00% Aluminium o wysokiej czystości
- 2XXX Miedź
- 3XXX Mangan
- 4XXX Krzem
- 5XXX Magnez
- 6XXX Magnez i Krzem
- 7XXX Cynk
- 8XXX Pozostałe stopy



Rys.1. Występowanie pierwiastków w skorupie ziemskiej [%]

Źródło: [4]

Aluminium odbija zarówno ciepło, jak i światło. Dzięki temu temperatura nie przenika poza jego powłokę, co czyni go świetnym materiałem zarówno do przechowywania żywności, jak i do produkcji np. koców ratunkowych.

Aluminium bardzo łatwo się utlenia czego skutkiem jest utworzenie cienkiej, szczelnej powłoki tlenkowej na powierzchni, która zapobiega dalszemu utlenianiu. Dzięki temu zjawisku staje się odporne na dalsze szkodliwe działanie korozji. Powoduje to, że aluminiowe wyroby są trwałe i nie muszą być

zbyt często wymieniane, w porównaniu do elementów z innych metali np. z żelaza lub ze stali, które łatwo rdzewieją.

Wczesne zastosowania przemysłowe znalazło aluminium w silnikach, takich jak zbudowany w 1903 roku przez braci Wright do zasilania ich pierwszego dwupłatowca. Wybór aluminium był podyktowany jego znakomitą lekkością w stosunku do innych materiałów.

Folia aluminiowa weszła na rynek w 1910 roku. Rozwój produkcji stopów aluminium, rozpoczęty w 1911 roku, poprawił

właściwości fizyczne i otworzył nowe pola zastosowań przemysłowych aluminium.

Charakterystyka właściwości aluminium wskazuje, że jest metalem specjalnym. Jest to najczęściej stosowany na świecie metal nieżelazny z szerokim spektrum zastosowań. Aluminium jest lekkie, odporne na korozję i pozbawione właściwości magnetycznych. Dlatego stosowane jest w wielu branżach przemysłu. Znajdziemy aluminium: w opakowaniach, drzwiach i oknach, krzesłach czy częściach samochodów, sprzętach kuchennych, komputerach i telefonach komórkowych.

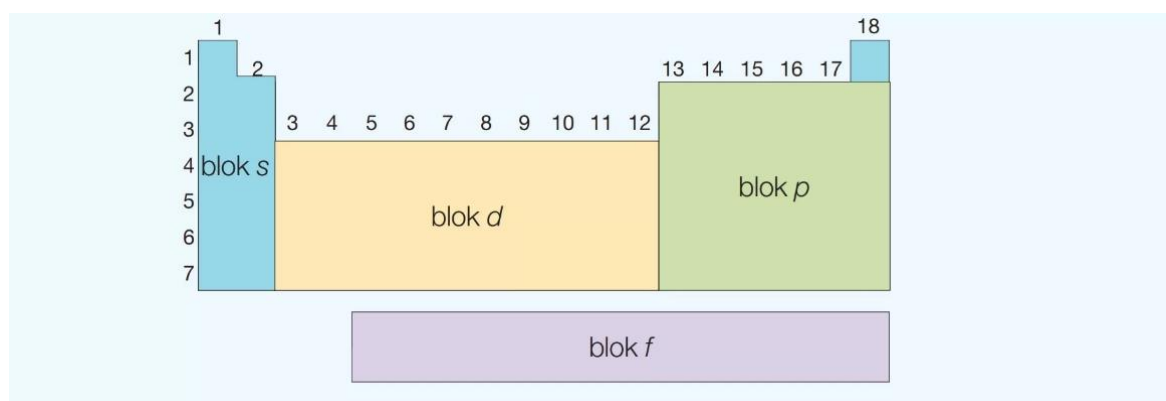
Od wielu dziesięcioleci jest używane w budownictwie i inżynierii. Z sukcesem konkuruje z takimi materiałami jak stal, drewno czy tworzywa sztuczne. Parametry materiałowe takie jak relatywnie niski ciężar właściwy, wysoka wytrzymałość, właściwości plastyczne umożliwiające obróbkę, doskonała odporność korozyjna to podstawowe zalety aluminium, dzięki którym materiał ten znajduje tak szerokie zastosowanie [5].

Ostatnim osiągnięciem metalurgii jest produkcja przezroczystego aluminium tzw. Alonu. Produkcja zaczyna się od tlenoazotku glinu. Jest to związek chemiczny o silnych właściwościach ognioodpornych [6]. Umieszcza się go w gumowej matrycy o kształcie przedmiotu, jaki chcemy wykonać. Następnie poddawany jest ekstremalnie wysokiemu ciśnieniu w procesie prasowania izostatycznego. Uzyskany w ten sposób materiał „spieka się” przez kilka dni w

temperaturze dwóch tysięcy stopni Celsjusza. Polerowanie wyrobu jest finalnym etapem produkcji, który zapewnia przezroczystość równą szybie laminowanej. Co więcej, powierzchnia wykonana z tlenoazotku glinu zachowuje przejrzystość także po „przyjęciu” kilku kul. Jak nietrudno sobie wyobrazić, może to stanowić duży atut na przykład w trakcie ucieczki wozem pancernym pod ostrzałem. Zaletą Alonu jest również jego lekkość. Szyba z przezroczystego aluminium zapewnia lepszą ochronę niż dwukrotnie cięższa kuloodporna szyba laminowana. Jednak „przezroczyste aluminium” nie jest obecnie powszechnie używane. W większości przypadków powodem są wysokie koszty produkcji. Kuloodporne szyby aluminiowe to nadal wynalazek młody i bardzo drogi w wytwarzaniu. Pracujący nad jego udoskonaleniem naukowcy są jednak optymistami i wierzą, że niebawem rozpowszechni się w przemyśle, zapewniając skuteczniejszą ochronę życia żołnierzy, policjantów, ochroniarzy i VIP-ów zagrożonych polem rażenia kul z broni automatycznej. Na razie Alon stanowi niezbitą dowód, że aluminium (samoistnie czy w kombinacji z innymi pierwiastkami) to supermateriał przyszłości.

3. Charakterystyka chemiczna aluminium

Aluminium jest pierwiastkiem chemicznym z bloku p układu okresowego (Rys.2). Do grupy p należą metale, semi-metale, halogenki i gazy szlachetne.



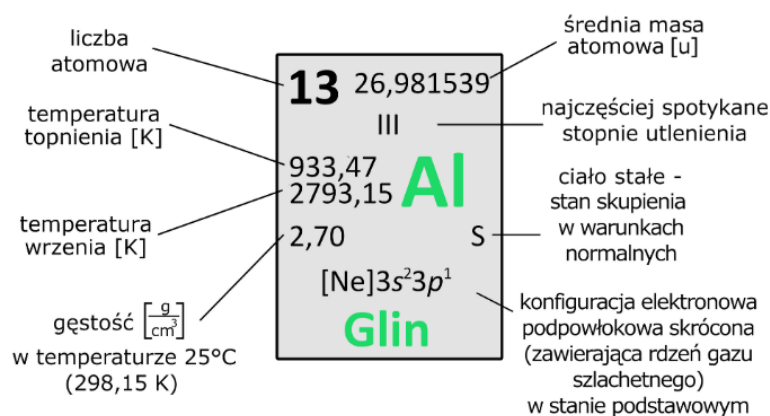
Rys.2. Podział układu pierwiastków na elektrony bloki konfiguracyjne

- Do bloku s należą pierwiastki chemiczne z 1 i 2 grupy układu okresowego oraz hel.
- W bloku p znajdują się pierwiastki chemiczne z grup 13–18 z wyjątkiem helu.

- W bloku *d* znajdują się pierwiastki chemiczne z grup 3–12.
- Blok *f* tworzą lantanowce i aktynowce.

Źródło: [7]

Aluminium posiada 3 elektrony walencyjne. Należy do grupy borowców w 13 grupie układu okresowego pierwiastków (Rys.3,4,5; Tabela 1).



Rys. 3. Charakterystyka chemiczna aluminium

Źródło: [8]

Periodic table of elements showing the layout of the p-block elements. The p-block elements are located in groups 13-18 (IIIA-VIIIA) and include elements from Boron (B) to Oganesson (Og). The table is color-coded by groups: Group 13 (orange), Group 14 (yellow), Group 15 (green), Group 16 (blue), and Group 17 (purple).

Now Invent.
www.americanelements.com

Rys.4. Układ pierwiastków- Skład pierwiastków bloku p

Źródło: [9]

Pierwiastek	Konfiguracja elektronowa	Energia jonizacji (eV)	Promień jonowy (nm)	Elektroujemność	Potencjał E_0 (V)
Bor (B)	(He)2s ² 2p ¹	8,30	0,020	2	-0,87
Glin (Al)	(Ne)2s ² 2 p ¹	5,98	0,052	1,5	-1,66
Gal (Ga)	(Ar)2s ² 2p ¹	6,00	0,060	1,6	-0,53
Ind (In)	(Kr)5s ² 5p ¹	5,79	0,081	1,7	-0,34
Tal (Tl)	(Xe)6s ² 6p ¹	6,11	0,095	1,8	-0,34

Źródło: [8]

- Glin jest odporny na działanie kwasów organicznych, ale w obecności niektórych mocnych kwasów nieorganicznych (HCl , H_2SO_4) ochronna warstwa tlenku aluminium

- Jedynym stabilnym izotopem glinu jest ^{27}Al

- Glin jest pierwiastkiem o dużej elektroujemności (1,61 wg skali Paulinga) i aktywności chemicznej. W normalnych warunkach, dzięki zjawisku **pasywacji**, odznacza się niezwykle wysoką trwałością. W obecności tlenu tworzy na swojej powierzchni warstwę tlenku, chroniącą metal przed dalszym utlenieniem.
- Glin należy do silnych reduktorów i umożliwia wydzielanie metali z ich tlenków. Proces ten nosi nazwę aluminotermii: $2\text{Al} + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 2\text{Fe}$. Aluminotermia jest stosowana do otrzymywania m.in. chromu, wanadu i manganu.

4. Proces produkcyjny aluminium

Nazwa aluminium pochodzi od łacińskiego słowa „alumen”, co oznacza „gorzką ziemię” lub „ałun”. Nazwę po raz pierwszy zaproponował szwedzki chemik Jons Jakob Berzelius 1825r. do opisanie właściwości tlenku tego metalu. Później, Hans Christian Ersted z powodzeniem wytworzył metaliczne aluminium i zasugerował nazwanie nowo odkrytego metalu „aluminium”. Ta nazwa została powszechnie akceptowana w Wielkiej Brytanii i innych krajach.[10].

W 1825 r. Duńczyk Christian Oersted wyodrębnił glin, ale pierwszy przedmiot z tego pierwiastka udało się wyprodukować dopiero 29 lat później. Była to grzechotka, prezent dla syna Napoleona III, którą wykonał francuski chemik Henri Deville.

Glin to trzeci najbardziej rozpowszechniony pierwiastek występujący w skorupie ziemskiej (zaraz po krzemie i tlenie). Od jego symbolu (Al) oraz symbolu krzemu (Si) wywodzi się nazwa najbardziej zewnętrznej warstwy globu – siał (współcześnie określanej jako warstwa granitowa). Historia tzw. „srebra z gliny” sięga nawet 2000 lat. Już wtedy można było usłyszeć opowieści o srebrnym metalu, który jeden z rzymskich złotników pokazał cesarzowi Tyberiuszowi. Kolejną historyczną wzmiankę o aluminium datuje się na okres rządów cesarza Napoleona III Bonaparte, który na bankietach podawał jedzenie na aluminiowej zastawie [11].

Przemysłowym sposobem otrzymywania aluminium o czystości technicznej (powyżej 99%) jest zastosowanie dwóch kolejnych procesów. W pierwszym procesie Bayera otrzymywany jest tlenek glinu, a w następnym etapie przeprowadzany jest

proces redukcji elektrolitycznej (elektroliza metodą Halla-Heroult), dzięki której uzyskuje się czyste aluminium [12].

Produkcja tlenku glinu składa się z trzech etapów: ekstrakcji, wytrącania i kalcynacji. Uzyskany w procesie Bayera tlenek Al_2O_3 jest roztapiany z kriolitem i poddawany procesowi elektrolizy w temperaturze sięgającej 900°C. Elektrolizery zawierają katodę węglową, która jest izolowana za pomocą cegieł ogniotrwałych wewnątrz prostokątnego pancerza, wykonanego ze stali. Anoda węglowa zawieszona jest na przewodzącej prąd elektryczny belce. Wszystkie elektrolizery w procesie są połączone szeregowo w celu utworzenia tzw. linii potencjału. Prąd stały z anody węglowej przepływa przez kąpiel elektrolityczną i trafia do katody. Przepływ prądu powoduje wydzielanie się na katodzie stopionego glinu, który następnie osadza się na dnie wanny. Z kolei na grafitowej anodzie wyodrębnia się tlen, który reagując z grafitem, powoduje powstawanie mieszanki tlenku i dwutlenku węgla. W celu podtrzymania w roztopionej kąpieli zawartości tlenku glinu na poziomie 2-6%, do wanień dodawany jest tlenek glinu, którego dozowanie jest sterowane automatycznie.

Aluminium, pomimo tego, że znane jest na świecie od prawie 2000 lat, wciąż jest uważane za jeden z najbardziej innowacyjnych materiałów. Wykorzystuje się je niemal w każdej dziedzinie przemysłu, począwszy od branży energetycznej, poprzez spożywcza, chemiczną (wymenniki ciepła i rurociągi), transportową, aż po zastosowanie w sporcie i rekreacji czy jubilerstwie. Można wręcz pokusić się o stwierdzenie, że aluminium stało się materiałem budowlanym współczesnego świata.

5. Rodzaje stopów aluminium

Aluminium łatwo łączy się z innymi pierwiastkami. Ponieważ czyste aluminium jest stosunkowo miękkie, w celu polepszenia jego wytrzymałości, powstały liczne stopy o zróżnicowanych właściwościach, które zawierają różne dodatki innych pierwiastków. W Tabeli 2 przedstawiono oznaczenia stopów aluminium zgodne z normami polskimi i zagranicznymi oraz podstawowe skład

Tabela 2. Nazwy i Normy stopów aluminium

Stare PN	PN/EN	Werkstoff	DIN	ASTM	GOST	Inne
PA6	2017A	3.1325	AlCuMg1	2017	1110/D1	–
PA7	2024	3.1354	AlCu4Mg1/ AlCu4Mg2	2024	1160/D16	–
PA13	5083	3.3547	AlMg4,5Mn	5083	(AMg4,5)	–
PA11	5754	3.3535	AlMg3	5754	–	–
PA45	6061	3.3214	6AlMg1SiCu/ AlMg1SiCuCr	6061	AD33	–
PA4	6082	3.2315	AlSi1	6082	AD35	–
PA9	7075	3.4365	AlZnMgCu1,5	7075	–(~W95)	

Źródło: [13]

Kody stopu aluminium to czterocyfrowe liczby, które kategoryzują wszystkie stopy i są uniwersalne [9]:

- czyste aluminium – seria 1000
- dodatek miedzi – seria 2000
- dodatek manganu – seria 3000
- dodatek krzemu – seria 4000
- dodatek magnezu – seria 5000
- dodatek magnezu + krzemu – seria 6000
- dodatek cynku – seria 7000
- inne pierwiastki stopowe – seria 8000

- 1000 serii: Seria ta składa się z aluminium o czystości 99% lub wyższej, charakteryzującego się wyjątkową odpornością na korozję i dobrą przewodnością cieplną.

- 2000 serii: Stopy te są w większości mieszane z miedzią, która zapewnia im dużą wytrzymałość i doskonałą obrabialność. Stąd też znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle lotniczym.

- 3000 serii: Są to stopy aluminium i manganu, znane ze swojej umiarkowanej wytrzymałości, dobrej obróbki i odporności na korozję. W związku z tym są powszechnie stosowane jako materiały opakowaniowe.

- 4000 serii: Do tych stopów dodaje się krzem, dzięki czemu uzyskują one lepszą odporność na zużycie, co sprawia, że nadają się do produkcji części samochodowych, np. drutu spawalniczego itp.

- 5000 serii: Są to stopy na bazie magnezu, znane ze swojej dobrej spawalności i odporności na korozję, w związku z czym

często spotykane są w zastosowaniach w środowisku morskim.

- 6000 serii: Zawartość magnezu i krzemu przyczynia się do osiągnięcia rozsądnej równowagi pomiędzy wytrzymałością i odpornością na korozję, dlatego są szeroko stosowane w zastosowaniach konstrukcyjnych.

- 7000 serii: Cynk jest tutaj podstawowym pierwiastkiem stopowym, ponieważ zapewnia dużą wytrzymałość, co jest szczególnie przydatne w przypadku elementów poddawanych dużym obciążeniom, np. w podwoziach samolotów itp.

- Seria 8000 — różne, Tego rodzaju inne rodzaje stopów aluminium można wykorzystywać w szczególnych zastosowaniach, np. przy produkcji opakowań lub przewodów, gdzie konieczne jest uzyskanie szczególnych właściwości.

- A1, inaczej Al 99,5, czyli czyste aluminium;

- PA2 i PA 11 – stopy aluminium z magnezem;

- PA13 – stop aluminium z magnezem i manganem;

- PA38, PA4 – stopy aluminium z magnezem i krzemem.

- PA6 – stop aluminium z magnezem i miedzią

- PA9 – stop aluminium z cynkiem, magnezem i miedzią

6. Recykling aluminium

Aluminium to materiał permanentny, którego recykling można prowadzić w nieskończoność bez utraty jakości, a około 75% wyprodukowanego kiedykolwiek aluminium nadal pozostaje w obiegu gospodarczym [14].

Sam proces recyklingu odgrywa obecnie coraz istotniejszą rolę w pozyskiwaniu surowców do wytwarzania wysokiej jakości produktów. Wynika to z łatwości pozyskiwania surowca oraz mniejszego zużycia energii do jego przerobu.

Firmy z branży aluminiowej, na przykład polska firma Extral [15], chętnie sięgają po złom aluminiowy, który po przetopieniu może zostać ponownie wykorzystany do wytworzenia profili aluminiowych lub innych wyrobów. Dodając do tego cyfrowy system nadzoru produkcji, firma Extral ogranicza zużycie energii, gazu, wody oraz ścieków. Produkcja aluminium w tej firmie prowadzi do nowej jakości przerobu złomu, wpisuje się w działania proekologiczne oraz ochronę środowiska naturalnego [16]. Odlewnia aluminium Firmy Extral działa na poziomie przemysłu 5.0.

Czołowy producent aluminium na świecie, norweski Norsk Hydro, który wykonał pierwszą na świecie partię aluminium z użyciem zielonego wodoru. To krok w kierunku dekarbonizacji produkcji tego metalu [17].

Grupa Kapitałowa Grupy Kęty S.A. wdrożyła wspólne standardy i normy postępowania dla wszystkich spółek Grupy w dążeniu do uzyskania neutralności klimatycznej w perspektywie 2050 roku [18].

Niewiele metali posiada żywotność porównywalną z cyklem życia aluminium. Aluminium jest bowiem odporne na korozję i może być poddawane recyklingowi na okrągło przy wykorzystaniu jedynie ułamka energii potrzebnej do produkcji pierwotnego metalu. To sprawia, że aluminium jest doskonałym materiałem budowlanym potrafiącym przybierać różne kształty i stawiać czoła potrzebom i wyzwaniom w obecnej rzeczywistości [19].

Przemysł aluminiowy (jak zresztą cała gospodarka światowa) znajduje się obecnie pod presją, aby zmniejszyć swój wpływ na środowisko poprzez promowanie zrównoważonego rozwoju i recyklingu. Międzynarodowa Agencja Energetyczna spodziewa się, że udział wtórnej produkcji

aluminium osiągnie 42 procent do 2030 roku. Ta zmiana ma kluczowe znaczenie dla osiągnięcia celów w zakresie ograniczenia szkodliwej emisji, a także promowania gospodarki o obiegu zamkniętym [20].

Australijski rząd ma zainwestować 2 mld USD w przemysł „zielonego aluminium” [21]. Produkcja zielonego aluminium ma uzyskać rządowe wsparcie. Australijskie huty aluminium będą sukcesywnie przełączać się na odnawialną energię elektryczną przed 2036 rokiem. W ramach tej inicjatywy zakłady będą kwalifikowane do pozyskania wsparcia produkcji w okresie 10 lat. Na ten cel australijski rząd przeznaczył rekordowe 2 miliardy dolarów. Celem udzielanych kredytów będzie zapewnienie lokalnym hutom aluminium środków do inwestowania, a dzięki temu nastąpi także zabezpieczenie australijskich miejsc pracy i wzmocnienie przemysłu aluminiowego w tym kraju.

Zgodnie z inicjatywą Aluminium Stewardship Initiative przemysł aluminiowy musi zmniejszyć swoje emisje o ponad 95% do 2050 r., aby osiągnąć cel 1,5°C [22]. Aby osiągnąć ten ambitny cel, normą musi stać się to, co obecnie nazywa się aluminium niskoemisyjnym lub „zielonym”. Aby to osiągnąć, planowane są sposoby na poprawę produkcji aluminium niskoemisyjnego, albo poprzez recykling, albo poprzez pozyskiwanie energii zużywanej przez zakłady ze źródeł niskoemisyjnych. Tego typu działania wynikają z coraz większego popytu na aluminium o zerowej emisji netto i zerowej emisji dwutlenku węgla. Główni producenci aluminium, tacy jak Emirates Global Aluminium, koncentrują się na zaspokojeniu rosnącego globalnego popytu na aluminium niskoemisyjne lub dążą do tego celu w przewidywalnej przyszłości [23].

7. Rynek aluminium

Aluminium należy obecnie do najczęściej wykorzystywanych metali w przemyśle, w takich branżach jak: motoryzacja, budownictwo, branża opakowaniowa, maszynowa czy produkcja dóbr powszechnego użytku. Właściwości aluminium powodują, że jest to idealny materiał dla transformacji energetycznej. Od koniunktury w tych gałęziach przemysłu, w których jest wykorzystywane, w dużej mierze zależy sytuacja na rynku aluminium. W ostatnich kilku latach, pomimo zawirowań, globalny rynek

aluminium utrzymuje jak na razie trend wzrostowy.

W zeszłym roku światowa produkcja aluminium pierwotnego wyniosła 67 243 tys. ton i była o niecałe 3% wyższa niż rok wcześniej (65 325 tys. ton) [24]. Najlepiej wzrost tego sektora rynku widać jednak w nieco dłuższej perspektywie: w 2000 r. wyprodukowano 24 657 tys. t tego surowca, a w 2010 r. już o ponad 70% więcej, tj. 42 353 tys. t. Przez kolejną dekadę produkcja aluminium pierwotnego wzrosła o ponad 50%. W obecnym stuleciu tylko dwukrotnie (w 2009 i 2019 r.) nastąpił spadek rocznej produkcji aluminium. Motorem napędowym trendu wzrostowego produkcji aluminium jest branża motoryzacyjna i energetyczna. Rosnące inwestycje w rozwój elektromobilności oraz dążenie do ograniczenia zużycia spalania poprzez obniżenie masy samochodów wymusza na producentach stosowanie coraz lżejszych materiałów. W szczególności bardzo dobrze do tego celu nadaje się aluminium. Z kolei transformacja energetyczna napędza inwestycje w infrastrukturę związaną z odnawialnymi źródłami energii, co także przekłada się bezpośrednio na wzrost popytu na aluminium.

Według szacunków Statista [25] globalne zużycie aluminium będzie rosło do końca obecnej dekady średnio każdego roku o 2,6%. W efekcie rocznie świat będzie zużywać ok. 80 mln t aluminium. Podobnie jak w przypadku wielu innych surowców Chiny są obecnie światowym liderem w produkcji jak i zużyciu aluminium. W 2021 r. w Chinach wyprodukowano aż 38,8 mln t aluminium pierwotnego. To jest prawie 58% światowej produkcji tego metalu.

Europejskie huty aluminium stosunkowo dobrze poradziły sobie z kryzysem

w czasie pandemii COVID-19, mimo że koszty zmniejszenia czy nawet czasowego wstrzymania produkcji aluminium były ogromne. Jednak bardziej dotkliwy okazał się kryzys energetyczny i gwałtowny wzrost cen. Do tego doszedł spadek popytu ze strony branży motoryzacyjnej, który był spowodowany globalnym niedoborem półprzewodników i koniecznością wstrzymywania produkcji. Tylko od października 2021 r. do marca 2022 r. europejski przemysł aluminiowy ograniczył swoje zdolności produkcyjne o ok. 850 tys. t. Od 2008 r. Unia Europejska ograniczyła swoje zdolności produkcyjne aluminium aż o 30% i to pomimo rosnącego stale popytu na aluminium w Europie i na świecie.

Od połowy 2021 r., wszystkie miesięczne wielkości produkcji aluminium i wyrobów z aluminium w Europie były niższe niż rok wcześniej. Od lutego 2022 r., czyli od inwazji Rosji na Ukrainę, nastąpił poważny, dwucyfrowy spadek produkcji. Huty zlokalizowane w Europie wytworzyły o 14% mniej aluminium.

Rok 2021 był bardzo dobrym okresem dla polskiego przemysłu aluminiowego. Po spadkach w 2020 r. (które były następstwem wybuchu pandemii) w Polsce zużycie jawne aluminium ogółem, jak i w większości kategorii było nie tylko sporo wyższe niż rok wcześniej, ale osiągnęło wręcz rekordowe wyniki (poza zużyciem aluminium nieobrobionego plastycznie) (Tabela 3,4). Największym ilościowo odbiorcą aluminium na polskim rynku jest branża motoryzacyjna. Należy podkreślić, że polska branża producentów części i podzespołów dla przemysłu motoryzacyjnego należy do największych w Europie.

Tabela 3. Produkcja aluminium i wyrobów z aluminium oraz stopów aluminium w Polsce (tys. t)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
aluminium nieobrobione plastycznie	7,6	8,3	8,3	11,3	13,5	17,3	15,6
plaskowniki, walcówka, pręty, kształtowniki	168,7	210,6	257,4	282,6	297,6	317,1	361,9
drut	1,4	1,5	1,5	1,2	1,3	1,5	1,6
plyty, blachy, taśmy	115,0	130,7	162,7	179,7	186,9	184,5	197,2
stopy aluminium nieobrobione plastycznie	435,2	463,9	477,6	528,6	485,8	382,5	490,6

źródło: GUS

Tabela 4. Zużycie jawne aluminium i wyrobów z aluminium w Polsce (tys. t)

	2017	2018	2019	2020	2021
aluminium ogółem	1199	1296	1289	1232	1416
aluminium nieobrobione plastycznie*	522	527	499	422	465
wyroby płaskie	345	389	396	416	451
wyroby długie	226	262	269	274	371

* Z wyłączeniem aluminium niestopowego oraz aluminium w postaci kęsisk płaskich i kęsów

Źródło: [26]

Porównując dane Polskiego Stowarzyszenia Aluminium dotyczące zużycia jawnego aluminium z danymi GUS-u, które z kolei dotyczą produkcji aluminium i wyrobów gotowych, widać między nimi spore dysproporcje. Krajowe zużycie aluminium odlewniczego, wyrobów długich czy też płaskich znacząco przewyższa produkcję tych elementów na polskim rynku. Oznacza to, że Polska jest zdecydowanym importem netto aluminium i wyrobów aluminiowych.

8. Produkcja aluminium i jego stopów w Polsce

Historia hut aluminium w Polsce ma swoje korzenie w XIX wieku, kiedy to rozpoczęto wydobywanie rud metali na terenach Polski. Początkowo koncentrowano się głównie na produkcji stali, ale z czasem doceniono potencjał aluminium jako lekkiego i wytrzymałego materiału.

1. Huta Aluminium Konin - W 1966 roku rozpoczęła działalność jako przedsiębiorstwo państwowe, W 2009 roku zakończono produkcję aluminium z powodu wysokich cen energii elektrycznej. W 2020 roku huta została sprzedana szwedzkiej firmie Gränges AB [27].

2. Grupa Kęty - Zakład produkcyjny Grupy Kęty, w którym sektor przetwórstwa aluminium zaczął się rozwijać. Firma rozbudowywała się, powstawały nowe zakłady produkcyjne i spółki handlowe. Grupa Kapitałowa Alumetal - jest największym w Polsce i regionie Europy Środkowo-Wschodniej producentem wtórnych aluminiowych stopów odlewniczych. Według szacunków Zarządu udział GK w europejskim rynku wynosi ok. 5%, co daje 4 miejsce w klasyfikacji największych producentów aluminium. Stopy odlewnicze są wytwarzane w trzech zakładach: w Nowej Soli, Kętach i Gorzycach, których moce produkcyjne

sięgają ok. 165 tys. ton. Alumetal, Alumetal Gorzyce Sp. z o.o – produkcja aluminium stopów odlewniczych, instalacja do wtórnego wytopu i produkcji aluminium stopów odlewniczych z grupy AlSiCuMg z dodatkami stopowymi: Mn, Ti, Zr, V oraz z grupy AlSiMg. Alumetal sprzedaje swoje produkty odbiorcom głównie z branży motoryzacyjnej (w ponad 90%) do produkcji tłoków i głowic [28].

3. Eko-Świat – Firma powstała na fali przemian społeczno gospodarczych w Polsce [4]. Jednym z przełomowych momentów w historii firmy było uruchomienie odlewni stopów odlewniczych w Kłomnicach, która dostarczała swoje wyroby do hut krajowych i zagranicznych. Odlewnia Eko-Świat, jako pierwsza w branży producentów stopów uzyskała certyfikat ISO 9002 [29].

4. Extral Aluminium - Wlewki aluminium REMELT to marka produktów firmy Extral o wysokich parametrach jakościowych produkowanych z surowców pochodzących z recyklingu i wytwarzanych przy ponadstandardowym udziale złomu, bo aż ok. 90%. Wlewki Remelt wytwarzane są w technologii niskoemisyjnej LCO₂ET (Low CO₂ Emission Technology) z wykorzystaniem modeli matematycznych, dzięki czemu realnie zmniejszane jest zużycie energii w fazie produkcji i tym samym zmniejszanie emisji CO₂, co korzystnie wpływa na ochronę środowiska naturalnego. Parametry produkowanych wlewów: 7" , 8" , 10" [15].

5. Nicromet – produkuje gąski aluminium i ciekłe aluminium, produkcja aluminium jest prowadzona z zastosowaniem złomu [30].

6. Odlewnia Gawrych - produkcja aluminium ze złomu [31].

7. Magna Casting Poland Sp. z o. o. - produkcja odlewów aluminium i jego stopów. Surowcem do produkcji są gotowe do topienia gąski stopów aluminium o odpowiedniej czystości i składzie chemicznym. Zdolność produkcyjna instalacji wynosi 246 Mg wytopu na dobę [32].

9. Aluminium w Polsce – stan obecny, perspektywy

Polskie Stowarzyszenie Aluminium (PSA) [26] skupia prawie całą krajową branżę aluminium, zarówno producentów wyrobów płaskich, długich, aluminium odlewniczego oraz pozostałego asortymentu aluminiowego. Stowarzyszenie gromadzi także firmy i inne podmioty reprezentujące szeroko rozumiane otoczenie biznesowe tej branży (np. firmy handlowe, dostawców produktów i usług dla branży aluminium, odbiorców końcowych, środowisko naukowo-akademickie etc.). Utworzenie silnej organizacji branżowej to kolejny etap rozwoju polskiego sektora aluminium, który już dziś jest jedną z najbardziej dynamicznych gałęzi przemysłu. Członkami założycielami Polskiego Stowarzyszenia Aluminium są: Aliplast Extrusion; Extral; Final; Gränges Konin; Grupa Kęty i Hydro Extrusion Poland.

Przetwórstwo aluminium jest najszybciej rozwijającą się gałęzią branży metalowej w Polsce. Roczne jawne zużycie aluminium w naszym kraju przekroczyło już 930 tys. ton. Wszystko wskazuje na to, że będzie dalej wzrastało. Świadczą o tym m.in. duże projekty inwestycyjne. Jednak Polska wciąż jest poniżej średniej europejskiej pod względem zużycia aluminium na głowę mieszkańca. Dlatego nie ma obawy na przegrzanie rynku [26]. Od 2024 roku coraz większa liczba producentów oferuje swoim klientom wyroby jakości „premium”, co jest możliwe dzięki wdrażaniu innowacyjnych technologii. Mowa tu między innymi o nowoczesnych prasach do wyciskania profili aluminiowych 7- oraz 10-calowych, które umożliwiają firmom wejście w nowe branże oraz oferowanie wyrobów o najwyższych parametrach jakościowych.

Najlepszym przykładem dynamicznego rozwoju tej branży jest firma Extral. Firma wdraża innowacyjne technologie pozwalające na ciągłą regulację i optymalizację procesu wyciskania oraz inwestuje w produkcję stopów aluminium typu 6000. Tworzy zautomatyzowane stanowiska do obróbki profili aluminiowych wyposażone w specjalistyczne urządzenia pomiarowe, realizuje najbardziej ambitne przedsięwzięcia. Więcej informacji na temat wyrobów marki tej firmy można znaleźć na stronie <https://extral.com/> [16].

10. Aluminium na świecie

W grudniu 2024 r. świat wyprodukował 6,24 mln ton pierwotnych sztabek aluminiowych, co stanowi wzrost o 3,02% w porównaniu do poprzedniego roku. Średnia dzienna produkcja aluminium w grudniu 2024 r. wynosiła 201 200 ton [33]. Oczekuje się, że światowy rynek aluminium wzrośnie z 249,83 mld USD w 2024 r. do 403,29 mld USD do 2032 r. Przewiduje się, że popyt na aluminium będzie rósł w tempie 4–5% CAGR od 2024 r. do 2030 r. Popyt na aluminium wzrośnie przede wszystkim w segmentach lotnictwa, opakowań żywności i elektroniki. Popyt na aluminium rośnie, podczas gdy podaż staje się coraz bardziej ograniczona, co prawdopodobnie doprowadzi do wzrostu cen na aluminium, na całym świecie. Sektor aluminium będzie musiał produkować więcej, aby sprostać wzrostowi popytu we wszystkich sektorach przemysłu. Podczas gdy popyt na aluminium wzrasta, kapitałochłonna natura wytopu tego metalu powoduje, że wiele firm waha się przed agresywnymi inwestycjami.

W ostatnich latach wysokie ceny energii spowodowały, że europejscy producenci aluminium od kilku lat ograniczają produkcję, co między innymi jest związane z zakłóceniami w dostawach energii wynikającymi z rosyjskiej inwazji na Ukrainę [22]. Według analizy Międzynarodowego Instytutu Aluminium, europejska produkcja aluminium spadła o 3,95% w 2023 r. do 6,73 mln ton. Produkcja aluminium pierwotnego wymaga ogromnej ilości energii, a stopiony metal musi być przechowywany w temperaturze 700 stopni Celsjusza przez dłuższy czas. W związku z tym, że ceny energii prawdopodobnie nie spadną w najbliższym czasie, przewiduje się jednak zakłócenia w produkcji aluminium w Europie.

JP Morgan wskazuje na globalny deficyt aluminium przekraczający 600 000 ton metrycznych w 2025 r. Z kolei Reuters twierdzi, że analitycy spodziewają się deficytu rynkowego wynoszącego 800 000 ton w 2025 r. JP Morgan przewiduje, że ceny aluminium wzrosną do 2850 USD/t w 4 kwartale 2025 r. Customaluminiumwa.com.au twierdzi, że ceny prawdopodobnie wzrosną na całym świecie z powodu znacznego niedoboru tego metalu. Oczekuje się, że firmy zainwestują w sektor aluminium w celu zwiększenia możliwości produkcyjnych oraz działań na rzecz zrównoważonego rozwoju. Przewiduje się, że

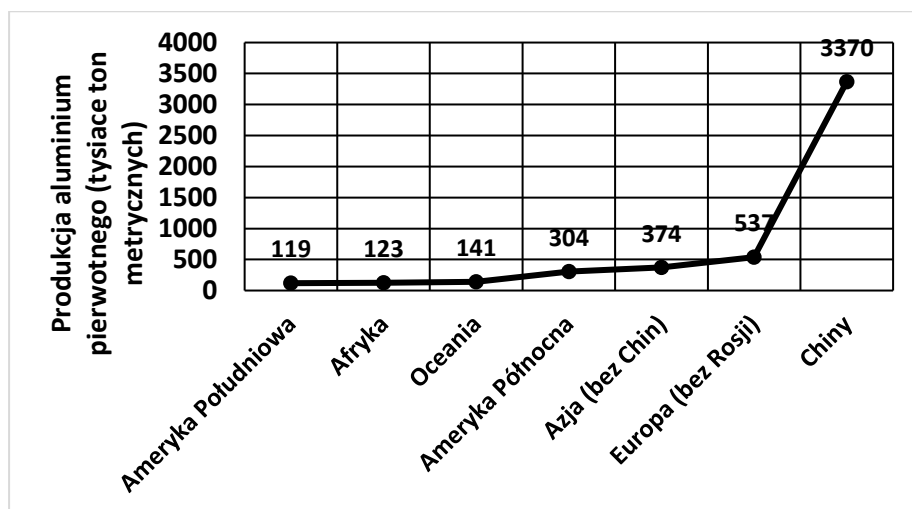
globalny rynek aluminium osiągnie wartość 249,29 mln USD do 2025 r. Oczekuje się, że popyt wzrośnie w segmentach lotnictwa, opakowań żywności i elektroniki. Jednak analitycy przewidują deficyt rynkowy aluminium [34]. JP Morgan wskazuje, że globalny deficyt aluminium przekroczy 600 000 ton w 2025 r. W związku z tym oczekuje się, że niedobór aluminium podniesie ceny w 2025r. [35].

Średnia cena aluminium gotówkowego LME wzrosła o 4,9% w 2024 roku i ma wzrosnąć o kolejne 6,3% do 2573,50 USD za tonę metryczną w 2025 r., (dane zgodne z medianą prognozy 33 analityków uczestniczących w styczniowym sondażu 2025r.). Oczekuje się, że deficyt produkcji wzrośnie do 365 000 ton w 2026 r., a średnia cena wzrośnie do 2626 USD za tonę. Największym ograniczeniem podaży strukturalnej jest pułap mocy produkcyjnych w Chinach [34]. Krajowa produkcja aluminium w Chinach osiągnęła 43,9 miliona ton na koniec 2024 roku, zbliżając się do limitu 45,0 miliona (Rys.6). Jeśli największemu producentowi na świecie zabrakło potencjału ekspansji, nie jest jasne, w jaki sposób reszta świata wypełni lukę niedoboru tego metalu.

Według Międzynarodowego Instytutu Aluminium [36] przewidywany jest 40-procentowy wzrost globalnego popytu na aluminium do 2030 r., co będzie wymagać dodatkowych 33 mln ton zdolności produkcyjnych (Rys.6). Oczekuje się, że ten wzrost popytu będzie napędzany przez przejście sektora motoryzacyjnego na lekkie materiały, które zwiększają efektywność paliwową i zmniejszają emisje [37]. Wielkość rynku tlenku glinu o wysokiej czystości jest oceniana na poziomie 4,29 mld USD w 2025 r., a przewidywany wzrost przekroczy 20,56 mld USD do 2037 r. Odzwierciedla to CAGR w okresie prognozy wynoszącym ponad 13,6%, napędzany przez rosnące zapotrzebowanie na elektronikę i aplikacje LED. Oczekuje się, że globalna produkcja aluminium stanie przed wyzwaniem związanym z zakłóceniami w łańcuchach dostaw i wahaniami cen surowców. Jednak ogólna perspektywa pozostaje pozytywna, a znaczące inwestycje w inicjatywy technologiczne zrównoważonego rozwoju mają napędzać wzrost w sektorze aluminium do 2025 r. i w późniejszych latach. Oczekuje się, że innowacje w technologiach produkcji aluminium poprawią wydajność produkcji i

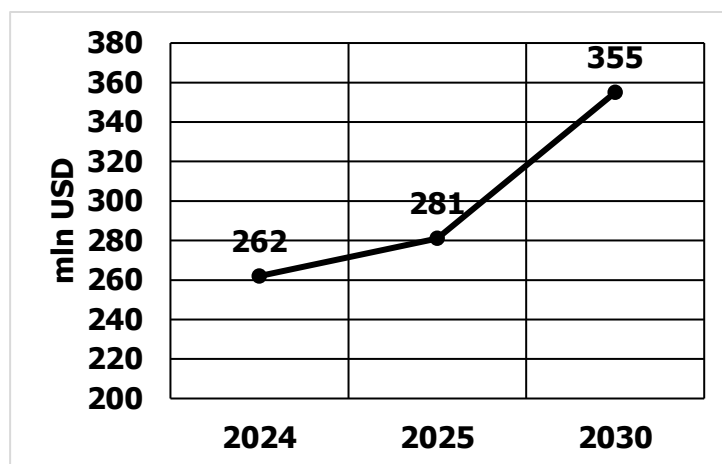
obniżą koszty. Firmy coraz częściej stosują automatyzację i cyfryzację w celu usprawnienia działalności. Na przykład Hydro zamierza wyprodukować pierwsze pilotażowe objętości bezemisyjnego aluminium przy użyciu technologii HalZero do 2025 roku [19]. To przejście na zrównoważone praktyki ma kluczowe znaczenie dla zaspokojenia przyszłych potrzeb rynku. Sektor motoryzacyjny jest znaczącym motorem popytu na aluminium, a producenci coraz częściej wykorzystują aluminium do redukcji masy pojazdów i poprawy efektywności paliwowej. Według Międzynarodowej Administracji

Handlu, krajowa produkcja motoryzacyjna w Chinach ma osiągnąć 35 milionów pojazdów do 2025 roku, co znacząco wpłynie na zużycie aluminium w produkcji samochodów [38]. Oczekuje się, że inwestycje w sektorze aluminium wzrosną, ponieważ firmy dążą do zwiększenia zdolności produkcyjnych i inicjatyw na rzecz zrównoważonego rozwoju. Przewiduje się, że globalny rynek aluminium osiągnie wartość 249.29 mln USD do 2025 r., rosnąc przy CAGR o 6,4% w okresie prognozy (Rys.7). Wzrost ten prawdopodobnie przyciągnie więcej inwestycji w technologię i infrastrukturę.



Rys.6. Produkcja aluminium pierwotnego w lutym 2025 r.

Źródło [39]



Rys.7. Globalna wielkość rynku aluminium

Źródło [40]

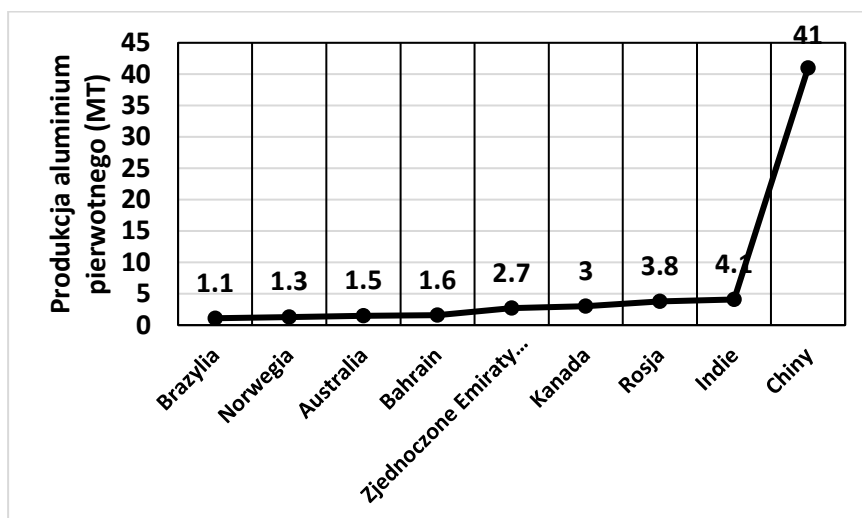
Globalna produkcja aluminium pierwotnego w styczniu 2025 r. wyniosła 6,252 mln ton, co stanowi wzrost z 6,066 mln ton, jak wynika z danych International Aluminium Institute (IAI) [41]. Średnia dzienna produkcja aluminium na świecie wynosiła 201700 ton,

utrzymując stabilność w kolejnych miesiącach 2025r. W Chinach szacowana produkcja aluminium pierwotnego w styczniu wyniosła 3,74 mln ton, nieznacznie więcej niż skorygowana liczba 3,734 mln ton w grudniu 2024 r. Produkcja w innych regionach Azji

wyniosła 411 000 ton, wzrastając z 409 000 ton w poprzednim okresie.

Tylko cztery kraje produkują ponad milion ton metrycznych aluminium rocznie oprócz Chin. Zjednoczone Emiraty Arabskie produkują 2,8 miliona ton metrycznych, Australia produkuje 1,4 miliona ton metrycznych, Norwegia produkuje 1,2 miliona ton metrycznych, a Bahrajn produkuje nieco ponad 1 milion ton metrycznych (Rys.8). Islandia jest prawie na poziomie 1 miliona ton metrycznych, produkując 924 tysiące ton metrycznych rocznie.

Krajem, który produkuje najmniej aluminium jest Japonia. Produkuje tylko 1000 ton metrycznych rocznie. Jest to znacznie mniej niż w jakimkolwiek innym kraju. Następnymi najmniejszymi producentami są Wielka Brytania z 27 tysiącami ton metrycznych aluminium produkowanymi rocznie i Czarnogóra z 30 tysiącami ton metrycznych rocznie. Wliczając te trzy kraje, jest łącznie dziewięć krajów produkujących mniej niż 100 tysięcy ton metrycznych aluminium, w tym Ghana, Azerbejdżan, Kamerun, Słowenia, Turcja i Tadżykistan.



Rys.8. Produkcja aluminium według kraju 2023

Źródło [42]

Oczekuje się, że wielkość rynku aluminium będzie miała silny wzrost w ciągu najbliższych kilku lat. W 2029 r. wzrośnie do 251,35 mld USD przy złożonej rocznej stopie wzrostu (CAGR) wynoszącej 6,8% [43].

Wzrost w okresie prognozy można przypisać postępowi w zakresie recyklingu aluminium, zielonym inicjatywom w produkcji, wdrażaniu pojazdów elektrycznych, budowie i rozwoju infrastruktury, trendom przemysłu opakowaniowego, zapotrzebowaniu przemysłu lotniczego. Główne trendy w okresie prognozy obejmują aluminium w drukowaniu 3D, innowacje stopów aluminium, urbanizację i budownictwo, projekty dotyczące energii odnawialnej, przejście na opakowania aluminiowe.

Do kluczowych firm o zasięgu światowym na rynku aluminium i jego stopów należą: Alcoa Corporation; Rio Tinto, RUSAL; Norsk Hydro A.S.A.; Dubai Aluminum Company Limited; Aluminum Bahrain B.S.C.; Century Aluminum Company; Vedanta Ltd.;

China Aluminum Corporation; Sierra Aluminum H.P; East Hope Group; Emirates Aluminum [44].

Duże firmy działające na rynku aluminium opracowują nowe produkty, takie jak płyty chłodzące, aby uzyskać przewagę konkurencyjną na rynku. Płyty chłodzące to komponenty stosowane w systemach zarządzania termicznego do rozpraszania ciepła wytwarzanego przez urządzenia elektroniczne lub zasilające. W październiku 2023 roku Alloy Enterprises Inc. amerykańska firma produkująca aluminium wprowadziła aluminiowe komponenty do płyt chłodzących. Posiadają wyjątkowe właściwości materiałowe, w tym wysoki stosunek wytrzymałości do masy, doskonałą przewodność cieplną, możliwość złożonego rozkładu kanałów, zintegrowane chłodzenie. Części te są wykonane tak, aby były bardziej trwałe, lepiej działały i nie wymagały skomplikowanego montażu

Globalny popyt na aluminium wzrośnie o prawie 40% do 2030 r., zgodnie z niedawnym raportem sporządzonym przez analityków biznesowych CRU International w imieniu International Aluminium Institute (IAI). [45]. Sektor aluminium będzie musiał wyprodukować dodatkowe 33,3 tony metryczne (Mt), aby sprostać wzrostowi popytu we wszystkich sektorach przemysłu – z 86,2 Mt w 2020 r. do 119,5 Mt w 2030 r. Sektory transportu, budownictwa, opakowań i energii elektrycznej będą napędzać popyt i będą odpowiadać za 75% całkowitego zapotrzebowania na aluminium.

11. Podsumowanie

1. Bauxite jest główną rudą do produkcji aluminium (około 90%); Australia jest największym producentem boksytów na rynku globalnym z 35% udziałem.
2. Chiny są głównym producentem jak również konsumentem aluminium pierwotnego; Europa i Ameryka Północna są również kluczowymi regionami konsumującymi pierwotne aluminium.
3. Zapotrzebowanie na aluminium zależy od stanu wielu gałęzi przemysłu, w tym przemysłu lotniczego, motoryzacyjnego, budownictwa itp.
4. Ponieważ przewiduje się, że rynki niższego szczebla będą zwiększać zużycie aluminium, jak również ze względu na zapotrzebowanie już rozwiniętych rynków konsumujących aluminium, istnieją oczekiwania silnego wzrostu popytu na aluminium na świecie, co będzie związane ze wzrostem cen tego metalu.
5. Istotnym źródłem aluminium jest rynek aluminium wtórnego pozyskiwanego drogą recyklingu.

Literatura

- [1]. Aluminium w obiegu, 2024, <https://www.stenarecycling.com/pl/aktualnoci-publicacje/informacje-inspiracje/artykuly-i-ebooki/aluminium-w-obiegu/>
- [2]. Circular aluminium action plan, 2022, EUROPEAN ALUMINIUM | A strategy for achieving aluminium's full potential for circular economy by 2030, [https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/08/european-](https://european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2022/08/european-aluminium-circular-aluminium-action-plan.pdf)
- aluminium-circular-aluminium-action-plan.pdf
- [3]. Historia rozwoju aluminium i stopów aluminium, 2024, <https://aludepot.com/pl/blog/the-development-history-of-aluminum-and-aluminum-alloys/>
- [4]. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Skorupa_ziemiska#:~:text=Sk%C5%82ad%C3%B3r%20chemiczny%20skorupy%20ziemskiej%20\(wagowo\)%20*%20tlen,%20wod%C3%B3r%20\(H\)%200%2C14%20*%20pozosta%C5%82e%201%2C5%](https://pl.wikipedia.org/wiki/Skorupa_ziemiska#:~:text=Sk%C5%82ad%C3%B3r%20chemiczny%20skorupy%20ziemskiej%20(wagowo)%20*%20tlen,%20wod%C3%B3r%20(H)%200%2C14%20*%20pozosta%C5%82e%201%2C5%)
- [5]. Kossakowski, P. 2013, Aluminium – materiał ekologiczny, Przegląd budowlany, Konstrukcje – Elementy – Materiały, 10/2013, 36-41, XXI Ogólnopolska Interdyscyplinarna Konferencja Naukowo-Techniczna „Ekologia a Budownictwo”, 10–12 października 2013 r. w Bielsku-Białej,
- [6]. Fenz, 2025, Przezroczyste aluminium – przyszłość nadeszła, <https://www.fenz.pl/blog/przezroczyste-aluminium---przyszlosc-nadeszla>
- [7]. <https://www.dlaucznia.pl/lekcja/chemia,budowa-atomu-uklad-okresowy-pierwiastkow-chemicznych,budowa-ukladu-okresowego-bloki-konfiguracyjne>
- [8]. GroMar Sp. z o. o. na podstawie Mizerski W., *Tablice chemiczne*, Wydawnictwo Adamantan, Warszawa 2008, licencja: CC BY-SA 3.0.
- [9]. <https://odrabiamy.pl/chemia/ksiazka-14311/strona-1/zadanie-1441039>
- [10]. Hydro Extrusion Poland, 2022, Fakty o aluminium – czy znasz je wszystkie?, <https://tower.prowly.com/193517-fakty-o-aluminium-czy-znasz-je-wszystkie>
- [11]. A Brief History of Aluminium, United aluminium, 2024, <https://unitedaluminum.com/a-brief-history-of-aluminum/>
- [12]. PPC, 2018, <https://www.products.pcc.eu/pl/blog/hutnictwo-aluminium-sposob-otrzymuje-sie-glin-o-wysokiej-czystosci/>
- [13]. EBMiA.pl, 2019, <https://www.ebmia.pl/wiedza/kalkulatory/materiały/rodzaje-aluminium/>
- [14]. Rekopół, 2023, Aluminium. Jakich błędów nie popełniać przy segregacji? Wywiad z Jackiem Wodzisławskim z Fundacji Recal,

- <https://rekopol.pl/newsletter/aluminium-jakich-bledow-nie-popelnia-przy-segregacji-wywiad-z-jackiem-wodzislawskim-z-fundacji-recal/>
- [15]. Extral Aluminium, 2023, https://extral.com/pl/wlewki-aluminiowe#/_e_wlewki-aluminiowe
- [16]. Portal Przemysłowy, 2024, Branża aluminium – najważniejsze trendy w 2024 roku
- [17]. Malinowski, D. 2023, Pierwsze takie aluminium w historii, 2025, <https://www.wnp.pl/przemysl/pierwsze-takie-aluminium-w-historii,721660.html>
- [18]. Grupa Kęty, 2023, <https://grupakety.com/zrownowazony-rozwoj/srodowisko/polityka-srodowiskowa/>
- [19]. Hydro, 2024, Cykl życia aluminium <https://www.hydro.com/pl/global/aluminium/o-aluminium/cykl-zycia-aluminium>
- [20]. Biel, T. Magma 2025, Discover key trends shaping the aluminum industry in 2025. <https://magmatranslation.com/stats/en/global-aluminum-market-trends-2025>
- [21]. Green Car Congress, 2025, Australian government investing \$2B in green aluminum industry, <https://www.greencarcongress.com/2025/01/20250120-oz.html>
- [22]. Matthiasson, K. 2024, DTE Aluminum Analysis Pioneer Karl Ágúst Matthiasson Predicts Trends for 2025, <https://wgntv.com/business/press-releases/ein-presswire/748992717/dte-aluminum-analysis-pioneer-karl-agust-matthiasson-predicts-trends-for-2025/>
- [23]. EGA, 2025, <https://www.ega.ae/en/sustainability>
- [24]. Global Aluminium Metals Market Overview, March 2023, https://www.marketresearchfuture.com/reports/aluminium-metals-market-3563?utm_term=&utm_campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=2893753364&hsa_cam=20373674291&hsa_grp=150985931723&hsa_ad=665909881832&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-2089395940944&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad
- [25]. Statista, 2023, Aluminum Industry Worldwide - Statistics & Facts, Dec 18, 2023, <https://www.statista.com/topics/2072/aluminium/#topicOverview>
- [26]. PSA- Polskie Stowarzyszenie Aluminium, 2021, Rynek jest daleki od przegrzania, Rozmowa z Janem Kidajem, zarządzającym grupą Aliplast, Artykuł ukazał się w magazynie „Nowa Stal” (czerwiec 2021 r.)
- [27]. Interia Historia, 2015, https://historia.interia.pl/kartka-z-kalendarza/news-7-stycznia-1981-r-zamkniecie-huty-aluminium-w-skawinie,nId,1584722#utm_source=paste&utm_medium=paste&utm_campaign=fir efox
- [28]. Prospekt emisyjny Spółki, 2013, BM BGŻ https://www.bankier.pl/up/rekomendacje/raporty/101000/80862_23022015_aml_kupuj_57_65.pdf
- [29]. Eco-Świat - profile, stopy i taśmy aluminiowe, 2024, <https://www.eko-swiat.pl/>
- [30]. Nicromet, <https://nicromet.pl/proces-produkcji/>
- [31]. Gawrych, E. 2024, Odlewnia Gawrych, <https://odlewnia-gawrych.pl/recykling-aluminium/>
- [32]. Marszałek województwa opolskiego, 2022, https://bip.opolskie.pl/wp-content/uploads/2022/03/20.7222.46_Magna-pozwolenie-zintegrowane.pdf
- [33]. Primary Aluminum Market Report 2025 (Global Edition) https://www.cognitivemarketresearch.com/primary-aluminum-market-report?campaign_source=google_ads&campaign_name=CMR_EU_DSA02&gad_source=1&gad_campaignid=21601276953&gclid=CjwKCAjw6s7CBhACEiwAuHQckt1C8AvJNW_CbSlq-VQ37W4MaZaeqvrrbyLH2egfREj2nEZK4rlA5BoCulcQAvD_BwE
- [34]. Home, A. 2025, Aluminium is base metals analysts' bull pick for 2025, <https://www.reuters.com/markets/commodities/aluminium-is-base-metals-analysts-bull-pick-2025-andy-home-2025-02-04/>
- [35]. Custom Aluminium, 2024, <https://www.customaluminiumwa.com.au/>
- [36]. International Aluminium, 2025, <https://international-aluminium.org/>
- [37]. Aluminium Market Trends, <https://www.spglobal.com/commodity-insights/en/news-research/topics/aluminum-market->

- trends#q=&rows=20&pagenum=1&sort=es_unified_dt%20desc&facets={%22es_content_type_s%22:[%22News%22,%22Video%22,%22Podcast%22,%22Blog%22,%22Subscriber%20Notes%22]}
- [38]. China Automotive Industry Market Overview, 2025, Source: https://www.marketresearchfuture.com/reports/china-automotive-industry-market-12675?utm_term=&utm_campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=2893753364&hsa_cam=20543884685&hsa_grp=153457592316&hsa_ad=673752668768&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-2289570716314&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1
- [39]. Primary aluminium production, <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-production/?publication=primary-aluminium-production&filter=%7B%22row%22%3A85%2C%22group%22%3Anull%2C%22multiGroup%22%3A%5B%5D%2C%22dateRange%22%3A%22monthly%22%2C%22monthFrom%22%3A4%2C%22monthTo%22%3A4%2C%22quarterFrom%22%3A1%2C%22quarterTo%22%3A4%2C%22yearFrom%22%3A2025%2C%22yearTo%22%3A2025%2C%22multiRow%22%3A%5B85%5D%2C%22columns%22%3A%5B1%2C%22C3%2C4%2C5%2C6%2C10%2C7%2C8%2C9%2C10%5D%2C%22activeChartIndex%22%3A0%2C%22activeChartType%22%3A%22map%22%7D>
- [40]. Majumder, R. Where the aluminium demand is: Downstream, end-user & recycling trends that matter in 2025, <https://www.alcircle.com/news/where-the-aluminium-demand-is-downstream-end-user-recycling-trends-that-matter-in-2025-113840?srltid=AfmBOooAERnOIv2HwMNOen88k7IuNytaBynD-FwkWiEzObBc5nW9XC1P>
- [41]. Liu, J. 2025, <https://www.yieh.com/en/iai-global-primary-aluminum-production-increase-in-jan-y-o-y/153071>
- [42]. Aluminum Production by Country 2025, <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/aluminum-production-by-country#title>
- [43]. Aluminum Global Market Report 2025 – By Product Type (Primary Aluminum, Secondary Aluminum), <https://www.thebusinessresearchcompany.com/report/aluminum-global-market-report>
- [44]. Aluminum Industry 2025, https://www.marketresearchfuture.com/reports/aluminium-metals-market-3563?utm_term=&utm_campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=2893753364&hsa_cam=20373674291&hsa_grp=150985931723&hsa_ad=665909881832&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-2089395940944&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1
- [45]. Circular Economy, 2023, Aluminium demand will rise 40% by 2030. Here's how to make it sustainable, <https://www.weforum.org/stories/2023/11/aluminium-demand-how-to-make-it-sustainable/>

Streszczenie

Artykuł ma charakter przeglądowy. Dotyczy charakterystyki aluminium i jego stopów. Zawiera 11 rozdziałów, w których przedstawiono dane dotyczące aluminium jako pierwiastka, informacje o rodzajach stopów aluminium, właściwości i zastosowanie aluminium, scharakteryzowano rynek aluminium w Polsce i na świecie, przedstawiono perspektywy rozwoju przemysłu aluminiowego w kontekście obecnego i przyszłościowego zapotrzebowania na aluminium. Zaprezentowano możliwości recyklingu aluminium i najnowsze trendy produkcji "zielonego" aluminium o jak najniższym śladzie węglowym.

Słowa kluczowe: aluminium, stopy aluminium, rynek aluminium, recykling aluminium

Abstract

The article is of a review nature. It concerns the characteristics of aluminum and its alloys. It contains 11 chapters, which present data on aluminum as an element, information on the types of aluminum alloys, properties and applications of aluminum, characterize the aluminum market in Poland and worldwide, present the prospects for the development of the aluminum industry in the context of its current and future demand. It presents the possibilities of recycling aluminum and the latest trends in the production of "green" aluminum with the lowest possible carbon footprint.

Key words: aluminum, aluminum alloys, aluminum market, aluminum recycling

mgr inż. arch. Justyna M. Kobylarczyk¹⁾, Juan José Martín Martínez²⁾

1) Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków

2) Universidad de Zaragoza, Saragossa

PROCESSES OF CIRCULAR ECONOMY IN FOOD COMPANIES PRODUCING JUICES

1. Introduction.

The circular economy is an economic model designed to minimize waste and maximize the efficient use of resources. It contrasts with the traditional linear economy, which follows a “take, make, dispose” approach. In the food sector, particularly in juice manufacturing, adopting circular economy principles is essential for reducing waste, enhancing sustainability, and optimizing resource utilization (Kirchherr, Reike & Hekkert, 2017; Murray, Skene & Haynes, 2017).

In the juice industry, bio-waste such as fruit peels, pulp, and seeds represent a substantial share of the total waste generated. According to the Food and Agriculture Organization (FAO, 2019), around 45% of all fruit produced globally is lost or wasted, much of it during processing activities like juicing. Specifically, in orange juice production, by-products including peel, pulp, and seeds can account for up to 60–70% of the fruit’s weight, yet only a small portion of this material—estimated at 10–20%—is recycled or reused, while the remainder is typically discarded (Juice Products Association, 2020; Food Processing Technology, 2020). Overall, the global juice industry is estimated to produce approximately 4 million tons of fruit waste annually (Juice Products Association, 2020).

Food waste in general also poses a major environmental concern, as it contributes to about 8% of global greenhouse gas emissions, primarily due to the decomposition of organic matter in landfills (Ellen MacArthur Foundation, 2017). This highlights the significant potential for implementing circular economy strategies in the juice sector—transforming by-products into valuable resources such as biofuels, animal feed, natural fibers, and bioactive compounds used in food,

cosmetics, or pharmaceuticals (Murray et al., 2017).

By embracing circular economy practices, juice manufacturers can significantly reduce their environmental footprint, enhance resource efficiency, and create new business opportunities. According to the European Commission (2020), full adoption of circular economy principles across industries could reduce greenhouse gas emissions in Europe by up to 450 million tons annually by 2030. In the juice industry, these measures could divert the majority of bio-waste from landfills, converting it into high-value products such as bioplastics, biofuels, or natural additives, thus supporting a more sustainable and resilient food system.

2. Methodology.

The study conducted a detailed review of the scientific literature following the PRISMA methodology (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses). The following stages were carried out:

Identification: Scientific articles and relevant reports were collected from academic databases such as Scopus, Web of Science, and Google Scholar. Key terms such as “circular economy,” “juice industry,” “waste management,” and “sustainability” were used.

Selection: Inclusion and exclusion criteria were applied to filter the most relevant studies. Articles published in the last ten years that addressed the circular economy in the food industry and the management of juice by-products were included.

Data extraction: The selected studies were analyzed based on their methodology, findings, and relevance to the topic.

Data synthesis: Circular economy strategies used in different juice-producing companies were compared, identifying best practices and the main barriers to their implementation.

In parallel, reports and documents produced by international organizations such as the FAO and the European Union were reviewed to understand global trends in sustainability and the circular economy. The reports analyzed included both policies and recommendations for effective waste management and promoting sustainable practices in the food industry.

The study also assessed current waste management practices at leading juice companies, based on available secondary data, industry reports and cases of implemented initiatives. A qualitative approach was used to analyze the data, considering aspects related to the life cycle of products, the level of material recovery and the effectiveness of implemented waste management strategies. A comparative analysis was also conducted between different waste management strategies used in the juice industry, considering their impact on waste reduction and recycling efficiency.

In the article a total of 36 scientific publications published between 2010 and 2023 were subjected to a systematic analysis. The selection process was guided by clearly defined inclusion and exclusion criteria to ensure the relevance and quality of the reviewed sources. The inclusion criteria encompassed the availability of full-text articles in English, a direct focus on circular economy principles, sustainable production practices, or waste management within the food industry, and explicit reference to the fruit juice sector or fruit processing. Both peer-reviewed journal articles and authoritative institutional reports—such as those issued by the Food and Agriculture Organization (FAO) and the European Commission—were considered. Conversely, the exclusion criteria comprised studies lacking a clear connection to the circular economy or the food sector, non-peer-reviewed materials, and publications presenting redundant or overlapping data. The review process followed

a structured flow: initially, approximately 80 publications were identified. After a preliminary screening based on titles and abstracts, 50 studies were retained for further evaluation. A comprehensive full-text assessment subsequently reduced this number to 36 publications, which constituted the final corpus for detailed analysis and synthesis.

3. Overview of the fruit juice production process.

The traditional juice production process involves several stages, each contributing to the generation of waste and resource consumption. These stages include fruit selection, washing, extraction, filtration, pasteurization, and packaging. At each stage, significant amounts of by-products and waste are produced. For instance, during the extraction phase, fruit pulp, seeds, and peels are separated from the juice. By-products can account for more than half of the original fruit mass (Pereira et al., 2020), and the pulp itself is one of the largest sources of waste in juice production (Ravindran et al., 2016). Additionally, packaging materials such as plastic bottles, glass containers, and cardboard further contribute to the environmental burden, particularly as much of this packaging is single-use and not recycled efficiently (Pereira & Vicente, 2019).

The environmental impacts of juice production are substantial. High water consumption is one of the most significant environmental concerns, as it is estimated that producing just one liter of orange juice requires approximately 560 liters of water (Ridoutt et al., 2010). Moreover, the juice industry relies heavily on energy-intensive processes such as pasteurization, which results in considerable greenhouse gas emissions. According to a study by Szekely et al. (2018), the juice industry's carbon footprint primarily stems from energy use during the extraction, pasteurization, and packaging stages, contributing to global environmental challenges. Food waste is responsible for approximately 8% of global greenhouse gas emissions, mainly from the decomposition of organic waste in landfills (Ellen MacArthur Foundation, 2017). The carbon footprint of fruit waste in landfills is considerable, as organic waste breaks down

anaerobically, releasing methane, a potent greenhouse gas (FAO, 2021).

Proper waste management and the adoption of sustainable practices are essential for mitigating these environmental effects. For instance, employing circular economy principles, such as converting fruit pulp and peels into bio-based products, could significantly reduce waste and lower resource consumption. Research by Santos et al. (2017) suggests that fruit waste can be repurposed into high-value products like animal feed, bioplastics, and natural fibers, contributing to a more sustainable production process. Additionally, using renewable energy sources

environmental impacts but also presents opportunities for juice producers to enhance operational efficiency and improve brand reputation in an increasingly eco-conscious market.

4. Adoption of Circular Economy practices.

Against the backdrop of growing concern for environmental protection and sustainability, the juice industry recognizes the need to implement innovative solutions in line with the principles of the Circular Economy (GOZ). The goal is to minimize waste, optimize resource consumption and reduce environmental impact. The use of by-products,

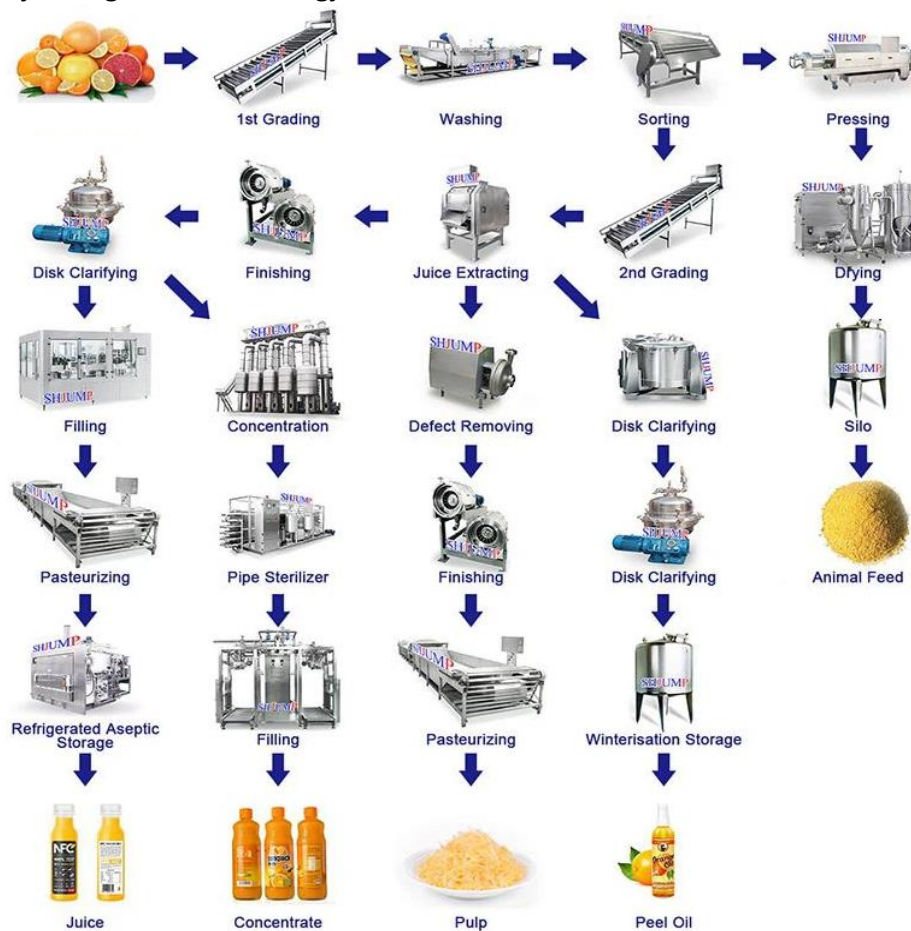


Figure 1. Orange juice processing line from SHJUMP Company.

Source: [https://www.shjumpmachine.com/fruit-processing-line/fruit-juice-processing-line/orange-juice-processing-line.html](https://www.shjumpmachine.com/fruit-processing-line/fruit-juce-processing-line/orange-juice-processing-line.html)

and implementing water recycling systems in juice manufacturing plants can substantially decrease both water usage and energy consumption (Hernandez & Martinez, 2018; Carter & Lacy, 2019). The integration of sustainable practices not only reduces

such as fruit pulp, peels and seeds, in new high-value products is one of the key actions that not only contribute to sustainable development, but also support the economic benefits of producers. In addition, the implementation of circular systems, sustainable packaging, and

energy and water efficiency in production processes is becoming increasingly common, allowing companies to reduce resource consumption, reduce waste and increase competitiveness in the market.

4.1 Waste Minimization

Juice companies are increasingly repurposing by-products like pulp, peels, and seeds into high-value products, aligning with circular economy principles. For example, fruit pulp is used in animal feed, biofuels, and as an ingredient in food products like smoothies and snack bars (Lieder & Rashid, 2016). Additionally, fruit peels and seeds are processed for antioxidants, flavonoids, and essential oils, which are used in cosmetics, pharmaceuticals, and food additives (Tee & Nair, 2020). These practices reduce waste and generate revenue. Companies are also exploring technologies to convert by-products into items like fruit-based fibers for health supplements and citrus peel oil for cleaning products or flavoring (Juice Products Association, 2020), creating new revenue streams and reducing environmental impact.

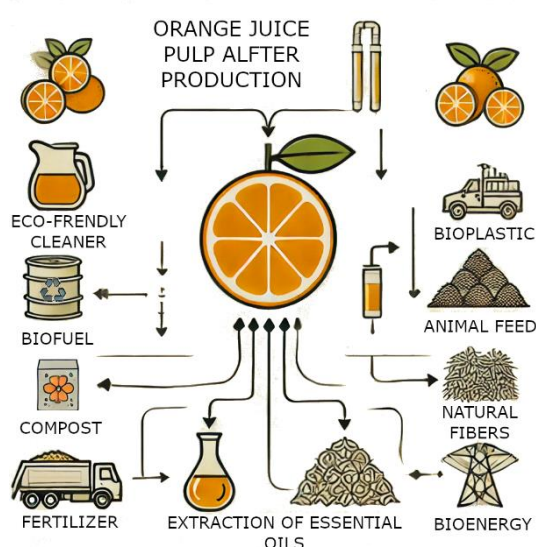


Figure 2. Possibilities of using fruit pulp from oranges.

4.2 Circular Systems

In line with circular economy principles, many juice manufacturers are adopting circular systems, where waste

materials are reintegrated into the production cycle. These systems are designed to minimize waste by reusing resources within the production process itself. For instance, water used in juice extraction and washing processes is treated and then recycled for reuse, reducing the overall consumption of water in production (Carter & Lacy, 2019). Similarly, organic waste, including fruit pulp and peel, is either composted or converted into bioenergy through processes such as anaerobic digestion. This not only reduces landfill waste but also generates renewable energy that can be used within the factory itself. A study by Gholami et al. (2021) found that closed-loop water systems can reduce water usage by up to 50% in food production industries, contributing to a significant reduction in overall environmental impact.

4.3 Sustainable Packaging

Innovations in packaging are also playing a crucial role in the juice industry's shift towards sustainability. The increasing environmental concerns over plastic waste have led juice manufacturers to invest in biodegradable, plant-based, and fully recyclable packaging materials. Packaging innovations include the use of polylactic acid (PLA) derived from renewable resources such as corn starch, as well as edible coatings and reusable containers for products like smoothies or cold-pressed juices (Ritchie et al., 2020). Some companies have committed to reducing single-use plastics, aiming to make their packaging 100% recyclable or compostable within the next decade. According to Ritchie et al. (2020), sustainable packaging not only reduces waste but also helps juice companies improve their corporate image and meet the growing consumer demand for environmentally friendly products.

4.4 Energy and Water Efficiency

Adopting energy-efficient processes and renewable energy sources is another key aspect of circular economy practices in the juice industry. Juice manufacturers are increasingly turning to solar energy, biomass, and wind power to power their operations, significantly

reducing their reliance on fossil fuels. A report by Murray et al. (2017) indicated that adopting renewable energy sources in food production could reduce carbon emissions by up to 30%. Additionally, water recycling systems have been implemented in many juices production plants to reduce water consumption. These systems enable the reuse of water from washing, extraction, and even cleaning processes, which

can reduce water consumption by as much as 60% (Gholami et al., 2021). Efficient water use is especially important in areas facing water scarcity, where optimizing water consumption can have both environmental and economic benefits.

Table 1. SWOT analysis of implementing circular economy principles in the juice industry.

Strengths	Weaknesses
Minimization of waste: The use of by-products (pulp, seeds, peels) as valuable resources (e.g., biofuels, animal feed, food products) contributes to a more sustainable process. (Lieder & Rashid, 2016)	Initial investment: Transitioning to circular systems, such as water recycling and biodegradable packaging, requires high upfront costs for equipment and infrastructure.
New revenue streams: Repurposing by-products provides additional income for companies, contributing to economic growth while reducing environmental impact. (Tee & Nair, 2020)	Complexity in operations: The implementation of circular systems may lead to more complex production processes and the need for specialized knowledge and training.
Reduced environmental impact: Circular systems and sustainable practices (e.g., water and energy efficiency) significantly lower the environmental footprint, helping companies align with sustainability goals. (Gholami et al., 2021)	Waste management challenges: Although waste is minimized, managing by-products (such as organic waste) and ensuring they are put to beneficial use may still be challenging.
Improved corporate image: Using eco-friendly practices and sustainable packaging strengthens the company's brand, meeting the increasing consumer demand for green products. (Ritchie et al., 2020)	Consumer readiness: Some consumers may not be ready to embrace products with alternative packaging or those produced through a circular economy model, limiting market acceptance.
Opportunities	Threats
Innovation and market expansion: Implementing circular economy principles opens doors for new products and market opportunities (e.g., cosmetics, pharmaceuticals from fruit peels). (Juice Products Association, 2020)	Regulatory challenges: As regulations around waste, packaging, and environmental impact become stricter, the juice industry may face compliance difficulties.
Government incentives: Governments are increasingly offering incentives and subsidies for companies adopting green practices and sustainable production models.	Competitive pressure: Competitors may adopt similar sustainable practices, making it challenging for individual companies to differentiate themselves solely on sustainability.
Growing consumer demand for sustainability: With an increasing focus on eco-friendly practices,	Supply chain disruptions: Sourcing sustainable raw materials and eco-friendly packaging could face supply chain

there is a rising consumer preference for companies that demonstrate a commitment to sustainability.	challenges, particularly with fluctuations in market prices and availability.
Technological advancements: New technologies (e.g., in packaging, filtration, and energy systems) offer continuous improvements in sustainability and cost-effectiveness.	Market volatility: Economic fluctuations and unexpected market changes can affect the profitability of businesses implementing circular economy practices.

5. Technology in the Circular Economy for juice production.

Technology is a key element in the implementation of the principles of a closed-loop economy (GOZ) in the juice industry, enabling more efficient use of resources and minimizing waste. The use of innovative technological solutions, such as advanced processing techniques, artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT) and blockchain, allows optimizing juice production processes, improving energy efficiency, reducing water consumption and controlling the supply chain. These cutting-edge technologies not only help increase productivity and product quality, but also promote sustainability and reduce environmental impact.

5.1 Advanced Processing Techniques

Advanced processing technologies, such as cold-pressing, are enhancing juice production efficiency while minimizing waste. Cold-pressing preserves nutrients and flavor, extracts higher yields, and reduces energy consumption compared to traditional heat-based methods, which degrade juice quality and waste more energy (Ghisellini, Cialani & Ulgiati, 2016). Additionally, membrane filtration and ultrafiltration are improving juice separation from pulp, leading to higher yields and reduced waste (Zhang et al., 2017). Enzymatic treatments further enhance extraction efficiency and convert pulp into valuable resources, such as animal feed or biofuels (Choi & Kim, 2020). These technologies support circular economy goals by minimizing resource use and waste generation.

5.2 AI and IoT in Production

The integration of Artificial Intelligence (AI) and the Internet of Things (IoT) into juice production has advanced the industry's circular economy efforts. AI analyzes production data, identifies patterns, and predicts inefficiencies in real-time, optimizing resource usage and reducing waste (Sharma et al., 2019). AI-powered algorithms can adjust variables such as temperature, pressure, and processing time to maximize juice yield while minimizing energy and water use, reducing both environmental impacts and operational costs (Nair & Kumar, 2021). Similarly, IoT devices enable real-time monitoring of production stages, tracking water and energy consumption, and providing immediate feedback to operators for efficient adjustments (Kang et al., 2020). Together, AI and IoT enhance sustainability by optimizing resources and minimizing waste.

5.3 Blockchain for Traceability

The application of blockchain technology is driving sustainable practices in the juice industry. Blockchain ensures supply chain transparency by providing an immutable record of every step from farm to factory, allowing consumers and stakeholders to track raw material origins and ensure responsible sourcing (Carter & Lacy, 2019). It also enables manufacturers to verify compliance with sustainable practices, such as waste reduction, energy use, and recycling, fostering greater accountability (Carter & Lacy, 2019). By recording and sharing information securely, blockchain helps identify inefficiencies and areas to minimize waste, supporting companies in meeting sustainability targets (Borgia et al., 2019). Additionally, blockchain allows manufacturers to track by-product disposal and

reuse, diverting valuable resources into secondary processes like bioenergy or upcycled food products (Borgia et al., 2019). As blockchain adoption increases, it will

strengthen the industry's commitment to transparency and circular economy principles by making waste reduction efforts more visible and verifiable.

Table 2. Analysis of advantages, disadvantages, and circular economy impact of selected technologies in juice production.

Technology	Advantages	Disadvantages	Impact on a circular economy
Cold-pressing	☑ Retains more nutrients and flavor. ☑ Higher extraction efficiency. ☑ Less energy consumption than thermal methods.	☒ Higher initial equipment costs. ☒ Slower process compared to thermal methods.	○ Reduces waste. ○ Better use of raw materials through more efficient extraction.
Membrane filtration and ultrafiltration	☑ Effectively separates juice from pulp. ☑ Increases process efficiency. ☑ Reduces production residue.	☒ High installation and maintenance costs. ☒ May require additional membrane cleaning.	○ Reduction of raw material losses. ○ Possibility of reusing the filtrate in production.
Enzymatic treatment	☑ Increases extraction efficiency. ☑ Allows waste to be used in other sectors (e.g., feed, biofuels).	☒ May require careful control of temperature and run time. ☒ Additional cost of enzymes.	○ Better utilization of the whole fruit. ○ Possibility of managing organic waste.
AI	☑ Optimization of processes, reduction of energy and water consumption. ☑ Increased quality control. ☑ Ability to predict failures and minimize losses.	☒ High implementation costs. ☒ The need for staff training.	○ Reducing resource consumption. ○ Minimizing waste by optimizing production.
IoT	☑ Continuous monitoring of production parameters. ☑ Ability to react quickly to inefficiencies.	☒ Requires advanced technology infrastructure. ☒ Need for cyber security in data collection.	○ Enables precise control of resource consumption. ○ Reduces waste resulting from production errors.
Blockchain	☑ Transparency of the supply chain. ☑ Traceability of raw materials and recycling processes. ☑ Better control over sustainability compliance.	☒ High implementation costs. ☒ Requires widespread industry acceptance.	○ Provides better control over product lifecycle. ○ Minimizes resource waste by accurately tracking resource usage.

6. Business models supporting Circular Economy.

To foster sustainability and reduce waste, innovative business models are emerging. These models emphasize resource efficiency, waste minimization, and the creation of value from by-products. By shifting focus from ownership to access and incorporating collaborative partnerships, subscription services, and e-commerce, companies are revolutionizing their operations.

6.1 Product as a Service (PaaS)

One innovative business model gaining traction in the juice industry is the Product as a Service (PaaS) model, where traditional ownership of products is replaced by access-based consumption. This model is exemplified by refill stations, where consumers can purchase juice without the need for disposable packaging, thus significantly reducing packaging waste (Stahel, 2016). Refill stations allow customers to bring their own containers, reducing the need for single-use plastic bottles and cartons. This practice is in line with the principles of the circular economy, as it aims to minimize resource extraction, reduce waste generation, and extend the lifespan of materials by reusing containers.

Several juice companies have implemented this model as part of their sustainability initiatives. For example, juices sold in bulk through refill stations can be repurposed for multiple uses, decreasing the overall demand for packaging materials (Geissdoerfer et al., 2017). This shift not only benefits the environment but also offers cost-saving opportunities for companies by reducing the need for packaging production and disposal. Stahel (2016) emphasizes that the service-oriented model focuses on functionality rather than product ownership, which is a core principle of the circular economy that encourages longer product lifecycles and reduced material waste.

6.2 Collaboration and Partnerships

Collaboration and partnerships play a pivotal role in enhancing the effectiveness of

circular economy initiatives in the juice industry. Juice manufacturers are increasingly collaborating with farmers, packaging producers, and technology companies to create closed-loop systems that optimize resource use and minimize waste. These partnerships allow companies to share resources, streamline production processes, and ensure that raw materials are sustainably sourced and managed.

For instance, many juice companies are working with local farmers to source fruits that meet sustainable agricultural practices, reducing the environmental footprint of transportation and chemical usage (Geissdoerfer et al., 2017). Additionally, partnerships with packaging producers are focused on designing recyclable or biodegradable packaging and improving collection and recycling systems to facilitate a circular material flow. As Carter & Lacy (2019) point out, such collaborations help companies reduce supply chain risks, improve transparency, and achieve better waste management outcomes.

Moreover, tech partnerships are helping juice producers implement advanced IoT and AI technologies that monitor production and optimize resource use. These technologies can track supply chain waste, reduce energy consumption, and even predict demand more accurately, minimizing both excess inventory and wasted raw materials (Ghosh & Lee, 2020). In a circular economy context, these partnerships are instrumental in creating systems that support sustainability across the value chain, from farm to packaging to the consumer.

6.3 E-commerce and Subscription Models

The growth of e-commerce and subscription-based sales models is further supporting the adoption of circular economy principles in the juice industry. Direct-to-consumer (DTC) sales, facilitated by e-commerce platforms, offer juice companies greater control over their packaging choices and waste management practices. Through e-commerce channels, juice manufacturers can provide refillable options or minimalist

packaging, ensuring that packaging waste is kept to a minimum (Rogers, 2020).

Subscription services, in particular, are revolutionizing juice production and distribution. By allowing customers to sign up for regular juice deliveries, companies can optimize production planning, ensuring that only the necessary amount of product is produced. This reduces the risk of overproduction, minimizes the likelihood of excess inventory going to waste, and creates a more efficient supply chain. According to Geissdoerfer et al. (2017), subscription models can provide juice producers with valuable data on consumption patterns, allowing them to adjust their production processes accordingly and minimize waste.

Subscription-based models also contribute to customer loyalty, as consumers are more likely to engage with brands that offer convenience and sustainability in their purchasing habits. Furthermore, such models support sustainable consumption by encouraging consumers to purchase only the

amount of product they need, reducing food waste in the process (Rogers, 2020). By integrating circular economy practices into their business models, juice companies can align their economic goals with environmental responsibility and consumer demand for sustainability.

7. Challenges and Gaps.

Despite the growing interest in implementing circular economy practices, the juice industry faces several challenges and gaps that hinder the widespread adoption of sustainable solutions. These include high initial costs, limited consumer awareness, lack of adequate infrastructure, and obstacles in sourcing ingredients, packaging innovations, and waste processing, which require targeted efforts and investments to overcome. The key challenges and gaps in adopting circular economy practices in the juice industry are presented in **table 3**, which outlines financial, consumer, and infrastructure-related barriers, as well as issues in sourcing, packaging, and waste upcycling.

Table 3. Challenges and gaps in adopting circular economy practices in the juice industry.
(source: Own elaboration)

Category	Challenges and Gaps	Sources
High Upfront Investment	Transitioning to sustainable technologies requires significant financial investment, such as advanced filtration systems, energy-efficient technologies, and redesigned packaging. SMEs face financial constraints that hinder adoption.	Bocken et al. (2014); Giroto, Alibardi & Cossu (2015)
Consumer Awareness & Acceptance	Many consumers are unaware of the environmental benefits of circular economy practices. Resistance to new business models like refill stations or sustainable packaging can slow adoption.	Bocken et al. (2014)
Lack of Infrastructure	Recycling and waste treatment systems vary by region, limiting the ability to implement closed-loop systems. Some areas lack facilities for processing biodegradable or recyclable materials.	Giroto, Alibardi & Cossu (2015); Bocken et al. (2014)
Sourcing of Ingredients	Regenerative agriculture practices, such as crop rotation and agroforestry, are underutilized in the juice industry. The environmental impact of conventional farming remains high.	Giroto, Alibardi & Cossu (2015); Bocken et al. (2014)
Biodegradable Packaging Development	Fully compostable and biodegradable packaging is still in early stages. Challenges include scalability, cost-effectiveness, and maintaining juice freshness. Regulatory support and consumer acceptance are needed.	Giroto, Alibardi & Cossu (2015); Bocken et al. (2014)
Upcycling of Juice Waste	Significant juice by-products (pulp, peels, seeds) are often underutilized or used for low-value purposes like animal feed. More research and investment are needed for transforming waste into biofuels, biodegradable plastics, or high-value food ingredients.	Giroto, Alibardi & Cossu (2015); Bocken et al. (2014); Choi & Kim (2020)

8. Conclusion.

The implementation of circular economy principles in juice production offers substantial environmental and operational benefits. Empirical evidence indicates that circular practices, such as the valorization of fruit by-products (pulp, peels, and seeds) into animal feed, bioenergy, bioplastics, or high-value cosmetic and food ingredients, contribute to waste reduction and enhance the efficiency of raw material utilization. Moreover, the adoption of technologies supporting closed-loop systems—including water recycling, energy-efficient processes, and biodegradable packaging—has a measurable impact on

decreasing energy and water consumption and mitigating greenhouse gas emissions.

Despite these advantages, the analysis of existing research highlights several barriers to the widespread adoption of circular solutions. High initial capital expenditures associated with circular technologies, such as advanced filtration systems, closed-loop water systems, and biodegradable packaging, may constrain their implementation, particularly among small and medium-sized enterprises. Nevertheless, the potential long-term economic benefits of waste valorization—through reductions in disposal costs and the creation of additional

revenue streams—can outweigh these initial investments, especially in large-scale production settings. This underscores the need for detailed, case-specific economic assessments to evaluate the financial feasibility of individual circular interventions.

The successful and scalable implementation of circular economy principles also necessitates:

1. The development of business models that facilitate circularity, such as Product as a Service (PaaS), subscription-based distribution systems, and strategic supply chain partnerships;
2. The enhancement of consumer awareness regarding sustainable products and the advantages of by-product utilization;
3. Investments in recycling and waste management infrastructure to enable effective closure of material loops;
4. The deployment of advanced monitoring technologies, such as artificial intelligence (AI), the Internet of Things (IoT), and blockchain, to optimize production processes and accurately track both environmental and economic outcomes.

In conclusion, the findings of this study suggest that the application of circular economy principles in juice production can yield tangible environmental and economic benefits. However, to fully realize the potential of these practices, it is essential to conduct comprehensive cost–benefit analyses, develop appropriate infrastructure, and educate both producers and consumers. Only through the integration of these measures can circular strategies become economically viable and scalable, thereby contributing to the sustainable development of the juice industry.

Bibliography

- [1]. Bocken, N. M. P., Short, S. W., Rana, P., & Evans, S. (2014). *A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes*. Journal of Cleaner Production, 65, 42-56. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.11.039>
- [2]. Borgia, A., De Blasi, P., & Fabbri, G. (2019). *Blockchain in food supply chains: Traceability and transparency in sustainable practices*. Journal of Food Science, 84(10), 2652-2664. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14823>
- [3]. Carter, C., & Lacy, P. (2019). *Sustainable practices in the food industry: Insights from juice production*. Journal of Cleaner Production, 234, 255-263. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.278>
- [4]. Castro, L. A., et al. (2020). From orange juice by-product in the food industry to a functional ingredient: Application in the circular economy. *Foods*, 9(5), 593.
- [5]. Choi, Y. H., & Kim, J. H. (2020). *Cold-pressing technology for juice production: Efficiency, quality, and waste reduction*. Food Engineering Reviews, 12(3), 233-245. <https://doi.org/10.1007/s12393-020-09203-w>
- [6]. Ciccicarese, L., & De Pascale, A. (2021). *Circular economy and sustainable business practices in the food industry: Insights from the juice production sector*. Sustainability, 13(9), 4700. <https://doi.org/10.3390/su13094700>
- [7]. Ellen MacArthur Foundation. (2017). *The New Plastics Economy: Rethinking the future of plastics*. <https://www.ellenmacarthurfoundation.org>
- [8]. Esturo, A., et al. (2023). Fruit juice industry's transition towards sustainability from the viewpoint of the producers. *Sustainability*, 15(4), 3066.
- [9]. European Commission. (2020). *A new Circular Economy Action Plan for a cleaner and more competitive Europe*. <https://ec.europa.eu>
- [10]. Food and Agriculture Organization (FAO). (2021). *Food loss and waste: The facts*. <https://www.fao.org>
- [11]. Food and Agriculture Organization (FAO). (2019). *The State of Food and Agriculture: Moving forward on food loss and waste reduction*. <https://www.fao.org>
- [12]. Food Processing Technology. (2020). *Waste management in fruit juice production*. <https://www.foodprocessing-technology.com>
- [13]. Geissdoerfer, M., Savaget, P., Bocken, N. M. P., & Hultink, E. J. (2017). *The Circular Economy – A new sustainability paradigm?*. Journal of Cleaner Production, 143, 757-768.

- <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.048>
- [14]. Ghisellini, P., Cialani, C., & Ulgiati, S. (2016). *A review of circular economy in the food industry: Sustainable processes and practices*. Journal of Cleaner Production, 114, 35-52. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.148>
- [15]. Gholami, M., Zhang, M., & Li, J. (2021). *Water recycling and sustainability practices in food production: A case study of the juice industry*. Journal of Environmental Management, 287, 112310. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112310>
- [16]. Ghosh, S., & Lee, C. (2020). *Integrating technology for sustainable business: IoT and AI adoption in the food industry*. Sustainability, 12(4), 1123. <https://doi.org/10.3390/su12041123>
- [17]. Girotto, F., Alibardi, L., & Cossu, R. (2015). *Waste management in the circular economy: A perspective on the juice industry*. Waste Management, 46, 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.012>
- [18]. Hernandez, J. L., & Martinez, F. (2018). *Environmental impacts of fruit juice processing: A life cycle assessment approach*. Food Research International, 104, 19-27. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2017.11.027>
- [19]. Juice Products Association. (2020). *The Juice Industry: Sustainability and waste reduction*. <https://www.juiceproducts.org>
- [20]. Kang, Y., Lee, S., & Cho, H. (2020). *Optimizing food processing with IoT and artificial intelligence: A case study on juice production*. Computers in Industry, 118, 103235. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2020.103235>
- [21]. Kirchherr, J., Reike, D., & Hekkert, M. (2017). *Conceptualizing the Circular Economy: An analysis of 114 definitions*. Resources, Conservation and Recycling, 127, 221-232. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.005>
- [22]. Lieder, M., & Rashid, A. (2016). *Towards circular economy implementation: A comprehensive review in the food industry*. Sustainability, 8(6), 542. <https://doi.org/10.3390/su8060542>
- [23]. Murray, A., Skene, K., & Haynes, K. (2017). *The Circular Economy: An interdisciplinary exploration of the concept and application in a global context*. Journal of Business Research, 79, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2017.05.029>
- [24]. Nair, A., & Kumar, M. (2021). *AI-powered solutions for resource optimization in food production: A case study of the juice industry*. Journal of Food Engineering, 302, 110544. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2020.110544>
- [25]. Pereira, C. G., & Vicente, A. A. (2019). *Sustainable practices in the juice industry: Opportunities for waste valorization*. Food Science and Technology, 39(2), 123-132. <https://doi.org/10.1590/fst.123>
- [26]. Pereira, M., Santos, M., & Simoes, R. (2020). *Fruit and vegetable by-products in juice production: Current and future trends in waste utilization*. Waste Management, 102, 226-234. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.10.017>
- [27]. Ravindran, V., Pinder, M., & Sreenivasan, R. (2016). *Juice production and waste management: Potential for circular economy models*. Journal of Food Processing and Preservation, 40(1), 42-52. <https://doi.org/10.1111/jfpp.13044>
- [28]. Ridoutt, B. G., Pfister, S., & Marly, H. (2010). *Water use in the global juice industry: A life cycle assessment*. International Journal of Life Cycle Assessment, 15(8), 815-825. <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0225-9>
- [29]. Ritchie, H., Roser, M., & Rosado, P. (2020). *Plastic waste and recycling in the food industry: Trends and solutions*. Global Environmental Change, 68, 102243. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102243>
- [30]. Rogers, T. (2020). *E-commerce and circular economy: Reimagining business models in the food sector*. Journal of Business Research, 118, 309-317. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2020.07.008>
- [31]. Santos, M., Vicente, A. A., & Pereira, C. G. (2017). *Waste-to-value in the juice industry: Recycling fruit pulp for*

- sustainable production*. Waste Management, 58, 171-180. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.08.017>
- [32]. Sharma, P., Yadav, S., & Kumar, D. (2019). *Artificial intelligence in food processing: Applications, challenges, and future prospects*. Food Research International, 116, 429-442. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2018.09.032>
- [33]. Stahel, W. R. (2016). *The circular economy: A new business model for a sustainable future*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-34858-3>
- [34]. Szekely, G., Dicker, E., & Molnar, E. (2018). *Environmental sustainability in the fruit juice industry: Carbon footprint analysis*. Food and Environmental Economics, 2(4), 14-25. <https://doi.org/10.1016/j.foodenv.2018.03.002>
- [35]. Tee, S. Y., & Nair, S. (2020). *Valorization of fruit waste in the juice industry: From food by-products to biopharmaceuticals*. Bioresource Technology, 308, 123263. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123263>
- [36]. Zhang, Z., Liu, Y., & Chen, X. (2017). *Membrane filtration and ultrafiltration technology in juice production: Advances and challenges*. Journal of Food Science, 82(7), 1610-1622. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.13744>

Streszczenie

Gospodarka o obiegu zamkniętym stanowi znaczącą zmianę dla przedsiębiorstw spożywczych, w tym producentów soków, ponieważ optymalizuje wykorzystanie zasobów i minimalizuje ilość odpadów. W niniejszym artykule omówiono, w jaki sposób zasady gospodarki o obiegu zamkniętym mogą być stosowane w tych przedsiębiorstwach, podkreślając ponowne wykorzystanie produktów ubocznych jako składników funkcjonalnych, usprawnienie procesów produkcyjnych oraz opracowanie zrównoważonych strategii. Na podstawie przykładów i najnowszych badań przeanalizowano związane z tym korzyści gospodarcze i środowiskowe, a także przyszłe bariery i możliwości.

W ostatnich latach stosowanie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym stało się kluczową strategią w obliczu globalnych wyzwań związanych z niedoborem zasobów i degradacją środowiska. Producenci soków, jako część przemysłu spożywczego, mają wyjątkową pozycję do przyjęcia tych zasad ze względu na dużą ilość produktów ubocznych powstających podczas produkcji. Produkty te, często postrzegane jako odpady, mogą zostać przekształcone w cenne materiały, zmniejszając wpływ na środowisko i stwarzając możliwości gospodarcze. Zmiana ta jest nie tylko zgodna z globalnymi celami zrównoważonego rozwoju, ale także stanowi odpowiedź na rosnące zapotrzebowanie konsumentów na praktyki przyjazne dla środowiska. Wdrażając praktyki gospodarki o obiegu zamkniętym, producenci soków mogą zwiększyć swoją konkurencyjność, dostosować się do rygorystycznych przepisów środowiskowych i przyczynić się do bardziej zrównoważonej przyszłości. W niniejszym artykule omówiono praktyczne zastosowania, korzyści i wyzwania związane z wdrażaniem zasad gospodarki o obiegu zamkniętym w produkcji soków, przedstawiając najlepsze praktyki i udane studia przypadków. Według FAO każdego roku na całym świecie marnuje się około 1,3 mld ton żywności, co stanowi jedną trzecią całej żywności produkowanej do spożycia przez ludzi (FAO, 2019). Owoce i warzywa stanowią 45% całkowitej ilości odpadów spożywczych, a znaczna część z nich powstaje na etapie po zbiorach i przetwarzania (FAO, 2019).

Słowa kluczowe: gospodarka o obiegu zamkniętym, przemysł spożywczy, produkcja soków, produkty uboczne, zrównoważony rozwój, minimalizacja odpadów, innowacje technologiczne, strategie zrównoważone, konkurencyjność przedsiębiorstw, odpady spożywcze

Abstract

The circular economy represents a significant shift for food companies, including juice producers, as it optimizes resource use and minimizes waste. This article explores how the principles of the circular economy can be applied in these companies, highlighting the reuse of by-products as functional ingredients, the improvement of production processes, and the development of sustainable strategies. Through examples and recent studies, the associated economic and environmental benefits, as well as future barriers and opportunities, are examined.

In recent years, the application of circular economy principles has become a critical strategy for addressing the global challenges of resource scarcity and environmental degradation. Juice producers, as part of the food industry, are uniquely positioned to adopt these principles due to the high volume of by-products generated during production. These by-products, often seen as waste, can be transformed into valuable materials, reducing the environmental impact and creating economic opportunities. This shift not only aligns with global sustainability goals but also responds to the increasing consumer demand for environmentally friendly practices. By implementing circular economy practices, juice producers can enhance their competitiveness, comply with stringent environmental regulations, and contribute to a more sustainable future. This article delves into the practical applications, benefits, and challenges of integrating circular economy principles into juice production, providing insights into best practices and successful case studies. According to the FAO, approximately 1.3 billion tons of food are wasted globally each year, representing one-third of all food produced for human consumption (FAO, 2019). Fruits and vegetables account for 45% of total food waste, with a significant portion occurring at the post-harvest and processing stages (FAO, 2019).

Keywords: circular economy, food industry, juice production, by-products, sustainable development, waste minimization, technological innovations, sustainable strategies, business competitiveness, food waste.

Spis Treści

mgr inż. Jacek Witek

EWOLUCJA SZTUCZNEJ INTELIGENCJI.....2

Betül Çetin, M.Sc. in Business Administration

GREENWASHING IN THE CIRCULAR ECONOMY: IS EVERYTHING THAT APPEARS GREEN REALLY GREEN?..... 13

Prof. dr hab. inż. Maria Richert

ALUMINIUM – METAL PRZYSZŁOŚCI.....23

mgr inż. arch. Justyna M. Kobylarczyk, Juan José Martín Martínez

PROCESSES OF CIRCULAR ECONOMY IN FOOD COMPANIES PRODUCING JUICES.....41

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: prof. dr hab. **JOANNA KULCZYCKA**

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

Redaktor zeszytu nr 203:

prof. dr hab. **JOANNA KULCZYCKA**

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

prof. dr hab. **JOANNA KULCZYCKA**

prof. **GENNADIY PIVNYAK**

prof. **ROMAN EMILIAN DYCHKOVSKIY**

prof. **NATALIJA 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



Celem projektu **PRO-SLO** realizowanego w ramach **EIT RM**, jest wypełnienie luki między działaniami w sektorze surowców, a szeroko pojętymi zagadnieniami gospodarczymi, społecznymi i etycznymi.

Dzięki działaniom edukacyjnym rezultatem będzie przygotowanie wykwalifikowanych specjalistów, którzy pomogą w uzyskaniu społecznego przyzwolenia na działalność w tym sektorze **Social Licence to Operate, SLO**.



W ramach projektu szkoleni będą doktoranci oraz studenci studiów drugiego stopnia. Dzięki temu będą mogli w przyszłości pełnić rolę ambasadorów przemysłu surowcowego. Kluczową rolę odegra tu konsorcjum ekspertów z dziedziny **SLO**, reprezentujących różne obszary, takie jak badania, edukacja i innowacje, którzy stworzą i poprowadzą szkołę **PRO-SLO**.

Szkoła będzie oparta na nowoczesnych metodach nauczania, w tym na terenowych wycieczkach, eksperymentach behawioralnych i zadaniach praktycznych. Proces wymiany wiedzy będzie wspierany przez mentorów z przemysłu.



Zapraszamy na szkolenia - rejestracja wkrótce!

Po więcej informacji zapraszamy na naszą stronę [www](http://www.proslo.eu):

www.proslo.eu