

1 (553) 2023

Mining

**INFORMATICS AUTOMATION
AND ELECTRICAL ENGINEERING**

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

INFORMATICS
INFORMATYKA

ELECTRICAL ENGINEERING
ELEKTRONIKA

AUTOMATION
AUTOMATYKA

CZASOPISMO NAUKOWO-TECHNICZNE

Mining – Informatics Automation and Electrical Engineering



Mining

**INFORMATICS AUTOMATION
AND ELECTRICAL ENGINEERING**

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

NO. 1 (553) 2023

AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING
MECHANICAL ENGINEERING
TECHNICAL IT AND TELECOMMUNICATIONS
ENVIROMENTAL ENGINEERING, MINING AND ENERGY TECHNOLOGY
MATERIALS ENGINEERING
QUALITY MENAGEMENT

AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA
INŻYNIERIA MECHANICZNA
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA
INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICCTWO I ENERGETYKA
INŻYNIERIA MATERIAŁOWA
NAUKI O ZARZĄDZANIU I JAKOŚCI



WYDAWNICTWA AGH
KRAKÓW 2023

ISSN 2450-7326
e-ISSN 2449-6421

MINING – INFORMATICS, AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING

Published since 1962

DOI: <https://doi.org/10.7494/miag>

Chairman of the Scientific Board/ Przewodniczący Rady Naukowej:
Grzegorz Cieplok, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)

Secretary of the Scientific Board/ Sekretarz Rady Naukowej:
Tomasz Rokita, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)

Members of the Scientific Board/ Członkowie Rady Naukowej:

Dariusz Andriukaitis, Kaunas University of Technology, Kaunas (Lithuania)

Imashev Askar, Karaganda Technical University, Karaganda (Kazakhstan)

Naj Aziz, University of Wollongong, Wollongong (Australia)

Edward Chlebus, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław (Poland)

George L. Danko, University of Nevada, Reno (USA)

Jiří Fries, Technical University of Ostrava, Ostrava (Czech Republic)

Waldemar Korzeniowski, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)

Dou Lin-ming, China University of Mining and Technology, Xuzhou (China)

Arkadiusz Meżyk, Silesian University of Technology, Gliwice (Poland)

Josph Molnar, University of Miskolc, Miskolc (Hungary)

Jacek Paraszczak, Laval University, Quebec (Canada)

Liubomyr Romanyshyn, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk (Ukraine)

Sorin Mihai Radu, University of Petrosani, Petrosani (Romania)

Yuan Shujie, Anhui University of Science and Technology, Huainan (China)

Marek Sikora, Institute of Innovative Technologies EMAG, Katowice (Poland)

Radosław Zimroz, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław (Poland)

Nenad Zrnčić, University of Belgrade, Belgrade (Serbia)

Editorial staff/ Redakcja czasopisma:

Editor in Chief/ Redaktor naczelny – *Krzysztof Krauze*, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)

Deputy Editor in Chief/ Zastępca redaktora naczelnego – *Krzysztof Filipowicz*, Silesian University of Technology, Gliwice (Poland)

Managing Editor/ Kierownik redakcji – *Kamil Mucha*, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)

Manuscript Editor/ Redaktor techniczny – *Tomasz Wydro*, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)

Web Editor/ Redaktor strony internetowej – *Marcin Nawrocki*, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)

Associate editors/ Redaktorzy tematyczni:

Automation and robotics – *Jarosław Joostberens*, Silesian University of Technology, Gliwice (Poland)

Electrical engineering – *Tomasz Siostrzonek*, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)

Environmental engineering, mining and energy technology – *Horst Gondek*, VSB Technical University of Ostrava, Ostrava (Czechia)

Materials engineering – *Vitalii Panchuk*, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk (Ukraine)

Mechanical engineering – *Leonel Francisco Castañeda Herediaeradia*, EAFIT University, Medellin (Columbia)

Technical IT – *Ryszard Klempka*, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)

Telecommunications – *Antoni Wójczech*, Silesian University of Technology, Gliwice (Poland)

Quality management – *Erika Sujová*, Technical University in Zvolen, Zvolen (Slovakia)

PUBLISHER

Linguistic Corrector/ Korekta językowa: *Aedden Shaw* (English/ język angielski), *Kamila Zimnicka* (Polish/ język polski)

Desktop Publishing/ Skład komputerowy: Andre

Cover Design/ Projekt okładki i strony tytułowej: ROMEDIA-ART

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2023, Creative Commons CC-BY 4.0 License

ISSN 2449-6421 (online)

ISSN 2450-7326 (printed)

The electronic version of the journal is the primary one.

Number of copies: 55

Wydawnictwa AGH (AGH University Press)

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

tel. 12 617 32 28, 12 636 40 38

e-mail: redakcja@wydawnictwoagh.pl

www.wydawnictwo.agh.edu.pl

Table of Contents

*Janusz Zyśk, Artur Wyrwa, Maciej Raczyński, Marcin Pluta, Sabina Michalska,
Emilia Wyrwa, Tadeusz Olkusi, Wojciech Suwała*

Energy and emission balance of the Małopolskie Voivodeship in 2020	7
Bilans energetyczny i emisyjny województwa małopolskiego w 2020 roku	13

Tomasz Kuś, Navaneethan Subramanian, Paweł Madejski, Michał Karch

Assessment of the potential for CO ₂ capture using post-combustion methods	19
Ocena możliwości wychwytu CO ₂ metodami <i>post-combustion</i>	27

Richard Kandzia, Mariusz Szot

Technological aspects of mining chain production development	35
Technologiczne aspekty rozwoju produkcji górniczych łańcuchów ogniowych	45

Radosław Rejman, Karolina Greń, Rafał Żelazko, Wojciech Liwacz

The Kalman autonomous planetary rover	55
Autonomiczny łazik planetarny Kalman	63

ABSTRACTS

JANUSZ ZYŚK
ARTUR WYRWA
MACIEJ RACZYŃSKI
MARCIN PLUTA
SABINA MICHALSKA
EMILIA WYRWA
TADEUSZ OLKUSKI
WOJCIECH SUWAŁA

ENERGY AND EMISSION BALANCE OF THE MAŁOPOLSKIE VOIVODESHIP IN 2020

The article presents the energy balance for the Małopolskie Voivodeship in 2020. It shows the production, import, input and output of transformation, own consumption of power plants, combined heat and power plants, network losses and consumption in the economic sectors (industry, waste), transport (road and rail), buildings (residential and tertiary), as well as in agriculture and forestry of the following energy carriers: hard coal, crude oil and petroleum products (including gasoline, diesel, LPG), non-renewable waste, derived heat and electricity. An estimate of greenhouse gas emissions in 1990 and 2020 in the Małopolskie Voivodeship is also presented.

TOMASZ KUŚ
NAVANEETHAN SUBRAMANIAN
PAWEŁ MADEJSKI
MICHAŁ KARCH

ASSESSMENT OF THE POTENTIAL FOR CO₂ CAPTURE USING POST-COMBUSTION METHODS

The combustion of fossil fuels in the process of generating electricity causes the emission of carbon dioxide, which is considered the main anthropogenic reason for global warming. The paper's subject is to assess the potential for CO₂ capture using post-combustion methods. Post-combustion methods such as chemical absorption, physical separation, membrane separation, and chemical looping, are described. The thermodynamic modeling of a coal-fired supercritical power plant integrated with a post-combustion carbon capture installation using the solvent method is performed. The results obtained from the model are used to investigate the impact of the power plant when carbon capture is performed.

RICHARD KANDZIA
MARIUSZ SZOT

TECHNOLOGICAL ASPECTS OF MINING CHAIN PRODUCTION DEVELOPMENT

This paper presents a brief historical overview of the development and types of mining chains currently in production, as well as their contribution to the global market. The directions of development for mining link chains were identified in terms of the materials and strength parameters applied. The negative influence of certain factors that decrease the performance of mining chains are also demonstrated.

STRESZCZENIA

JANUSZ ZYŚK
ARTUR WYRWA
MACIEJ RACZYŃSKI
MARCIN PLUTA
SABINA MICHALSKA
EMILIA WYRWA
TADEUSZ OLKUSKI
WOJCIECH SUWAŁA

BILANS ENERGETYCZNY I EMISYJNY WOJEWÓDZTWA MAŁOPOLSKIEGO W 2020 ROKU

W artykule przedstawiono bilans energetyczny dla województwa małopolskiego w 2020 roku. Wskazano produkcję, import, wsad i uzysk przemian, zużycie własne elektrowni i elektrociepłowni, straty w sieci oraz zużycie w sektorze gospodarki (przemysł, odpady), transporcie (drogowym i szynowym), budynkach (mieszkalnych i usługowych), a także w rolnictwie i leśnictwie następujących nośników energii: węgla kamiennego, ropy naftowej oraz pochodnych (w tym benzyny, oleje, LPG), odpadów nieodnawialnych, ciepła systemowego i energii elektrycznej. Przedstawiono również oszacowanie emisji gazów cieplarnianych w 1990 i 2020 roku w województwie małopolskim.

TOMASZ KUŚ
NAVANEETHAN SUBRAMANIAN
PAWEŁ MADEJSKI
MICHAŁ KARCH

OCENA MOŻLIWOŚCI WYCHWYTU CO₂ METODAMI *POST-COMBUSTION*

Spalanie paliw kopalnych w procesie wytwarzania energii elektrycznej powoduje emisję dwutlenku węgla, który uważany jest za główną antropogeniczną przyczynę globalnego ocieplenia. Tematem pracy jest ocena możliwości wychwytu CO₂ metodami *post-combustion*. Scharakteryzowano ich główne rodzaje, takie jak: absorpcja chemiczna, separacja fizyczna, separacja membranaowa oraz pętla chemiczna. Przeprowadzono termodynamiczną analizę pracy nadkrytycznego bloku energetycznego zasilanego węglem i wyposażonego w instalację wychwytu CO₂ metodą rozpuszczalnikową. Na podstawie wyników modelowania oceniony został wpływ zastosowania technologii aminowej na sprawność elektrowni oraz emisję dwutlenku węgla.

RICHARD KANDZIA
MARIUSZ SZOT

TECHNOLOGICZNE ASPEKTY ROZWOJU PRODUKCJI GÓRNICZYCH ŁAŃCUCHÓW OGNIWOWYCH

W artykule przedstawiono krótką historię rozwoju, typy aktualnie produkowanych łańcuchów górniczych oraz ich udział w rynku światowym. Określono kierunki rozwoju łańcuchów ogniowych górniczych w zakresie stosowanych materiałów i parametrów wytrzymałościowych. Wykazano negatywny wpływ niektórych czynników, które obniżają własności użytkowe łańcuchów ogniowych górniczych.

*RADOSŁAW REJMAN
KAROLINA GREŃ
RAFAŁ ŻELAZKO
WOJCIECH LIWACZ*

THE KALMAN AUTONOMOUS PLANETARY ROVER

The project presented in the article is proof of the usefulness of student organizations and its effectiveness in the popularization of advanced technologies as well as future solutions in industry. A student-developed planetary rover, using a Kalman filter and other algorithms responsible for dynamic terrain mapping and pathfinding, is capable of non-collision movement in the most challenging environments. Moreover, the rover uses a 6DOF arm developed by students to undertake manual actions, such as soil sampling or maintenance tasks with ease. The invention is provided with a drill to be capable of extracting a sample from a depth of 30 cm, which is expected to greatly enhance the research of the geological history of the surveyed region. The robot has been tested numerous times at planetary rover competitions with success, proving the potential of such platforms as one of starting points in space exploration and opportunities in industrial use, especially in hard-to-reach mining areas. The featured project represents an inspiration for future young engineers and scientists by opening perspectives for implementing similar technologies for more efficient and safer operations in industry.

*RADOSŁAW REJMAN
KAROLINA GREŃ
RAFAŁ ŻELAZKO
WOJCIECH LIWACZ*

AUTONOMICZNY ŁAZIK PLANETARNY KALMAN

W artykule zaprezentowano projekt, który stanowi dowód na przydatność organizacji studenckich oraz skuteczność popularyzacji zaawansowanych technologii i rozwiązań w przemyśle przydatności. Opracowany przez studentów autonomiczny łazik planetarny, wykorzystując filtr Kalmana oraz pozostałe algorytmy odpowiedzialne między innymi za dynamiczne mapowanie terenu oraz wyznaczanie ścieżek, jest w stanie bezkolizyjnie poruszać się nawet w najbardziej wymagających środowiskach. Łazik wykorzystuje również skonstruowane przez studentów ramię 6DOF do swobodnego podejmowania zadań manualnych, takich jak pobieranie próbek gleby czy zadania naprawcze. Jest on także wyposażony w wiertło, które umożliwi pobranie próbki gleby z głębokości co najmniej 30 cm, co mocno wesprze badania historii geologicznej regionu. Robot został wielokrotnie przetestowany z sukcesem na zawodach łazików planetarnych, co potwierdza potencjał takich platform w eksploracji kosmicznej i możliwości zastosowania w przemyśle, szczególnie w trudno dostępnych obszarach górniczych. Prezentowany projekt stanowi inspirację dla przyszłych młodych inżynierów i naukowców do wykorzystania podobnych technologii w efektywniejszym i bezpieczniejszym funkcjonowaniu przemysłu.

JANUSZ ZYŚK
ARTUR WYRWA
MACIEJ RACZYŃSKI
MARCIN PLUTA
SABINA MICHALSKA
EMILIA WYRWA
TADEUSZ OLKUSKI
WOJCIECH SUWAŁA

Energy and emission balance of the Małopolskie Voivodeship in 2020

The article presents the energy balance for the Małopolskie Voivodeship in 2020. It shows the production, import, input and output of transformation, own consumption of power plants, combined heat and power plants, network losses and consumption in the economic sectors (industry, waste), transport (road and rail), buildings (residential and tertiary), as well as in agriculture and forestry of the following energy carriers: hard coal, crude oil and petroleum products (including gasoline, diesel, LPG), non-renewable waste, derived heat and electricity. An estimate of greenhouse gas emissions in 1990 and 2020 in the Małopolskie Voivodeship is also presented.

Key words: *greenhouse gas emissions, energy scenarios, energy balance*

1. INTRODUCTION

During the 21st UN Climate Conference in Paris in 2015, it was agreed that all 195 countries would present long-term scenarios to reduce greenhouse gas emissions [1]. In 2021, the European Union announced the ambitious “Fit for 55” package, which assumes reducing greenhouse gas emissions by 55% by 2030 compared to 1990 and achieving climate neutrality by 2050 [2]. This package is much more ambitious than the previous target (adopted in 2014) of reducing greenhouse gases in the EU at a level of 40% by 2030 compared to the base year of 1990 [3].

The Małopolskie Voivodeship was the first in Poland to start developing long-term plans and actions to reduce greenhouse gases. Many steps have been taken to this end, including a detailed estimate of greenhouse gas (GHG) emissions into the atmosphere together with the AGH University of Krakow. The emission of GHG was estimated for 1990 and 2018. The year 2018 was the base year for the Regional

Action Plan for Climate and Energy created in 2020 [4]. This plan assumed the implementation of the EU climate goals from 2014 (40% reduction GHG by 2030 compared to 1990).

The Faculty of Energy and Fuels of the AGH University of Krakow has also developed detailed scenarios for reducing greenhouse gas emissions in the Małopolskie Voivodeship by 2050. Four scenarios were created, taking into account the goals included in the Regional Action Plan for Climate and Energy of the Małopolskie Voivodeship (the Małopolska scenario), the National Energy and Climate Plan (the National scenario) as well as new goals under the “Fit for 55” package (the Optimistic scenario) [2, 4, 5]. Additionally, one scenario (Stagnation) assumes no active actions would be taken to reduce greenhouse gas emissions in the voivodeship. The base year for the analyses is 2020. The presented energy and emission balance prepared for 2020 were used to validate the Times-Małopolska model developed and is a starting point for the scenario analyses. The Times-Małopolska

model was developed to support the energy planning process in the Małopolskie Voivodeship. The model was built using the TIMES generator (IEA), widely used to model fuel and energy systems at various territorial scales [6]. The model is used to analyse the development of the energy system of Małopolska province in the medium and long term, including the determination of the optimal technological structure and the energy investment program for the given conditions. The following sectors were analysed in the energy and emission balances and the model: energy, transport, agriculture and forestry, economy (industry), buildings, forests, and land use.

Energy and emission balances are prepared at the national level and have been presented, among others, by the National Centre for Emissions Management (KOBiZE) and Eurostat [7]. However, there are no analyses and results at the voivodeship level in the literature and databases. As part of Air Protection Programs established at the voivodeship level, as well as locally developed (municipal, urban) plans for the supply of heat, electricity and gas fuels or low-emission economy plans, pollutant emissions and consumption of energy carriers are estimated, but they contain differently aggregated data which are often incomplete or outdated.

2. METHODOLOGY

In order to determine the value of the reduction of direct greenhouse gas emissions for the voivodeship, emissions of CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs and SF₆ were estimated for 1990 and 2020. The year 1990 is the base year for goals at the EU, national, and regional levels [2–5]. In 1990, the Małopolskie Voivodeship did not exist, and the areas of the current voivodeship (created as a result of the local government reform of 1999) belonged to the following voivodeships existing in the years 1975–1998: Kraków, Nowy Sącz, Tarnów, Bielsko, Kielce, Katowice and Krosno.

Direct emissions of the following greenhouse gases from sources located in the voivodeship were estimated: CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs, and SF₆. The following greenhouse effect potential was assumed: for CH₄ 23, for N₂O 296, SF₆ 22200, HFCs 14800 and PFCs 7390.

The energy sector includes emissions and consumption of fuel carriers, as well as energy transformation and losses in the processes of heat, cooling, and electricity production in public power plants, heating plants and CHP, as well as distribution of heating and electricity. The energy and emission bal-

ance for this sector was prepared based on data of the National Centre for Emissions Management (KOBiZE), Energy Market Agency (ARE), Central Statistical Office (GUS), Polish Power Grids (PSE), Eurostat, and others [7–16].

The economic sector includes waste management, water and sewage management and industry (including both activities covered and not covered by the EU-ETS). Emissions in this sector come from the storage and biological processing of solid waste, sewage treatment and disposal, waste incineration, industrial production, and the consumption of energy carriers. Emissions were estimated based on data from KOBiZE, GUS, and integrated environmental permits [7, 9, 15–17].

The building sector includes buildings from the tertiary sector: public buildings, non-public (commercial) buildings and residential buildings (single-family and multi-family). Public buildings include publicly accessible cultural facilities, museums, libraries, schools, research institutions, hospitals, medical care facilities, physical culture buildings, and buildings intended for religious activities. Commercial buildings include hotels and other tourist accommodation buildings, office buildings and shops, restaurants, cinemas, etc. Residential buildings are divided into three types: single-family detached houses, single-family terraced or semi-detached houses and multi-family buildings (blocks of flats). Then, these three types of buildings were divided into six groups depending on the year of construction. In both tertiary and residential, energy carriers are used for the following purposes: space heating and cooling, refrigeration equipment for food storage, food preparation equipment, lighting, hot water preparation, other household appliances, and electronics. Emissions and consumption of carriers from this sector were calculated based on data of KOBiZE, GUS, Central Registration of Building Emissions (CEEB) and others [7–9, 17–24].

The transport sector includes public (trains, trams, buses) and private. The following transport categories were considered: buses, special cars (police, military, ambulance etc) and trucks – divided into heavy and light (less than 3.5 tons), motorcycles, passenger cars, trams, passenger, and freight trains as well as regional and long-distance trains. Vehicle categories were divided into the type of fuel used, e.g., passenger cars powered by petrol, diesel, LPG, electric, hybrid, and trains powered by electric and combustion engines (diesel). For each type of vehicle and fuel, the annual mileage, number of vehicles, average number of passengers and goods in the vehicle, average fuel

consumption, etc. were assumed. Energy consumption and emissions were calculated based on the data obtained from: KOBIZE, Eurostat, GUS, city offices of Krakow and Tarnów, Railway Transport Office, General Directorate for National Roads and Highways, expert analyses of the Motor Transport Institute [7, 9, 17, 25–38]. Additionally, the consumption of energy carriers in road transport and their resulting emissions were calculated with the use of COPERT V (EU standard vehicle emissions calculator) [35]. The study does not include aviation emissions.

The agricultural sector includes emissions from field cultivation (including the use of artificial fertilizers), emissions from livestock, and emissions from the use of energy carriers. This sector includes emissions related to the consumption of tractors, harvester, heating of barns and greenhouses etc. Animal methane emissions from enteric fermentation, methane and dinitrogen oxide emissions manure management, greenhouse gas emissions from fertilization and liming of fields, and burning of agricultural residues were estimated. The calculations included domestic cattle, sheep, goats, pigs, poultry, horses, rabbits, and other fur-producing animals. Emissions from the use of energy carriers were also estimated. Data from KOBIZE, GUS, agricultural censuses, breeders' associations etc. were used [7, 9, 17, 39–43].

The forest and land use sector includes emissions related to fuel and energy consumption. Emissions were

calculated based on KOBIZE and GUS data [7, 9, 17]. In this sector, CO₂ is also intensively absorbed by forests – the results of absorption estimations are not included.

3. ENERGY BALANCE

The energy balance for the Małopolskie Voivodeship for 2020 was prepared for the following carriers: hard coal, natural gas, crude oil and petroleum products, derived heat, electricity, waste, and renewable energy sources (Fig. 1). The balance also includes the import and local use of fossil fuels, renewable energy sources, and waste [7, 10, 12, 44]. The main energy carriers in final energy consumption are petroleum products (diesel, gasoline), used mainly in the transport sector. However, hard coal is used most frequently in the voivodeship. Almost half of hard coal (51%) is an input for energy transformation, to produce electricity and heat. In the economic sector, the main energy carriers are hard coal and natural gas. The share of renewable sources in the final energy consumption in 2020 was 6%. Most renewable energy sources are used in building sector due to the significant use of PV and biomass boilers. In the Małopolskie Voivodeship, mainly hard coal is mined, which covers approximately two-thirds of the demand for this fuel. The extraction of other fuels is low.

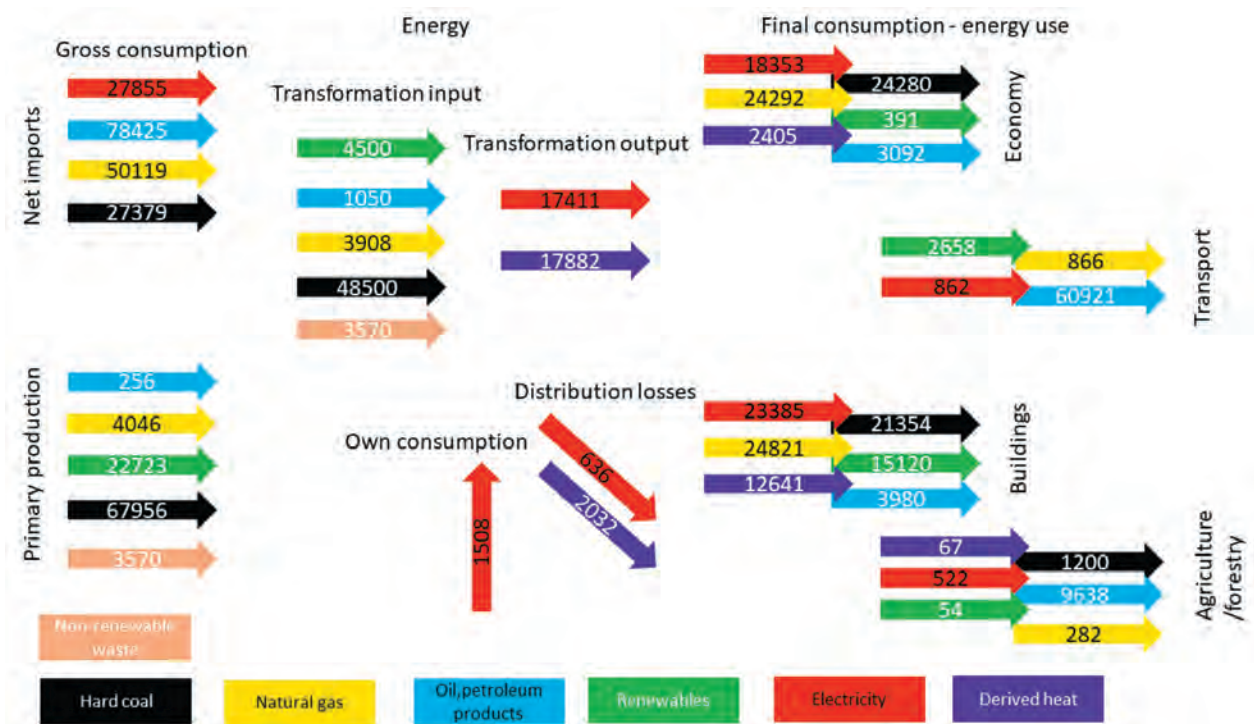


Fig. 1. Energy balance of the Małopolskie Voivodeship for 2020 [TJ].

The "Oil and petroleum products" category includes crude oil, gasoline, diesel oil and LPG

4. EMISSION BALANCE

In 1990, 27,155 kt CO₂e of greenhouse gases was emitted in Małopolskie Voivodeship, while in 2020 19,726 kt CO₂e which is a reduction of 27% (Fig. 2). The largest reduction in emissions during the considered period occurred in the energy sector, where greenhouse gas emissions decreased from more than 10 million tonnes to 4.6 million tonnes. A significant decrease in emissions, that is, by 3 million tonnes, was also observed in the economic sector. A large increase in greenhouse gas emissions is observed in the transportation sector. Between 1990 and 2020, emis-

sions in the transport sector increased significantly from 1,697 to 4,082 kt CO₂e. This is due to the increasing number of vehicles and trips with the use of private passenger cars. In the building sector, greenhouse gas emissions decreased by 13%. In this sector, quite intensive improvement in efficiency (thermo-modernisation) and the development of renewable energy sources can be observed. On the other hand, the number of apartments and houses is increasing, as well as the consumption of electricity related to the growth in quality of life. The share of carbon dioxide in total greenhouse gas emissions in the Małopolskie Voivodeship in 2020 was almost 90% (Fig. 3).

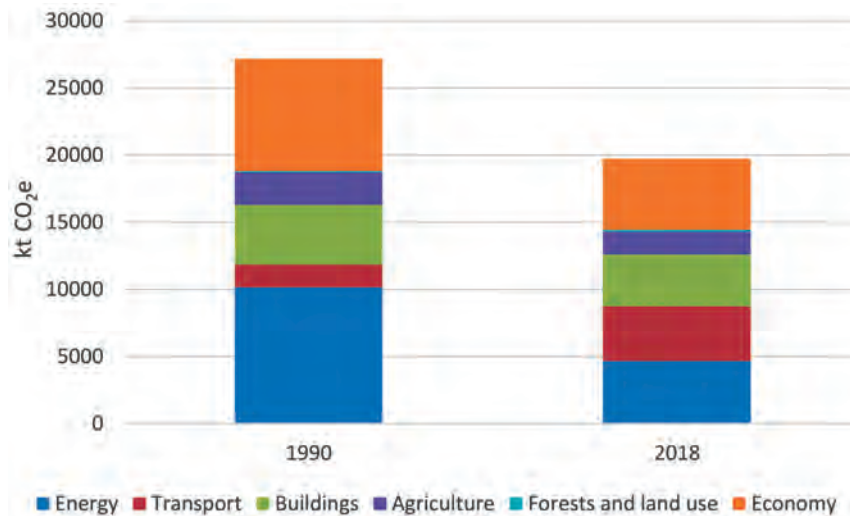


Fig. 2. Greenhouse gas emissions in the Małopolskie Voivodeship in 1990 and 2020 [kt CO₂e]

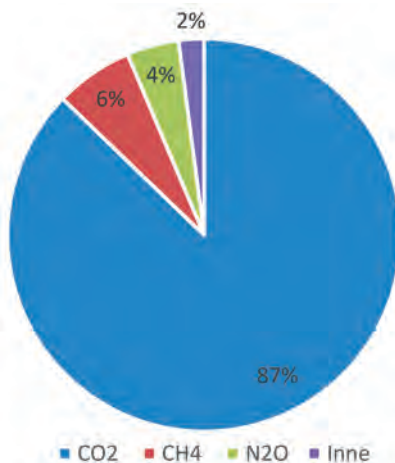


Fig. 3. Mass share (considering the greenhouse potential) of greenhouse gases emitted in 2020 in the Małopolskie Voivodeship

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The article contains the results of the energy balance for 2020 and the emission balance for 1990 and

2020 for the Małopolskie Voivodeship. The total gross supply of energy carriers was 278,758 TJ. The share of renewable sources in the voivodeship is still low. The highest final energy consumption is observed in the sector including residential, public, and non-public buildings (intended for services). In the voivodeship, the average greenhouse gas emissions per capita in 2020 were 5.78 t CO₂e, lower than the national average for Poland by over 4 t CO₂e. This difference results from large imports of electricity from outside the voivodeship. Greenhouse gas emissions in the years 1990–2020 mainly decreased in the economy and energy sectors while transport emissions are increasing rapidly. The energy and emission balances are the basis for developing energy and climate goals and long-term strategies, and also allow one to observe the progress of the implementation of local policies and goals regarding the reduction of greenhouse gases. Therefore, starting from 2018, the greenhouse gas emission balance in the Małopolskie Voivodeship has been prepared annually (the last one being in 2021).

Acknowledgements

The work was carried out as part of the LIFE-IP EKOMAŁOPOLSKA project "Implementation of the Regional Action Plan for Climate and Energy for the Małopolska Voivodeship", LIFE-IP EKOMAŁOPOLSKA/LIFE19 IPC/PL/000005, co-financed by the LIFE financial instrument under the European Union funds and National Fund for Environmental Protection and Water Management.

References

- [1] United Nations Report of the Conference of the Parties on Its Twenty-First Session, Held in Paris from 30 November to 13 December 2015. Decisions Adopted by the Conference of the Parties, The United Nations Framework Convention on Climate Change, 2016. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10.pdf>, 2023 [9.06.2022].
- [2] European Council: *Fit for 55*. <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> [3.06.2022].
- [3] European Council (23 and 24 October 2014). *Conclusions*. General Secretariat of the Council Delegations, Brussels 2014.
- [4] Regionalny plan działań dla klimatu i energii. Załącznik nr 1 do Uchwały nr 228/20 Zarządu Województwa Małopolskiego z dnia 18 lutego 2020 r. <https://powietrze.malopolska.pl/wp-content/plugins/download-attachments/includes/download.php?id=43558> [8.04.2022].
- [5] Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030. Założenia i cele oraz polityki i działania. Ministerstwo Aktywów Państwowych, Warszawa 2019.
- [6] Loulou R., Goldstein G., Kanudia A., Lettila A., Remme U.: *Documentation for the TIMES Model. Part I: Times Concepts and Theory*. 2016. https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I_July-2016.pdf [18.04.2023].
- [7] KOBIZE: *Pakiet tabel z danymi o emisjach gazów cieplarnianych w układzie Common Reporting Format (CRF)*. Zawiera szczegółowe dane o emisjach dla lat 1988–2021. Dane zostały zgłoszone do sekretariatu UNFCCC w dniu 28.03.2023. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, Warszawa 2023. <https://www.kobize.pl/enenenen/fileCategory/id/16/krajowa-inwentaryzacja-emisji> [18.04.2023].
- [8] Eurostat Energy Balances. https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy_balances/enbal.html?geo=EU27_2020&unit=KTOE&language=EN&year=2021&fuel=fuelMainFuel&siac=TOTAL&details=0&chartOptions=0&stacking=normal&chartBal=&chart=&full=0&chartBalText=&order=DESC&siacs=&dataset=nrg_bal_s&decimals=0&agregates=0&fuelList=fuelElectricity,fuelCombustible,fuelNonCombustible,fuelOtherPetroleum,fuelMainPetroleum,fuelOil,fuelOtherFossil,fuelFossil,fuelCoal,fuelMainFuel [18.04.2023].
- [9] GUS: *Zużycie paliw i nośników energii w 2020 roku*. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2021.
- [10] ARE S.A.: *Statystyka Elektroenergetyki Polskiej 2020*. Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Agencja Rynku Energii S.A., Warszawa 2020.
- [11] PSE: Dane Systemowe, Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A. <https://www.pse.pl/mapa-raportow> [13.05.2023].
- [12] Sowiżdżał A., Tomaszewska B., Pająk L., Kaczmarczyk M., Luboń W., Pelka G., Hałaj E., Hajto M., Brawiak K., Chmielowska A. et al.: *Ocena potencjału OZE w województwie małopolskim*. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, Kraków 2022.
- [13] KOBIZE: *Wartości opalowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2020 do raportowania w ramach systemu handlu uprawnieniami do emisji za rok 2023*. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, Warszawa 2022.
- [14] Eggleston S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K.: *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan 2006.
- [15] Emitor: *Emisja zanieczyszczeń środowiska w elektrowniach i elektrociepłowniach zawodowych*. Centrum Informatyki Energetyki. Zakład Energometrii, Warszawa 1993.
- [16] Emitor: *Emisja gazowych zanieczyszczeń atmosfery z elektrociepłowni i ciepłowni przemysłowych*. Centrum Informatyki Energetyki. Zakład Energometrii, Warszawa 1995.
- [17] GUS: *Bank Danych Lokalnych*. Główny Urząd Statystyczny. <https://bdl.stat.gov.pl/bdl/dane/podgrup/temat> [11.05.2023].
- [18] GUS: *Szacunki danych o zużyciu energii w gospodarstwach domowych w 2020 r.* Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2021.
- [19] GUS: *Gospodarka mieszkaniowa i infrastruktura komunalna w 2020 r.* Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2021.
- [20] *Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2021/340 z dnia 17 grudnia 2020 r. zmieniające rozporządzenia delegowane (UE) 2019/2013, (UE) 2019/2014, 2019/2014, (UE) 2019/2015, (UE) 2019/2016, (UE) 2019/2017 i (UE) 2019/2018 w odniesieniu do wymogów w zakresie etykietowania energetycznego dotyczących wyświetlaczy elektronicznych, pralek dla gospodarstw domowych i pralko-suszarek dla gospodarstw domowych, źródeł światła, urządzeń chłodniczych, zmywarek do naczyń dla gospodarstw domowych oraz urządzeń chłodniczych z funkcją sprzedaży bezpośredniej*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A32021R0340> [11.05.2023].
- [21] GUS: *Sytuacja gospodarstw domowych w 2020 r. w świetle wyników badania budżetów gospodarstw domowych*. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2021. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/warunki-zycia/dochody-wydatki-i-warunki-zycia-ludnosci/sytuacja-gospodarstw-domowych-w-2020-r-w-swietle-badania-budzetow-gospodarstw-domowych,3,20.html> [12.05.2023].
- [22] Główny Urząd Nadzoru Budowlanego: *Centralna Ewidencja Emisyjności Budynków*. <https://www.gunb.gov.pl/podmenu/1713> [8.06.2022].
- [23] GUS: *Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2019 i 2020*. Główny Urząd Statystyczny. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/gospodarka-paliwowo-energetyczna-w-latach-2019-i-2020,4,16.html> [12.05.2023].
- [24] *Rocznik Statystyczny Województwa Małopolskiego*. Zespół Redakcyjny Urzędu Statystycznego w Krakowie, Kraków 2021.
- [25] *Transport drogowy w Polsce w latach 2018 i 2019*. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa–Szczecin 2021.
- [26] *National passenger road transport performance by type of vehicles registered in the reporting country*. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ROAD_PA_MOV/default/table?lang=en%20\(accessed%20Jun.%2005.%202022\).&category=road.road_pa](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ROAD_PA_MOV/default/table?lang=en%20(accessed%20Jun.%2005.%202022).&category=road.road_pa) [2.09.2022].
- [27] *Passengers transported (detailed reporting only) – (quarterly data)*. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/rail_pa_quartal/default/table?lang=en [1.09.2022].
- [28] Gırteka: *Eurostat Goods Transported by Type of Transport*. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/RAIL_GO_TYPE-PAS_custom_3599985/default/table?lang=en [5.06.2022].
- [29] *Eurostat Road freight transport by type of operation and type of transport – (t, tkm, vehicle-km) – quarterly data*. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/road_go_tq_tot/default/table?lang=en [2.02.2022].
- [30] *Eurostat Road Traffic by Type of Vehicle (Million Vkm)*. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/road_go_tq_tot/default/table?lang=en&category=road.road_tf [5.02.2022].
- [31] Waśkiewicz J., Pawlak P.: *Prognozy eksperckie zmian aktywności sektora transportu drogowego (w kontekście ustawy o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji)*. Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa 2017. <https://www.gov.pl/attachment/c75185bb-89c3-4fc5-a0a3-fc2ee7680bf9> [12.05.2022].

- [32] UMK: *Raport o stanie Miasta 2020*. Urząd Miasta Krakowa Wydział Strategii, Planowania i Monitorowania Inwestycji Oddział Planowania Strategicznego i Analiz, Kraków 2021.
- [33] *Raport o stanie Miasta 2020*. Urząd Miasta Tarnowa, Tarnów 2021.
- [34] *Raport o stanie Miasta 2020. Załączniki*. Urząd Miasta Tarnowa, Tarnów 2021.
- [35] Zieliński J., Tutka, P., Kunikowski P., Szyszło A.: *Synteza wyników GPR 2020/21 na zamiejskiej sieci dróg krajowych*. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Heller Consult sp. z o.o., Warszawa 2021.
- [36] UTK: *Kolej w województwach – wykorzystanie i polityka transportowa*. Urząd Transportu Kolejowego, Warszawa 2019.
- [37] UTK: *Koleje pasażerskie w województwach – dynamika zmian w latach 2010–2020*. Urząd Transportu Kolejowego, Warszawa 2021.
- [38] UTK: *Podsumowanie 2021. Przewozy pasażerskie i towarowe*. Urząd Transportu Kolejowego, Warszawa 2021.
- [39] Dong H., Mangino J., McAllister T.A., Hatfield J.L., Johnson D.E., Lassek K.R., Aparecida de Lima M., Romanovskaya A.: *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 10: Emissions from Livestock and Manure Management*. IPCC, 2006.
- [40] GUS: *Zwierzęta gospodarskie w 2020 r.* Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2021.
- [41] GUS: *Powszechny spis rolny 2020*. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2023.
- [42] Związek Przedsiębiorców i Pracodawców: *Fakty o hodowli zwierząt futerkowych w Polsce*. Warszawa 2020. <https://zpp.net.pl/wp-content/uploads/2020/09/Fakty-o-hodowli-zwierz%C4%85t-futerkowych-w-Polsce-final-38.pdf> [12.05.2022].
- [43] *Sprawozdanie z działalności Krajowego Ośrodka Wsparcia Rolnictwa w 2022 roku*. Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa, Warszawa 2023.
- [44] PSG: *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2020 r.* Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2021.

JANUSZ ZYŚK, Ph.D., Eng.

jazysek@agh.edu.pl

ARTUR WYRWA, prof.

awyrwa@agh.edu.pl

MACIEJ RACZYŃSKI, M.Sc., Eng.

makracz@agh.edu.pl

MARCIN PLUTA, Ph.D., Eng.

mpluta@agh.edu.pl

SABINA MICHALSKA, M.Sc., Eng.

michalska@agh.edu.pl

EMILIA WYRWA

emiwyrwa@agh.edu.pl

TADEUSZ OLKUSKI, prof.

olkuski@agh.edu.pl

WOJCIECH SUWAŁA, prof.

suwalaw@agh.edu.pl

Faculty of Energy and Fuels

AGH University of Krakow

al. A. Mickiewicza 30,

30-059 Krakow, Poland

JANUSZ ZYŚK
ARTUR WYRWA
MACIEJ RACZYŃSKI
MARCIN PLUTA
SABINA MICHALSKA
EMILIA WYRWA
TADEUSZ OLKUSKI
WOJCIECH SUWAŁA

Bilans energetyczny i emisyjny województwa małopolskiego w 2020 roku

W artykule przedstawiono bilans energetyczny dla województwa małopolskiego w 2020 roku. Wskazano produkcję, import, wsad i uzysk przemian, zużycie własne elektrowni i elektrociepłowni, straty w sieci oraz zużycie w sektorze gospodarki (przemysł, odpady), transporcie (drogowym i szynowym), budynkach (mieszkalnych i usługowych), a także w rolnictwie i leśnictwie następujących nośników energii: węgla kamiennego, ropy naftowej oraz pochodnych (w tym benzyny, oleje, LPG), opadów nieodnawialnych, ciepła systemowego i energii elektrycznej. Przedstawiono również oszacowanie emisji gazów cieplarnianych w 1990 i 2020 roku w województwie małopolskim.

Słowa kluczowe: emisje gazów cieplarnianych, scenariusze energetyczne, bilans energii

1. WSTĘP

Podczas 21. konferencji ONZ w sprawie klimatu odbywającej się w 2015 roku w Paryżu uzgodniono, że wszystkie kraje (195) przedstawią długoterminowe scenariusze redukcji emisji gazów cieplarnianych [1]. Unia Europejska w 2021 roku ogłosiła ambitny pakiet „Fit for 55” zakładający redukcję emisji gazów cieplarnianych do roku 2030 o 55% względem roku 1990 oraz osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 roku [2]. Pakiet ten jest o wiele ambitniejszy od wcześniejszego (przyjętego w 2014 r.), zakładającego redukcję gazów cieplarnianych w UE na poziomie 40% w stosunku do roku 1990 [3].

Województwo małopolskie jako pierwsze w Polsce rozpoczęło opracowanie długoterminowych planów na rzecz redukcji gazów cieplarnianych. W tym celu podjęto wiele działań, między innymi wraz z Akademią Górniczo-Hutniczą oszacowano ilości emisji gazów cieplarnianych do atmosfery w 1990 i 2018 roku. Rok 2018 był rokiem bazowym dla powstałego w 2020 roku *Regionalnego Planu Działań dla Klimatu i Energii* [4]. Plan ten zakładał realizację ówczesnych celów

klimatycznych UE (redukcja 40% w roku 2030 w stosunku do 1990 r.).

Wydział Energetyki i Paliw Akademii Górniczo-Hutniczej opracował również szczegółowe scenariusze redukcji emisji gazów cieplarnianych w województwie małopolskim do roku 2050. Powstałe cztery scenariusze uwzględniające zarówno cele zawarte w *Regionalnym Planie Działań dla Klimatu i Energii* województwa małopolskiego (scenariusz Małopolski), *Krajowym planie na rzecz energii i klimatu* (scenariusz krajowy), jak również nowe cele w ramach pakietu „Fit for 55” (scenariusz optymistyczny) [2, 4, 5]. Dodatkowo jeden scenariusz (stagnacji) zakłada brak aktywnych działań redukujących emisję gazów cieplarnianych w województwie. Rokiem bazowym dla analiz jest rok 2020. Dla tego roku wykonano zaprezentowany bilans energetyczny i emisyjny, który służy do walidacji opracowanego modelu Times-Małopolska oraz jest punktem wyjścia do analiz scenariuszowych. Model Times-Małopolska został opracowany w celu wsparcia procesu planowania energetycznego w województwie małopolskim. Zbudowano go przy użyciu generatora TIMES (IEA) powszechnie wykorzystywanego

do modelowania systemów paliwo-energetycznych różnej skali terytorialnej [6]. Model przeznaczony jest do analiz rozwojowych systemu energetycznego województwa małopolskiego w średnim i długim okresie, w tym do wyznaczania optymalnej struktury technologicznej i optymalnego programu inwestycji energetycznych dla zadanych warunków rozwoju. W bilansie energetycznym, emisyjnym oraz modelu poddano analizie następujące sektory: energii, transportu, rolnictwa i leśnictwa, gospodarki (przemysłu), budynków, lasów i użytkowania terenu.

Bilanse energetyczne i emisyjne są opracowywane na poziomie krajowym i prezentowane między innymi przez Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBIZE) i Eurostat [7, 8]. W literaturze oraz bazach danych brak jest jednak analiz i wyników na poziomie województw. W ramach programów ochrony powietrza powstających na poziomie województw, a także opracowywanych lokalnie (gminnych, miejskich) planów zaopatrzenia w ciepło, energię elektryczną i paliwa gazowe lub planów gospodarki niskoemisyjnej, są wyliczone emisje zanieczyszczeń i zużycie nośników, jednak zawierają one dane różnie zagregowane, często niepełne lub odległe czasowo.

2. METODOLOGIA

W celu wyznaczenia wartości redukcji emisji bezpośredniej gazów cieplarnianych dla województwa opracowano dane emisyjne CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs i SF₆ dla lat 1990 i 2020. Rok 1990 jest rokiem bazowym dla celów na poziomie unijnym, krajowym i regionalnym [2–5]. W 1990 roku nie istniało województwo małopolskie, a tereny dzisiejszego województwa (powstałego w wyniku reformy samorządowej z 1999 roku) należały do następujących województw istniejących w latach 1975–1998: krakowskiego, nowosądeckiego, tarnowskiego, bielskiego, kieleckiego, katowickiego oraz krośnieńskiego.

Oszacowano emisję bezpośrednio występujących na terenie województwa następujących gazów cieplarnianych: CO₂, CH₄, N₂O, HFCs, PFCs i SF₆. Założono następujący potencjał tworzenia efektu cieplarnianego: dla CH₄ 23, dla N₂O 296, SF₆ 22200, HFCs 14800 oraz PFCs 7390.

Sektor energii obejmuje emisje oraz zużycie nośników paliw, a także transformację i straty energii w procesach produkcji ciepła, chłodu i energii elektrycznej w elektrowniach, ciepłowniach i elektrociepłowniach zawodowych oraz dystrybucji w sieciach ciepłowniczych i elektroenergetycznych. Bilans energetyczny oraz emisyjny dla tego sektora przygotowa-

no na podstawie danych Krajowego Ośrodka Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBIZE), Agencji Rynku Energii (ARE), Głównego Urzędu Statystycznego (GUS), Polskich Sieci Elektroenergetycznych (PSE), Eurostat i innych [7–16].

Do sektora gospodarki zalicza się gospodarkę odpadami, gospodarkę wodno-ściekową oraz przemysł (w tym zarówno działalności objęte, jak i nieobjęte EU-ETS). Emisje w tym sektorze pochodzą ze składowania oraz biologicznego przetwarzania odpadów stałych, oczyszczania i odprowadzania ścieków, spalania odpadów, produkcji przemysłowej oraz zużycia nośników energii. Emisje oszacowano na podstawie danych KOBIZE, GUS oraz pozwoleń zintegrowanych [7, 9, 15–17].

Sektor budownictwa obejmuje budynki mieszkalne (jednorodzinne i wielorodzinne) oraz usługowe: użyteczności publicznej i niepublicznej (komercyjne). W skład budynków użyteczności publicznej wchodzi: ogólnodostępne obiekty kulturalne, muzea, biblioteki, szkoły, instytucje badawcze, szpitale, zakłady opieki medycznej, budynki kultury fizycznej, budynki przeznaczone do sprawowania kultu religijnego i czynności religijnych. Budynki komercyjne to: hotele i inne budynki zakwaterowania turystycznego, budynki biurowe i handlowo-usługowe. Budynki mieszkalne zostały podzielone na trzy rodzaje: domy jednorodzinne wolnostojące, domy jednorodzinne w zabudowie szeregowej lub bliźniaczej oraz budynki wielorodzinne (bloki). Następnie te trzy rodzaje budynków zostały podzielone na sześć grup w zależności od roku budowy. Zarówno w usługach, jak i w mieszkalnictwie nośniki energii wykorzystywane są w następujących kierunkach: ogrzewanie i chłodzenie pomieszczeń, urządzenia chłodnicze do przechowywania żywności, sprzęty do przygotowania żywności, oświetlenie, przygotowanie ciepłej wody użytkowej, inne urządzenia RTV i AGD. Emisje oraz zużycie nośników z tego sektora obliczono na podstawie danych KOBIZE, GUS, Centralnej Ewidencji Emisyjności Budynków (CEEB) i innych [7–9, 17–24].

Sektor transportu obejmuje transport publiczny/zbiorowy (w tym kolej i komunikację miejską) oraz transport prywatny. Uwzględniono następujące technologie transportowe: autobusy, samochody specjalne oraz ciężarówki – z podziałem na cięższe i lżejsze (poniżej 3,5 Mg), motocykle, samochody osobowe, tramwaje, pociągi osobowe i towarowe oraz regionalne i dalekobieżne. Poszczególne kategorie pojazdów zostały dalej podzielone na rodzaj używanego paliwa, np. samochody osobowe na benzynowe, diesel, LPG, elektryczne, hybrydowe, natomiast pociągi na elektryczne i spalinowe (diesel). Dla każdego rodzaju po-

jazdu i paliwa założono roczny przebieg, liczbę pojazdów, średnią liczbę pasażerów i towarów w pojeździe, średnie spalanie itp. Zużycie nośników energii oraz emisje obliczono na podstawie danych: KOBIZE, Eurostat, GUS, urzędów miejskich Krakowa i Tarnowa, Urzędu Transportu Kolejowego, Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, opracowań eksperckich Instytutu Transportu Samochodowego [7, 9, 17, 25–38]. Przeprowadzono również obliczenia modelem COPERT V [35]. W opracowaniu nie uwzględniono emisji lotniczych.

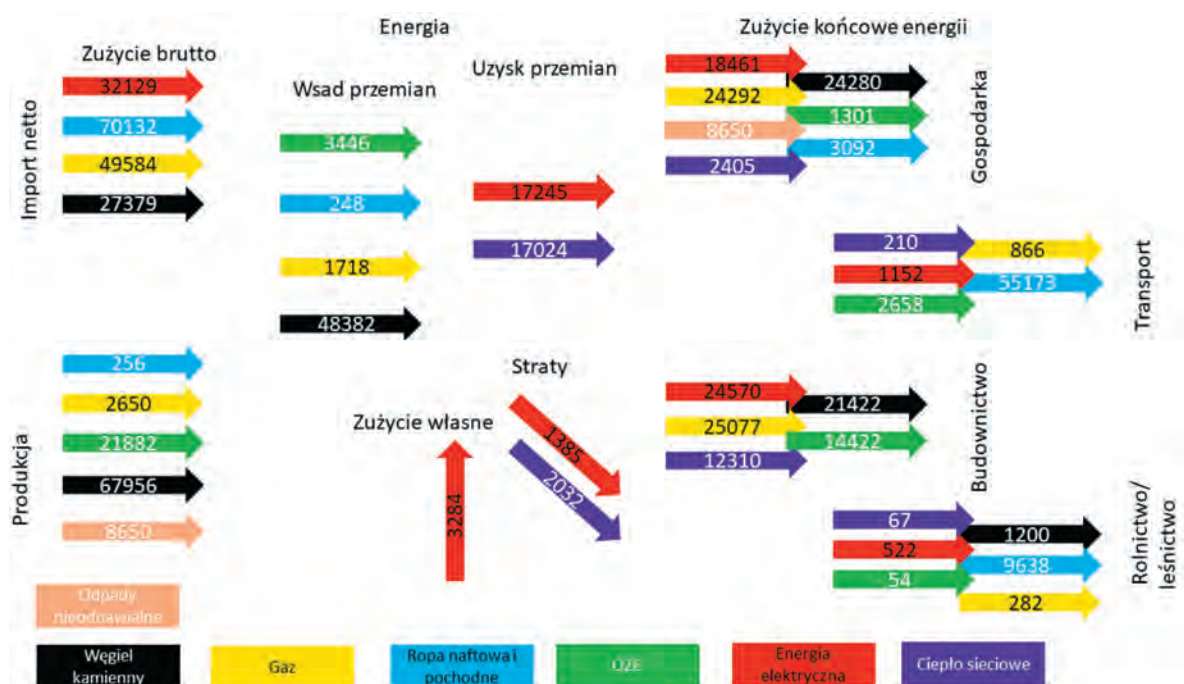
W sektorze rolnictwa ujęto emisje: z upraw pól (w tym wykorzystanie nawozów sztucznych), z hodowli zwierząt oraz emisje z wykorzystania nośników energii. W sektorze tym ujęte są emisje związane z użytkowaniem ciągników, kombajnów, ogrzewaniem obór, szklarni itp. Oszacowano: emisje metanu przez zwierzęta w wyniku fermentacji jelitowej, emisje metanu i tlenu diazotu przez procesy związane z obornikiem, emisje gazów cieplarnianych z nawożenia i wapniowania pól oraz spalania pozostałości rolniczych. W obliczeniach uwzględniono bydło domowe, owce, kozy, trzodę chlewną, drób, konie, króliki i inne zwierzęta futerkowe. Oszacowano również emisję z wykorzystania nośników energii. Skorzystano z danych KOBIZE, GUS, spisów rolnych, stowarzyszeń hodowców zwierząt itp. [7, 9, 17, 39–43].

Sektor lasy i użytkowanie terenu obejmuje emisje związane ze zużyciem paliw i energii. Emisje policzono na podstawie danych KOBIZE i GUS [7, 9, 17]. W tym sektorze również następuje intensywne pochła-

nianie CO₂ przez lasy – wyniki oszacowań pochłaniania nie zostały zaprezentowane.

3. BILANS ENERGETYCZNY

Bilans energetyczny w przypadku województwa małopolskiego za 2020 rok został opracowany dla następujących nośników: węgla kamiennego, gazu ziemnego, ropy naftowej wraz z pochodnymi, ciepła sieciowego, energii elektrycznej, odpadów oraz odnawialnych źródeł energii (rys. 1). W bilansie oprócz wykorzystania nośników energii w poszczególnych sektorach uwzględniono również lokalne wydobycie zasobów kopalnianych, OZE oraz odpadów [7, 10, 12, 44]. Głównym nośnikiem energii w końcowym zużyciu są pochodne ropy naftowej (olej napędowy, benzyna), stosowane głównie w transporcie. Natomiast najczęściej w województwie używa się węgla kamiennego – prawie połowa (51%) jest wsadem do przemian energetycznych, których produktem jest energia elektryczna i ciepło sieciowe. W gospodarce głównymi nośnikami energii są węgiel kamienny i gaz ziemny. Udział odnawialnych źródeł w końcowym zużyciu energii w 2020 roku był na poziomie 6%. Najwięcej OZE jest wykorzystywanych w budownictwie ze względu na popularność paneli fotowoltaicznych i kotłów na biomasę. W województwie małopolskim wydobywa się głównie węgiel kamienny, który pokrywa około dwóch trzecich zapotrzebowania na ten nośnik. Wydobycie innych paliw jest niewielkie.



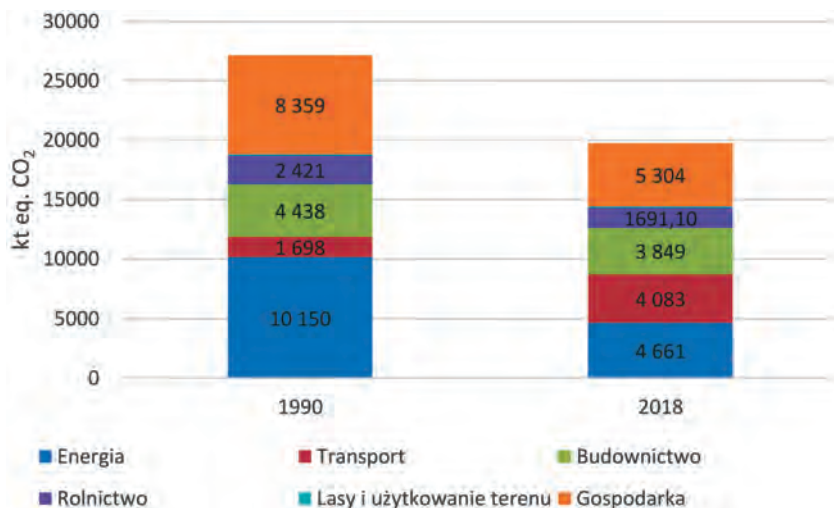
Rys. 1. Bilans energetyczny województwa małopolskiego (stan na 2020 r.) [TJ].

W kategorii „Ropa naftowa i pochodne” znajduje się ropa naftowa, benzyna oraz olej napędowy, LPG

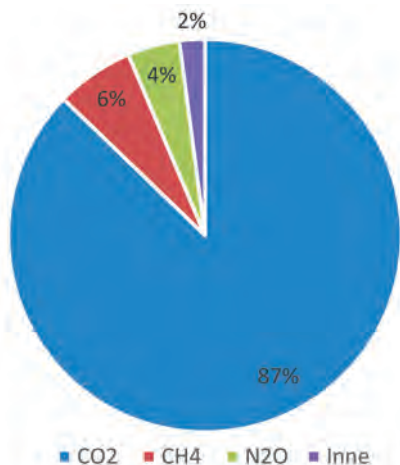
4. BILANS EMISYJNY

W 1990 roku w województwie małopolskim wyemitowano 27 155 kt ekw. CO₂ gazów cieplarnianych, natomiast w 2020 roku 19 726 kt ekw. CO₂, co stanowi redukcję o 27% (rys. 2). Największa redukcja emisji w rozpatrywanym czasie nastąpiła w sektorze energii, gdzie emisje gazów cieplarnianych zmalały z ponad 10 milionów ton do 4,6 miliona ton. Znaczący spadek emisji, tj. 3 miliony ton nastąpił również w sektorze gospodarki. Duży wzrost emisji gazów cieplarnianych obserwowany jest dla sektora transportu. W rozpatry-

wanych latach w sektorze tym emisja wzrosła z 1697 do aż 4082 kt ekw. CO₂. Jest to spowodowane zwiększającą się liczbą samochodów i podróży autami prywatnymi. W sektorze budownictwa emisja gazów cieplarnianych zmalała o 13%. W sektorze tym z jednej strony następuje dość intensywna poprawa efektywności (termomodernizacja) oraz rozwój OZE, z drugiej strony zwiększa się liczba mieszkań i domów, a także zużycie energii elektrycznej związane z podwyższeniem standardu życia. Prawie 90% emisji gazów cieplarnianych w województwie małopolskim w 2020 roku stanowił dwutlenek węgla (rys. 3).



Rys. 2. Emisja gazów cieplarnianych w województwie małopolskim w 1990 i 2020 roku z poszczególnych sektorów [kt ekw. CO₂]



Rys. 3. Udział masowy (z uwzględnieniem potencjału cieplarnianego) poszczególnych gazów cieplarnianych emitowanych w 2020 roku w województwie małopolskim

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Praca zawiera wyniki bilansu energetycznego za rok 2020 i emisyjnego województwa małopolskiego

za lata 1990 i 2020. Całkowita podaż brutto nośników energii wyniosła 285 155 TJ. Wciąż w województwie zużywa się mało energii pochodzącej z odnawialnych źródeł. Największe zużycie końcowe energii obserwowane jest w sektorze obejmującym budynki zarówno mieszkalne, użyteczności publicznej, jak i niepublicznej (przeznaczone na usługi). W województwie średnia emisja gazów cieplarnianych na mieszkańca w 2020 roku wyniosła 5,78 t ekw. CO₂ i była niższa od średniej dla Polski o ponad 4 t ekw. CO₂. Różnica ta wynika z dużego importu energii elektrycznej spoza województwa. Emisja gazów cieplarnianych w latach 1990–2020 zmniejszyła się głównie w sektorze gospodarki i energii. Intensywnie wzrasta emisja z transportu. Bilans energetyczny i emisyjny jest podstawą do wyznaczania działań i celów energetyczno-klimatycznych oraz opracowania długoterminowych strategii, a także pozwala na śledzenie realizacji lokalnych polityk i celów odnośnie do redukcji gazów cieplarnianych. Dlatego też począwszy od roku 2018 w województwie małopolskim bilans emisyjny gazów cieplarnianych jest wyznaczany corocznie (ostatni dla roku 2022).

Podziękowania

Prace zostały wykonane w ramach realizacji projektu LIFE-IP EKOMAŁOPOLSKA „Wdrażanie Regionalnego Planu Działań dla Klimatu i Energii dla województwa małopolskiego”, LIFE-IP EKOMALOPOLSKA/LIFE19 IPC/PL/000005, współfinansowanego ze środków instrumentu finansowego LIFE w ramach środków Unii Europejskiej i NFOŚiGW.

Literatura

- [1] *United Nations Report of the Conference of the Parties on Its Twenty-First Session, Held in Paris from 30 November to 13 December 2015*. Decisions Adopted by the Conference of the Parties, The United Nations Framework Convention on Climate Change, 2016. <https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/10.pdf>, 2023 [9.06.2022].
- [2] European Council: *Fit for 55*. <https://www.consilium.europa.eu/pl/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/> [3.06.2022].
- [3] *European Council (23 and 24 October 2014). Conclusions*. General Secretariat of the Council Delegations, Brussels 2014.
- [4] *Regionalny plan działań dla klimatu i energii. Załącznik nr 1 do Uchwały nr 228/20 Zarządu Województwa Małopolskiego z dnia 18 lutego 2020 r.* <https://powietrze.malopolska.pl/wp-content/plugins/download-attachments/includes/download.php?id=43558> [8.04.2022].
- [5] *Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030. Założenia i cele oraz polityki i działania*. Ministerstwo Aktywów Państwowych, Warszawa 2019.
- [6] Loulou R., Goldstein G., Kanudia A., Lettila A., Remme U.: *Documentation for the TIMES Model. Part I: Times Concepts and Theory*. 2016. https://iea-etsap.org/docs/Documentation_for_the_TIMES_Model-Part-I_July-2016.pdf [18.04.2023].
- [7] KOBIZE: *Pakiet tabel z danymi o emisjach gazów cieplarnianych w układzie Common Reporting Format (CRF). Zawiera szczegółowe dane o emisjach dla lat 1988–2021. Dane zostały zgłoszone do sekretariatu UNFCCC w dniu 28.03.2023*. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, Warszawa 2023. <https://www.kobize.pl/enenenen/fileCategory/id/16/krajowa-inwentaryzacja-emisji> [18.04.2023].
- [8] Eurostat Energy Balances. https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy_balances/enbal.html?geo=EU27_2020&unit=KTOE&language=EN&year=2021&fuel=fuelMainFuel&siacs=TOTAL&details=0&chartOptions=0&stacking=normal&chartBal=&chart=&full=0&chartBalText=&order=DESC&siacs=&dataset=nrg_bal_s&decimals=0&agregates=0&fuelList=fuelElectricity,fuelCombustible,fuelNonCombustible,fuelOtherPetroleum,fuelMainPetroleum,fuelOil,fuelOtherFossil,fuelFossil,fuelCoal,fuelMainFuel [18.04.2023].
- [9] GUS: *Zużycie paliw i nośników energii w 2020 roku*. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2021.
- [10] ARE S.A.: *Statystyka Elektroenergetyki Polskiej 2020*. Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Agencja Rynku Energii S.A., Warszawa 2020.
- [11] PSE: *Dane Systemowe, Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A.* <https://www.pse.pl/mapa-raportow> [13.05.2023].
- [12] Sowizdał A., Tomaszewska B., Pająk L., Kaczmarczyk M., Luboń W., Pełka G., Hałaj E., Hajto M., Brawiak K., Chmielowska A. et al.: *Ocena potencjału OZE w województwie małopolskim*. Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych: Kraków 2022.
- [13] KOBIZE: *Wartości opałowe (WO) i wskaźniki emisji CO₂ (WE) w roku 2020 do raportowania w ramach systemu handlu uprawnieniami do emisji za rok 2023*. Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, Warszawa 2022.
- [14] Eggleston S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K.: *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Institute for Global Environmental Strategies. Hayama, Japan 2006.
- [15] Emitor: *Emisja zanieczyszczeń środowiska w elektrowniach i elektrociepłowniach zawodowych*. Centrum Informatyki Energetyki. Zakład Energoometrii, Warszawa 1993.
- [16] Emitor: *Emisja gazowych zanieczyszczeń atmosfery z elektrociepłowni i ciepłowni przemysłowych*. Centrum Informatyki Energetyki. Zakład Energoometrii, Warszawa 1995.
- [17] GUS: *Bank Danych Lokalnych*. Główny Urząd Statystyczny. <https://bdl.stat.gov.pl/bdl/dane/podgrup/temat> [11.05.2023].
- [18] GUS: *Szacunki danych o zużyciu energii w gospodarstwach domowych w 2020 r.* Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2021.
- [19] GUS: *Gospodarka mieszkaniowa i infrastruktura komunalna w 2020 r.* Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2021.
- [20] *Rozporządzenie delegowane Komisji (UE) 2021/340 z dnia 17 grudnia 2020 r. zmieniające rozporządzenia delegowane (UE) 2019/2013, (UE) 2019/2014, 2019/2014, (UE) 2019/2015, (UE) 2019/2016, (UE) 2019/2017 i (UE) 2019/2018 w odniesieniu do wymogów w zakresie etykietowania energetycznego dotyczących wyświetlaczy elektronicznych, pralek dla gospodarstw domowych i pralko-suszarek dla gospodarstw domowych, źródeł światła, urządzeń chłodniczych, zmywarek do naczyń dla gospodarstw domowych oraz urządzeń chłodniczych z funkcją sprzedaży bezpośredniej*. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/?uri=CELEX%3A32021R0340> [11.05.2023].
- [21] GUS: *Sytuacja gospodarstw domowych w 2020 r. w świetle wyników badania budżetów gospodarstw domowych*. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2021. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/warunki-zycia/dochody-wydatki-i-warunki-zycia-ludnosci/sytuacja-gospodarstw-domowych-w-2020-r-w-swietle-badania-budzetow-gospodarstw-domowych,3,20.html> [12.05.2023].
- [22] Główny Urząd Nadzoru Budowlanego: *Centralna Ewidencja Emisyjności Budynków*. <https://www.gunb.gov.pl/podmenu/1713> [8.06.2022].
- [23] GUS: *Gospodarka paliwowo-energetyczna w latach 2019 i 2020*. Główny Urząd Statystyczny. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/gospodarka-paliwowo-energetyczna-w-latach-2019-i-2020,4,16.html> [12.05.2023].
- [24] *Rocznik Statystyczny Województwa Małopolskiego*. Zespół Redakcyjny Urzędu Statystycznego w Krakowie, Kraków 2021.
- [25] *Transport drogowy w Polsce w latach 2018 i 2019*. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa–Szczecin 2021.
- [26] *National passenger road transport performance by type of vehicles registered in the reporting country*. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ROAD_PA_MOV/default/table?lang=en%20\(accessed%20Jun.%2005,%202022\).&category=road.road_pa](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/ROAD_PA_MOV/default/table?lang=en%20(accessed%20Jun.%2005,%202022).&category=road.road_pa) [2.09.2022].
- [27] *Passengers transported (detailed reporting only) – (quarterly data)*. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/rail_pa_quartal/default/table?lang=en [1.09.2022].
- [28] Gırteka: *Eurostat Goods Transported by Type of Transport*, https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/RAIL_GO_TYPE-PAS_custom_3599985/default/table?lang=en [5.06.2022].
- [29] *Eurostat Road freight transport by type of operation and type of transport – (t, tkm, vehicle-km) – quarterly data*. https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/road_go_tq_tott/default/table?lang=en [2.02.2022].
- [30] *Eurostat Road Traffic by Type of Vehicle (Million Vkm)*. http://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/road_go_tq_tott/default/table?lang=en&category=road.road_tf [5.02.2022].
- [31] Waśkiewicz J., Pawlak P.: *Prognozy eksperckie zmian aktywności sektora transportu drogowego (w kontekście ustawy o systemie zarządzania emisjami gazów cieplarnianych i innych substancji)*. Instytut Transportu Samochodowego, Warszawa 2017. <https://www.gov.pl/attachment/c75185bb-89c3-4fc5-a0a3-fc2ee7680bf9> [12.05.2022].

- [32] UMK: *Raport o stanie Miasta 2020*. Urząd Miasta Krakowa Wydział Strategii, Planowania i Monitorowania Inwestycji Oddział Planowania Strategicznego i Analiz, Kraków 2021.
- [33] *Raport o stanie Miasta 2020*. Urząd Miasta Tarnowa, Tarnów 2021.
- [34] *Raport o stanie Miasta 2020. Załączniki*. Urząd Miasta Tarnowa, Tarnów 2021.
- [35] Zieliński J., Tutka, P., Kunikowski P., Szyszło A.: *Synteza wyników GPR 2020/21 na zamiejskiej sieci dróg krajowych*. Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Heller Consult sp. z o.o., Warszawa 2021.
- [36] UTK: *Kolej w województwach – wykorzystanie i polityka transportowa*. Urząd Transportu Kolejowego, Warszawa 2019.
- [37] UTK: *Koleje pasażerskie w województwach – dynamika zmian w latach 2010–2020*. Urząd Transportu Kolejowego, Warszawa 2021.
- [38] UTK: *Podsumowanie 2021. Przewozy pasażerskie i towarowe*. Urząd Transportu Kolejowego, Warszawa 2021.
- [39] Dong H., Mangino J., McAllister T.A., Hatfield J.L., Johnson D.E., Lassek K.R., Aparecida de Lima M., Romanovskaya A.: *IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Chapter 10: Emissions from Livestock and Manure Management*. IPCC, 2006.
- [40] GUS: *Zwierzęta gospodarskie w 2020 r.* Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2021.
- [41] GUS: *Powszechny spis rolny 2020*. Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2023.
- [42] Związek Przedsiębiorców i Pracodawców: *Fakty o hodowli zwierząt futerkowych w Polsce*. Warszawa 2020. <https://zpp.net.pl/wp-content/uploads/2020/09/Fakty-o-hodowli-zwierz%C4%85t-futerkowych-w-Polsce-final-38.pdf> [12.05.2022].
- [43] *Sprawozdanie z działalności Krajowego Ośrodka Wsparcia Rolnictwa w 2022 roku*. Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa, Warszawa 2023.
- [44] PSG: *Bilans zasobów złóż kopalin w Polsce wg stanu na 31 XII 2020 r.* Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, Warszawa 2021.

dr inż. JANUSZ ZYŚK

jazysek@agh.edu.pl

dr hab. inż. ARTUR WYRWA, prof. AGH

awyrwa@agh.edu.pl

mgr inż. MACIEJ RACZYŃSKI

makracz@agh.edu.pl

dr inż. MARCIN PLUTA

mpluta@agh.edu.pl

mgr inż. SABINA MICHALSKA

michalska@agh.edu.pl

EMILIA WYRWA

emiwyrwa@agh.edu.pl

dr hab. inż. TADEUSZ OLKUSKI, prof. AGH

olkuski@agh.edu.pl

prof. dr hab. inż. WOJCIECH SUWAŁA

suwalaw@agh.edu.pl

Wydział Energetyki i Paliw

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

TOMASZ KUŚ
NAVANEETHAN SUBRAMANIAN
PAWEŁ MADEJSKI
MICHAŁ KARCH

Assessment of the potential for CO₂ capture using post-combustion methods

The combustion of fossil fuels in the process of generating electricity causes the emission of carbon dioxide, which is considered the main anthropogenic reason for global warming. The paper's subject is to assess the potential for CO₂ capture using post-combustion methods. Post-combustion methods such as chemical absorption, physical separation, membrane separation, and chemical looping, are described. The thermodynamic modeling of a coal-fired supercritical power plant integrated with a post-combustion carbon capture installation using the solvent method is performed. The results obtained from the model are used to investigate the impact of the power plant when carbon capture is performed.

Key words: CO₂ emissions, PCCS, amine technologies

1. INTRODUCTION

Reducing CO₂ emissions is a crucial part of contemporary energy policy. To reduce the negative impact of climate change, 195 countries signed the Paris Agreement. This agreement defines achieving climate neutrality by 2050 as essential [1]. Considering all greenhouse gases, CO₂ is perceived as the main emission caused by human activity, in which 40% of the global emissions of CO₂ are connected with fossil fuel-fired power generation [2]. Despite a significant increase in the share of renewable energy power generation in total energy production, global CO₂ emissions from power generation and industrial processes reached the highest level in 2022: 36.8 Gt CO₂ [3]. Considering the last several years in Poland, a significant decrease in CO₂ emissions of 16% from fossil fuel-fired power generation and a slight increase in CO₂ emission of 2% from industrial processes can be observed, respectively, by comparing the years 2021 and 2005 [4]. The European Union introduced

an emission trading system to promote a gradual and rational reduction of greenhouse gas emissions. The system is based on a financial mechanism (the purchase and sale of emissions) that forces countries to develop and use low-emission technologies.

The aforementioned ecological and political factors make the reduction of CO₂ emissions one of the most important scientific and research challenges. In countries where power is mainly produced based on fossil fuels, CCUS (Carbon, Capture, Utilization and Storage) technology is a promising option to overcome this problem. This technology aims to reduce emissions by capturing carbon dioxide and then storing or converting it into other useful products [5]. In the case of CCUS technology, three basic methods of CO₂ capture can be distinguished: pre-combustion, post-combustion, and oxy-combustion [6, 7].

The post-combustion method is the most suitable for use in existing installations. This solution seems to be particularly important in the Polish power system, where coal and lignite-based units predominate.

Despite the rapid development of renewable energy systems, fossil fuels will be the basic energy carrier in the Polish power system for a long time [8].

2. POST COMBUSTION CO₂ SEPARATION TECHNOLOGIES

Post-combustion carbon capture methods are based on capturing carbon dioxide from the exhaust gas from fuel combustion. The technology scheme is presented in Figure 1. Exhaust gas produced as a result of fuel combustion is initially purified by the removal of nitrogen, sulfur and dust, and then directed to the CO₂ capture installation. The gas consists mainly of nitrogen and carbon dioxide, with a concentration of carbon dioxide about 4–14% [9]. This results in a low CO₂ partial pressure in the gas mixture and complicates the separation process. An additional challenge related to the design of this type of installation is the high temperature of the exhaust gases.

The main advantage of the post-combustion method is the possibility of using it in both new and existing installations without introducing drastic changes [10]. In addition, it is possible to achieve purity of the produced carbon dioxide above 99% [11]. Units with post-combustion installation are highly flexible: it is possible to regulate the amount of the captured CO₂ as well as to completely disable the capture, which enables the control of power plant power per market demand [12].

Post-combustion installations should be designed to achieve the lowest possible carbon dioxide emission at the lowest energy cost. Depending on the method of carbon dioxide capture, the following separation methods can be distinguished in the post-combustion technology: chemical absorption, physical separation, membrane separation and chemical looping.

Physical separation uses the phenomenon of absorption, adsorption or cryogenic separation [7]. Physical adsorption is based on the use of porous materials such as activated carbon, silica, zeolites or organometallic frameworks (MOFs) [13]. In case of membrane separation, a membrane is used for the separation or absorption process. Membrane separation is usually connected with low energy consumption, low operating costs and the possibility of easy scalability [14]. The method of fuel combustion in a chemical loop is based on the use of two reactors: air and fuel, and a metal oxide compound circulating between them. The metal oxide is a source of oxygen during the combustion reaction. As a result of combustion in pure oxygen, the flue gases consist mainly of carbon dioxide and steam [15].

Carbon dioxide separation using chemical absorption uses a chemical reaction between CO₂ and solvent. This method is characterized by high investment and operating costs [16]. Chemical absorption based on the use of amines is considered to be the most mature CO₂ separation technology [17]. Its application covers mainly pilot power plants [18–21].

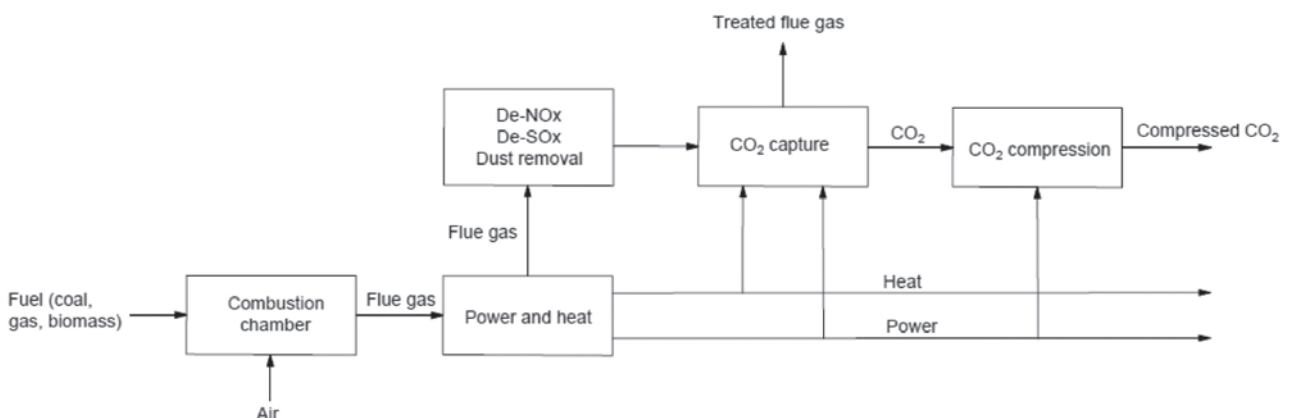


Fig. 1. Post-combustion technology scheme [6]

3. CHEMICAL ABSORPTION

Separation of carbon dioxide using chemical absorption is based on the reaction between the carbon dioxide contained in the flue gas and the chemical solvent in the absorption column. Amines, aque-

ous ammonia solution and potassium carbonate are used as solvents [22]. The reaction products of amines and carbon dioxide are carbamates or bicarbonates.

Considering power-generation and industrial processes, the following ethanolamines are widely used:

MEA monoethanolamine, DEA diethanolamine and MDEA methyl diethanolamine. The main advantage of ethanolamines is their high ability to capture CO₂, while the main weakness is the high energy consumption of the regeneration process. In addition, amines are easily oxidized, which results in the formation of corrosive compounds such as carboxylic acids or ammonia. It is necessary to use the appropriate concentration of amines to avoid their degradation. Research is being conducted on improving the efficiency of capture and reducing the energy consumption of the process by selecting appropriate mixtures of chemical solvents [23].

The scheme of the chemical absorption process using amines is shown in Figure 2. After passing through the boiler, flue gases are directed to the ab-

sorber chamber. A chemical reaction takes place with the solvent, which absorbs CO₂. The solvent is typically a 30% aqueous solution of ethanolamines [24, 25]. The solvent enriched with carbon dioxide is directed to the stripper (desorber), where the regeneration process takes place. The stripper is made of two vertical columns. After passing through one of them and preheating, the solvent is directed to the reboiler. By supplying steam, the temperature of the solvent rises to a level that allows separation. Water vapor and carbon dioxide flows upwards, and the regenerated liquid solvent flows downwards, before being cooled and directed back to the absorber. The mixture of steam and carbon dioxide is cooled, which allows for steam condensation and separation. Next, the carbon dioxide is compressed to a storage pressure level.

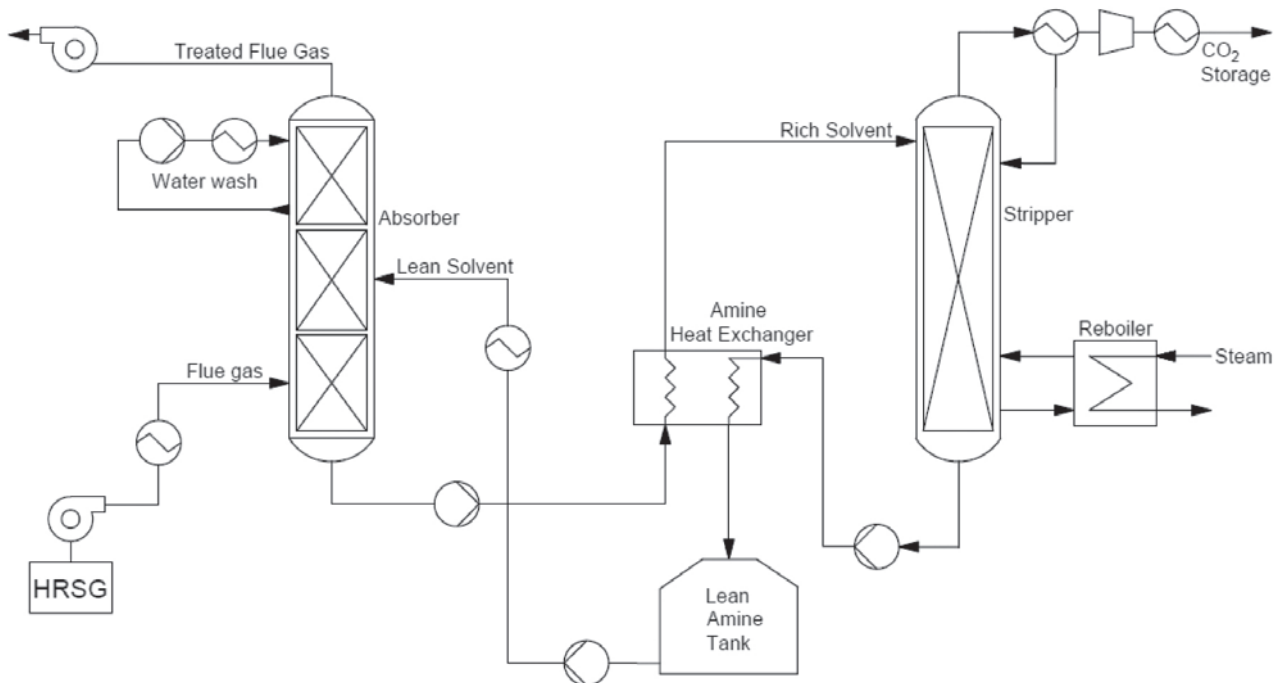


Fig. 2. Scheme of the PCCS installation using the chemical absorption method with the use of amines

4. CALCULATIONS OF CO₂ CAPTURE FROM A SUPERCRITICAL COAL-FIRED POWER PLANT USING AMINE TECHNOLOGY

Calculations of CO₂ capture using the PCCS installation with amine technology were carried out based on the results of CO₂ emissions from the supercritical coal-fired power plant presented in [6]. Simulation results for different load conditions are presented in Table 1. For a 100% load, a power plant produces 808.96 MW with coal consumption of 92.31 kg/s and the amount of exhaust gases emitted is

879.38 kg/s. By reducing the load, the output power, coal consumption, gross and net efficiency decrease.

Table 2 shows the composition of the coal which is used in the calculations of the exhaust gas compositions directed to the CO₂ capture installation. The exhaust gas content (mass and molar shares) is presented in Table 3. The flue gas consists mainly of nitrogen (69.5% mass fraction) and carbon dioxide (20.98% mass fraction). The mass fraction of oxygen and water are 3.39% and 5.50%, respectively. For different loads of the unit, the composition of the exhaust gases remained the same (the mass flow of gases changed).

Table 1

Parameters of supercritical coal-fired power plant under different load conditions [6]

Load condition	Total power generation	Efficiency		Coal consumption	Exhaust mass flow
		Gross	Net		
[%]	[MW]	[%]	[%]	[kg/s]	[kg/s]
100	809.96	48.02	46.43	92.31	879.38
90	734.33	47.79	46.38	83.20	793.24
80	657.25	47.51	46.28	74.24	707.23
70	584.12	47.39	46.26	65.53	624.23
60	509.14	47.23	46.20	56.79	540.94
50	434.52	47.14	46.15	47.73	454.67
40	356.39	46.92	45.98	38.62	367.85

Table 2

Content of coal used for analysis

Content	Mass fraction [%]
C	0.5497
H	0.0350
O	0.0463
N	0.0100
S	0.0080
Cl	0.0000
Moisture	0.1275
Ash	0.2235
Total	1.0000

Table 3

Exhaust gas content

Content	Mass [%]	Mol [%]
Nitrogen (N ₂)	69.489460	73.169940
Oxygen (O ₂)	3.388145	3.123258
Argon (Ar)	0.402427	0.297147
Water (H ₂ O)	5.501076	9.007125
Carbon dioxide (CO ₂)	20.984630	14.064830
Sulphur dioxide (SO ₂)	0.166130	0.076492
Elemental carbon (C)	0.057712	0.141735
Elemental hydrogen (H)	0.003675	0.107536
Elemental oxygen (O)	0.004861	0.008962
Elemental nitrogen (N)	0.001050	0.002211
Elemental sulphur (S)	0.000840	0.000773
Total	100.000000	100.000000

The model developed of the CO₂ capture installation using the amine method is shown in Figure 3. The main components of the installation are the system for supplying and discharging the treated flue gases, the absorber-desorber system enabling CO₂ capture and solvent regeneration, and the CO₂ separation and compression system. The fuel mass flow as well as the fuel composition, are input data. The solvent used in the study is a 30% aqueous monoethanolamine (MEA) solution. The supercritical power plant only produces electricity, therefore, the heat needed to regenerate the PPCS solvent is taken from the auxiliary boiler, producing steam at a temperature of 135°C and a pressure of 3 bar. Steam is delivered to the reboiler.

Table 4 shows the simulation results of CO₂ capture with the PCCS installation for various supercritical coal-fired power plant load conditions. CO₂ capture capacity decreases as the load is reduced, which is connected with a lower stream of exhaust gases. The maximum achieved capture is 166.06 kg/s of CO₂ at 100% load and 89.32 MW electric power consumption.

Electric power for the installation's needs is taken from the power plant, directly affecting the overall efficiency. This can be noticed in Figure 4, where the efficiency of the power plant with/without the PCCS installation for different unit load conditions is presented. By reducing the load, the gross efficiency is decreasing from 48.02% at 100% load to 46.92% at 40% load. As the load decreases, the net efficiency without the PCCS installation falls, respectively 46.43% and 45.98% for 100% and 40% loads. The net efficiency of

the unit with the PCCS installation remains relatively constant at 41.1%. The steam supplied to the reboiler is generated by the auxiliary boiler. The input power

needed to generate it at full load is 647.1 MW. It is assumed that this power is supplied from outside the system and does not affect the operation of the installation.

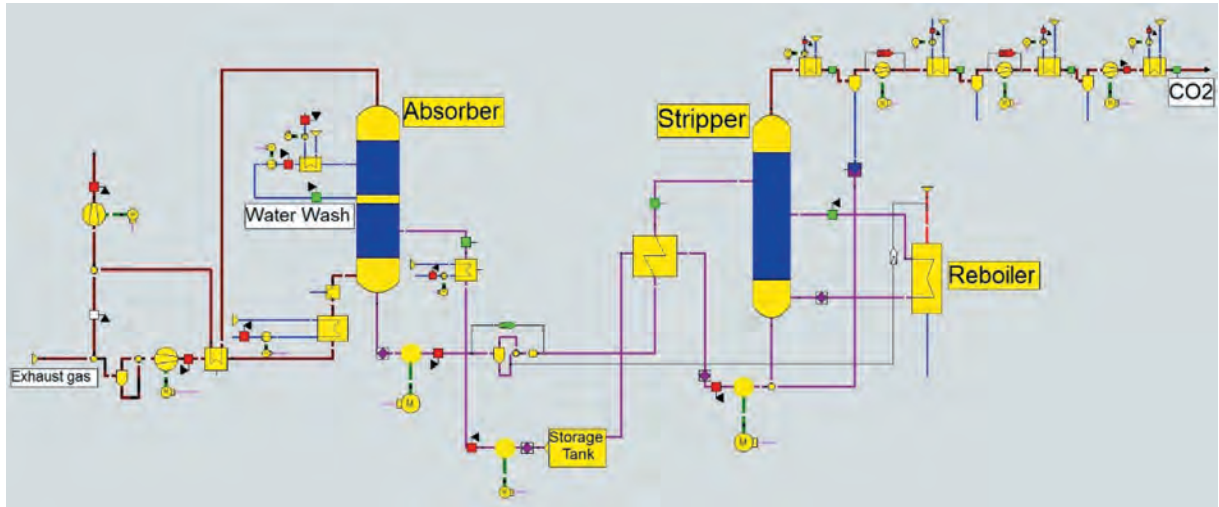


Fig. 3. Model of PCCS amine-based chemical absorption installation

Table 4

Simulation results of CO₂ capture with the PCCS installation for different loads of a supercritical coal-fired power plant – mass streams and power consumption

Load condition	Lean amine	Rich amine	Reboiler steam		Power consumed	Captured CO ₂
			[kg/s]	[t/h]		
[%]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[t/h]	[MW]	[MW]
100	1724.24	1890.30	300.80	1082.880	89.32	422.26
90	1554.06	1703.73	271.12	976.032	80.53	380.58
80	1386.70	1520.24	241.90	870.840	71.83	311.02
70	1224.00	1341.88	213.53	768.708	63.41	299.75
60	1060.75	1162.90	185.05	666.180	54.95	259.77
50	891.53	977.38	155.53	559.908	46.20	218.33
40	721.36	790.83	125.84	453.024	37.37	176.66

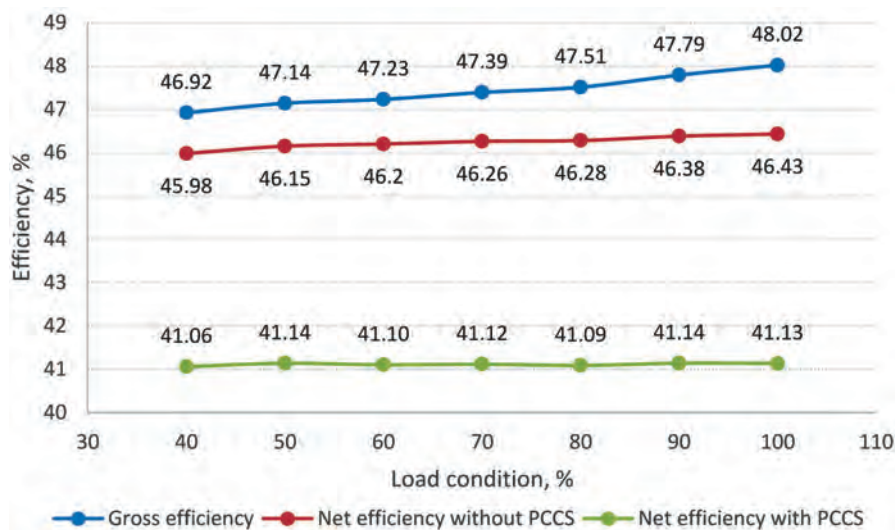


Fig. 4. Efficiency of a power plant with and without PCCS

The net power and efficiency reduction for different loads are presented in Table 5. The efficiency reduction due to the operation of the PCCS installation ranges from 5.30 to 4.92 pp. (i.e. 11.41–10.70%). The higher the load, the greater the decrease in efficiency.

The inlet, captured and emitted CO_2 mass flow for different loads is presented in Figure 5. The lower the load, the smaller the CO_2 mass flow, which is directly related to the amount of exhaust gas. For a 100% load, the captured CO_2 mass flow is 166.06 kg/s and the emitted CO_2 mass flow is 16.46 kg/s.

Table 5
Comparison of the net power with/without PCCS and the reduction of the plant's efficiency for different load conditions

Load condition [%]	Net power without PCCS [MW]	Net power with PCCS [MW]	Efficiency reduction	
			[pp.]	[%]
100	783.14	693.82	5.30	11.41
90	712.66	632.13	5.24	11.30
80	640.23	568.40	5.19	11.22
70	570.19	506.78	5.14	11.12
60	498.04	443.09	5.10	11.03
50	425.39	379.19	5.01	10.86
40	349.25	311.88	4.92	10.70

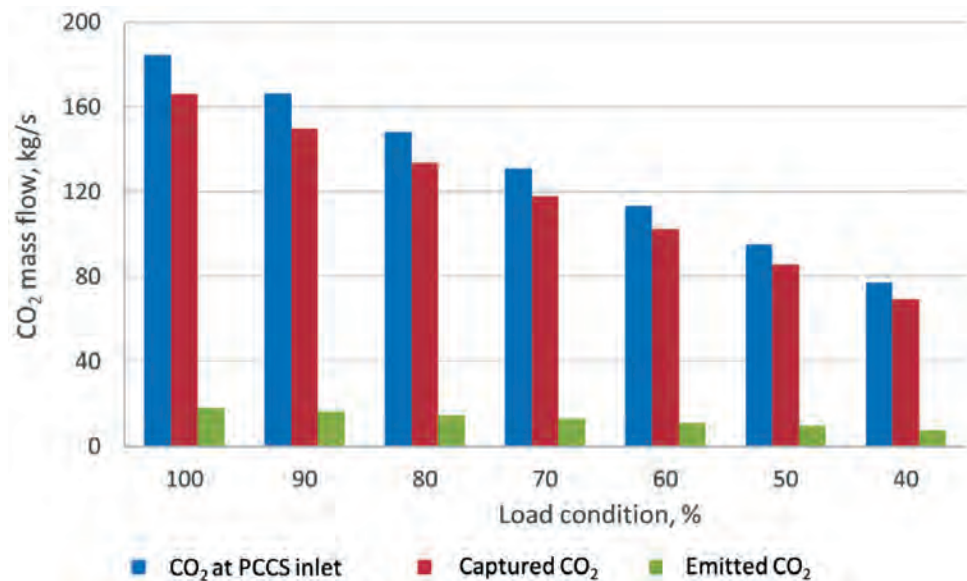


Fig. 5. Inlet, captured and emitted CO_2 mass flow for different load conditions

5. SUMMARY

The paper presents an assessment of the possibility of capturing CO_2 using post-combustion methods based on the review of the current state of technology development and the results of thermodynamic analysis of the operation of the supercritical coal-fired power plant. The power plant is equipped with a PCCS

installation using an amine-based chemical absorption method. The social and economic factors that accelerate the development of technology were discussed. The amine-based PCCS technology is indicated as the most mature and suitable for existing power plants. Based on the assumed coal composition, the composition of exhaust gases directed to the PCCS installation was calculated. For different power plant

load conditions, the captured CO₂ mass flow and the efficiency drop due to the presence of the PCCS installation were calculated. Under nominal load conditions (block capacity 809.96 MW), CO₂ capture was 166.06 kg/s with an electric power consumption of 89.32 MW. In this case, the efficiency of the power plant compared to the efficiency without the PCCS installation decreased by 11.41%. For lower load values, the efficiency reduction slightly decreased to 10.7% at 40% load. The analyzed technology of CO₂ capture using amines is characterized by high CO₂ capture efficiency, but this is strictly connected with a significant decrease in efficiency. The CO₂ capture process requires a large amount of energy to be supplied to the reboiler, which will also reduce the effectiveness of the post-combustion installation in power units. Further development of the technology for application in large power plant units should focus on reducing the energy consumption of carbon dioxide capture.

Acknowledgements

Research project supported by the program, "Excellence initiative – research university" for the AGH University of Krakow.

The research leading to the results received funding from the subsidy of the Ministry of Education and Science No. 16.16.130.942 (Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, AGH University of Krakow).

References

- [1] Parlament Europejski, Dyrekcja Generalna ds. Komunikacji: *Czym jest neutralność emisyjna i jak możemy ją osiągnąć do 2050 r.?* 14.04.2023. <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20190926STO62270/czym-jest-neutralnosc-emisyjna-i-jak-mozemy-ja-osiagnac-do-2050-r>.
- [2] International Energy Agency: *The role of CCUS in low-carbon power systems*. IEA, Paris 2020. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-ccus-in-low-carbon-power-systems>.
- [3] International Energy Agency: *CO₂ emissions in 2022*. IEA, Paris 2023. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>.
- [4] Crippa M., Guizzardi D., Banja M., Solazzo E., Muntean M., Schaaf E., Pagani F., Monforti-Ferrario F., Olivier J., Quadrelli R., Riszquez Martin A., Taghavi-Moharamli P., Grassi G., Rossi S., Oom D., Branco A., San-Miguel J., Vignati E.: *CO₂ emissions of all world countries – JRC/IEA/PBL 2022 Report*. Publications Office of the European Union, Luxembourg 2022. <https://doi.org/10.2760/730164>.
- [5] International Energy Agency: *Energy Technology Perspectives 2020*. IEA, Paris 2021. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>.
- [6] Madejski P., Chmiel K., Subramanian N., Kuś T.: *Współczesne metody i technologie wychwytu CO₂*. In: *Mechanizacja, automatyzacja i robotyzacja w górnictwie 2021: monografia: praca zbiorowa*, K. Krauze (red. nauk.). Wydawnictwa AGH, Kraków 2022: 29–36.
- [7] Madejski P., Chmiel K., Subramanian N., Kuś T.: *Methods and techniques for CO₂ capture: Review of potential solutions and applications in modern energy technologies*. *Energies* 2022, 15, 3: 887. <https://doi.org/10.3390/en15030887>.
- [8] Ministerstwo Gospodarki: *Polityka energetyczna Polski do 2030 roku*. Warszawa 2009.
- [9] Olajire A.A.: *CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications – A review*. *Energy* 2010, 35, 6: 2610–2628. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.030>.
- [10] Więclaw-Solny L., Ściążko M., Tatarczuk A., Krótki A., Wilk A.: *Czy CCS może być tańsze? W poszukiwaniu nowych sorbentów CO₂*. *Polityka Energetyczna* 2011, 14, 2: 441–453.
- [11] Porter R., Fairweather M., Pourkashanian M., Woolley R.: *The range and level of impurities in CO₂ streams from different carbon capture sources*. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2015, 36: 161–174. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.02.016>.
- [12] Pandey S.N., Gupta S.K., Tomar A., Kumar A.: *Post combustion carbon capture technology*. In: *National Conference on Eco friendly Manufacturing for Sustainable Development: November 19–21, 2010, GLA University, Mathura, U.P., India*, 2010, paper no. 56.
- [13] Li J.-R., Ma Y., McCarthy M.C., Sculley J., Yu J., Jeong H.-K., Balbuena P.B., Zhou H.-C.: *Carbon dioxide capture-related gas adsorption and separation in metal-organic frameworks*. *Coordination Chemistry Reviews* 2011, 255, 15–16: 1791–1823. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2011.02.012>.
- [14] Vakharia V., Salim W., Wu D., Han Y., Chen Y., Zhao L., Winston Ho W.: *Scale-up of amine-containing thin-film composite membranes for CO₂ capture from flue gas*. *Journal of Membrane Science* 2018, 555: 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.03.074>.
- [15] Rakowski J., Bocian P., Celińska A., Świątkowski B., Golec T.: *Zastosowanie pętli chemicznych w energetyce*. *Energetyka* 2016, 4: 208–213.
- [16] Kárászová M., Zach B., Petrusová Z., Červenka V., Bobák M., Šyc M., Izák P.: *Post-combustion carbon capture by membrane separation, Review*. *Separation and Purification Technology* 2020, 238: 116448. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116448>.
- [17] Zanco S.E., Pérez-Calvo J.-F., Gasós A., Cordiano B., Becattini V., Mazzotti M.: *Postcombustion CO₂ capture: A comparative techno-economic assessment of three technologies using a solvent, an adsorbent, and a membrane*. *ACS Engineering Au* 2021, 1, 1: 50–72. <https://doi.org/10.1021/acseengineeringau.1c00002>.
- [18] Patil M., Vaidya P., Kenig E.: *Bench-scale study for CO₂ capture using AMP/PZ/water mixtures*. *Chemical Engineering Transactions* 2018, 69: 163–168. <https://doi.org/10.3303/CET1869028>.
- [19] Feron P.H.M., Cousins A., Jiang K., Zhai R., Garcia M.: *An update of the benchmark post-combustion CO₂-capture technology*. *Fuel* 2020, 273: 117776. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117776>.
- [20] Spietz T., Dobras S., Chwoła T., Wilk A., Krótki A., Więclaw-Solny L.: *Experimental results of amine emission from the CO₂ capture process using 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) with piperazine (PZ)*. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2020, 102: 103155. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103155>.
- [21] Xue B., Yu Y., Chen J., Luo X., Wang M.: *A comparative study of MEA and DEA for post-combustion CO₂ capture with different process configurations*. *International Journal of Coal Science & Technology* 2017, 4: 15–24. <https://doi.org/10.1007/s40789-016-0149-7>.
- [22] Mazurkiewicz M., Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E., Piotrowski Z., Pomykała R.: *Metody separacji i wychwytywania CO₂*. *Polityka Energetyczna* 2005, 8 (spec.): 527–538.

- [23] Ávila S.G. de, Logli M.A., Silva L.C.C., Fantini M.C.A., Matos J.R.: *Incorporation of monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA) and methyl-diethanolamine (MDEA) in mesoporous silica: An alternative to CO₂ capture*. Journal of Environmental Chemical Engineering 2016, 4, 4, part A: 4514–4524. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.10.015>.
- [24] Pinto D.D.D., Knuutila H., Fytianos G., Haugen G., Mejdell T., Svendsen H.F.: *CO₂ post combustion capture with a phase change solvent. Pilot plant campaign*. International Journal of Greenhouse Gas Control 2014, 31: 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.10.007>.
- [25] Bernhardsen I.M., Knuutila H.K.: *A review of potential amine solvents for CO₂ absorption process: Absorption capacity, cyclic capacity and pKa*. International Journal of Greenhouse Gas Control 2017, 61: 27–48. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.03.021>.

TOMASZ KUŚ, M.Sc.

kus@agh.edu.pl

NAVANEETHAN SUBRAMANIAN, M.Sc.

subraman@agh.edu.pl

PAWEŁ MADEJSKI, PhD., DSc., Eng.

madejski@agh.edu.pl

MICHAŁ KARCH, PhD., Eng.

karch@agh.edu.pl

AGH University of Krakow

Faculty of Mechanical Engineering and Robotics

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland

TOMASZ KUŚ
NAVANEETHAN SUBRAMANIAN
PAWEŁ MADEJSKI
MICHAŁ KARCH

Ocena możliwości wychwytu CO₂ metodami *post-combustion*

*Spalanie paliw kopalnych w procesie wytwarzania energii elektrycznej powoduje emisję dwutlenku węgla, który uważany jest za główną antropogeniczną przyczynę globalnego ocieplenia. Tematem pracy jest ocena możliwości wychwytu CO₂ metodami *post-combustion*. Scharakteryzowano główne rodzaje metod *post-combustion*, takie jak: absorpcja chemiczna, separacja fizyczna, separacja membranowa oraz pętla chemiczna. Przeprowadzono termodynamiczną analizę pracy nadkrytycznego bloku energetycznego zasilanego węglem i wyposażonego w instalację wychwytu CO₂ metodą rozpuszczalnikową. Bazując na wynikach modelowania, oceniony został wpływ zastosowania technologii aminowej na sprawność elektrowni oraz emisję CO₂.*

Słowa kluczowe: emisja CO₂, PCCS, technologie aminowe

1. WSTĘP

Ograniczenie emisji gazów cieplarnianych jest jednym z priorytetów współczesnej polityki energetycznej. W celu zminimalizowania negatywnych skutków zmian klimatycznych 195 krajów w porozumieniu paryskim określiło jako niezbędne osiągnięcie neutralności emisyjnej do połowy XXI wieku [1]. Wśród gazów cieplarnianych to dwutlenek węgla jest postrzegany jako główne źródło emisji związane z działalnością człowieka, a 40% światowej emisji tego gazu pochodzi z produkcji energii elektrycznej z paliw kopalnych [2]. Pomimo znaczącego wzrostu udziału odnawialnych źródeł energii w całkowitej produkcji energii, globalna emisja CO₂ związana z wytwarzaniem energii oraz procesami przemysłowymi osiągnęła najwyższy poziom w roku 2022 równy 36,8 Gt CO₂ [3]. W Polsce na przestrzeni ostatnich kilkunastu lat można zaobserwować znaczące zmniejszenie poziomu emisji CO₂ spowodowanej spalaniem paliw kopalnych do celów wytwarzania energii elektrycznej oraz nieznaczny wzrost emisji związanej ze spalaniem paliw w procesach przemysłowych: odpowiednio 16% oraz 2% przy porównaniu 2021 i 2005 roku [4]. Aby propagować stopniowe i racjonalne ograniczanie emisji gazów cieplarnianych, Unia Europejska wprowadziła system handlu przydziałami emisji. Przez mechanizm finansowy (skupu i sprzedaży emisji) kraje członkowskie są zmuszone do rozwijania i wykorzystywania nisko emisyjnych technologii.

Wymienione wcześniej czynniki ekologiczne oraz polityczne powodują, że ograniczenie emisji CO₂ jest obecnie jednym z najważniejszych wyzwań naukowo-badawczych. W krajach, gdzie produkcja energii nadal w większości opiera się na paliwach kopalnych, odpowiedzią na ten problem mogą być technologie wychwytu, transportu, utylizacji i składowania dwutlenku węgla CCUS (z ang. *Carbon, Capture, Utilization and Storage*). Celem tych technologii jest ograniczenie emisji przez wychwyt dwutlenku węgla, a następnie jego składowanie, wykorzystanie lub przetworzenie do innych użytecznych produktów [5]. Wśród technologii CCUS wyróżnić można trzy podstawowe metody wychwytu CO₂: przed procesem spalania (*pre-combustion*), po procesie spalania (*post-combustion*) oraz spalania w atmosferze tlenowej (*oxycombustion*) [6, 7].

Wśród wyżej wymienionych metod to technologie *post-combustion* nadają się najlepiej do zastosowania w istniejących instalacjach. Rozwiązanie to wydaje się szczególnie istotne w Polskim Sektorze Energetycznym, gdzie dominują jednostki opierające swoją działalność na spalaniu węgla kamiennego oraz brunatnego.

Wśród wyżej wymienionych metod to technologie *post-combustion* nadają się najlepiej do zastosowania w istniejących instalacjach. Rozwiązanie to wydaje się szczególnie istotne w Polskim Sektorze Energetycznym, gdzie dominują jednostki opierające swoją działalność na spalaniu węgla kamiennego oraz brunatnego.

Pomimo gwałtownego rozwoju energetyki odnawialnej jeszcze przez długi czas paliwa kopalne wciąż będą podstawowym nośnikiem energii w systemie elektroenergetycznym Polski [8].

2. TECHNOLOGIE SEPARACJI CO₂ POST-COMBUSTION

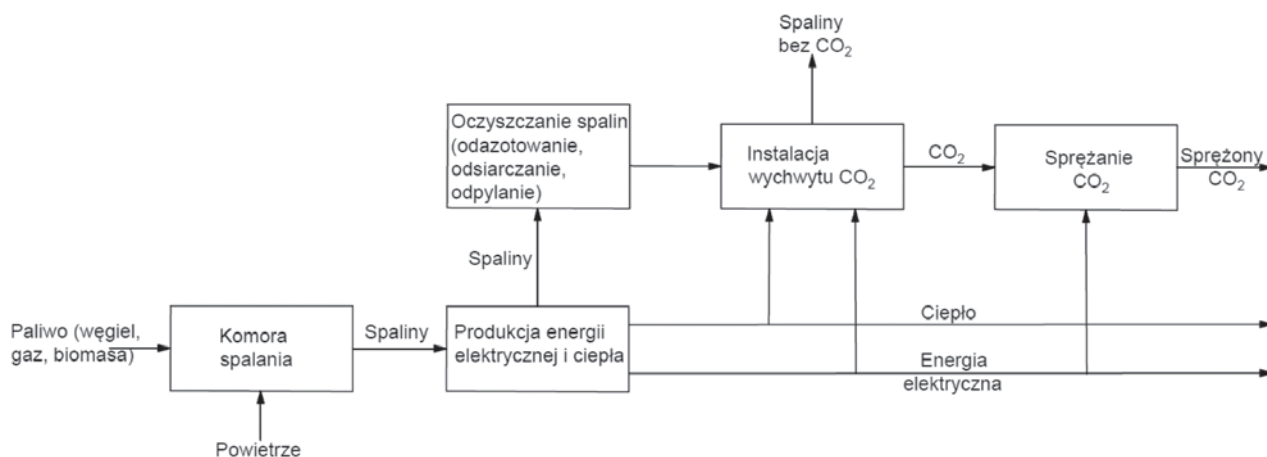
Metody typu *post-combustion* polegają na wychwycie dwutlenku węgla z mieszaniny gazów powstającej w wyniku spalania paliw. Schemat technologii został zaprezentowany na rysunku 1. Spaliny powstające w wyniku spalania paliw są wstępnie oczyszczane ze związków azotu, siarki oraz pyłu, a następnie kierowane do instalacji wychwytu CO₂. Składają się głównie z azotu oraz dwutlenku węgla, przy czym koncentracja dwutlenku węgla jest rzędu 4–14% [9]. Skutkuje to niskim ciśnieniem parcjnym CO₂ w mieszaninie gazów i powoduje, że proces separacji jest skomplikowany. Dodatkowym wyzwaniem związanym z projektowaniem tego typu instalacji są wysokie temperatury gazów wylotowych.

Główną zaletą metody *post-combustion* jest możliwość jej zastosowania w nowych, a także istniejących instalacjach bez wprowadzania drastycznych zmian [10]. Ponadto możliwe jest osiągnięcie czystości produkowanego dwutlenku węgla powyżej 99% [11]. Instalacje *post-combustion* charakteryzują się bardzo dużą elastycznością działania: możliwe jest regulowanie ilości wychwytywanego strumienia CO₂, jak i całkowite wyłączenie wychwytu, co umożliwia sterowanie mocą elektrowni zgodnie z zapotrzebowaniem rynku [12].

Instalacje *post-combustion* powinny być zaprojektowane w taki sposób, aby osiągnąć możliwie jak najmniejszą emisję dwutlenku węgla przy jak najniższym koszcie energetycznym. W zależności od sposobu wychwytu dwutlenku węgla, w technologii *post-combustion* rozróżnić można następujące metody separacji: absorpcja chemiczna, separacja fizyczna, separacja membranowa oraz pętla chemiczna.

Separacja fizyczna wykorzystuje zjawisko absorpcji, adsorpcji lub separacji kriogenicznej [7]. Adsorpcja fizyczna polega na wykorzystaniu materiałów porowatych, takich jak węgiel aktywny, krzemionka zeolity czy rozwijane tzw. szkielety metaloorganiczne (MOFs) [13]. Separacja membranowa polega na zastosowaniu membrany do procesu separacji lub absorpcji. Zazwyczaj wiąże się z niskim zużyciem energii, niskimi kosztami eksploatacji oraz możliwością łatwego skalowania [14]. Metoda spalania paliwa w pętli chemicznej polega na zastosowaniu dwóch reaktorów: powietrznego oraz paliwowego oraz cyrkulującego między nimi związku tlenków metali, stanowiącego źródła tlenu podczas reakcji spalania. W wyniku spalania w czystym tlenie spaliny składają się głównie z dwutlenku węgla i pary [15].

Separacja dwutlenku węgla przy użyciu absorpcji chemicznej oparta jest na reakcji chemicznej między CO₂ a rozpuszczalnikiem (ang. *solvent*). Metoda ta charakteryzuje się wysokimi kosztami inwestycyjnymi i operacyjnymi [16]. Absorpcja chemiczna z wykorzystaniem amin jest uważana za najbardziej dojrzałą technologię separacji CO₂ [17]. Obecnie jej zastosowanie obejmuje głównie elektrownie pilotażowe [18–21].



Rys. 1. Schemat technologii *post-combustion* [6]

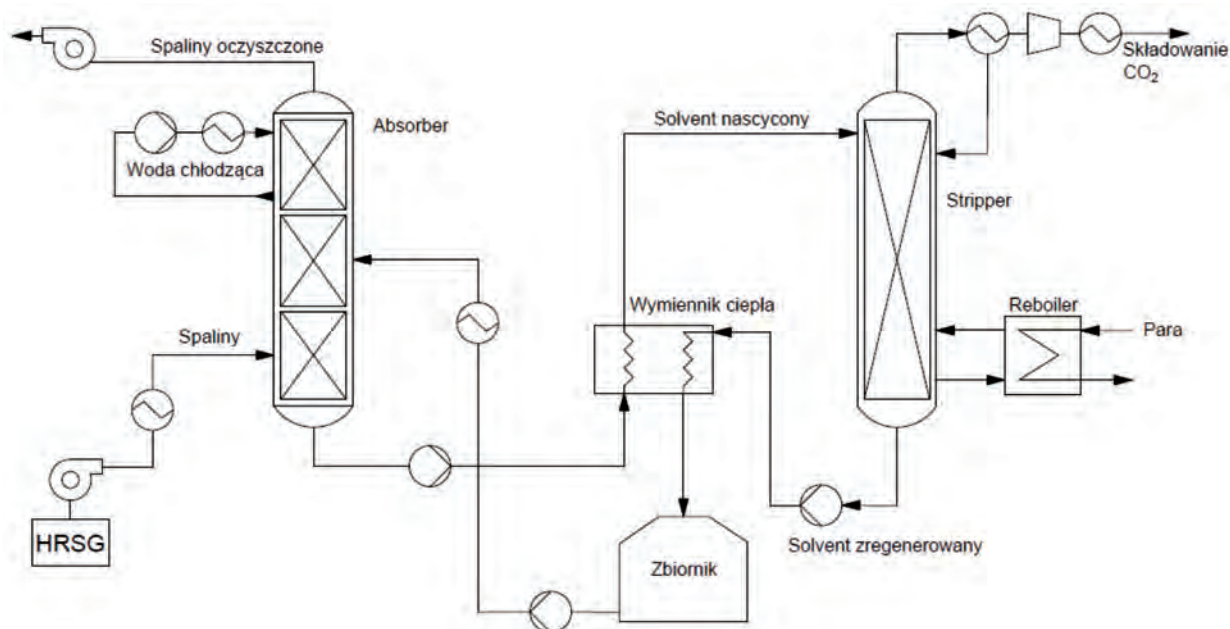
3. ABSORPCJA CHEMICZNA

Separacja dwutlenku węgla przy użyciu absorpcji chemicznej polega na reakcji pomiędzy dwutlenkiem węgla zawartym w spalinach oraz solventem (roz-

puszczalnikiem chemicznym) w kolumnie absorpcyjnej. Jako solventy stosowane są aminy, wodny roztwór amoniaku oraz węglan potasu [22]. Produktami reakcji amin oraz dwutlenku węgla są karbaminiany lub wodorowęglany.

W przypadku procesów energetycznych i przemysłowych rozpowszechnione jest użycie następujących etanoloamin: monoetanoloaminy MEA, dietanoloaminy DEA oraz metyldietanoloaminy MDEA. Główną zaletą etanoloamin jest ich duża zdolność do wychwytu CO₂. Wadą jest duża energochłonność procesu regeneracji. Ponadto aminy w łatwy sposób ulegają procesowi utlenienia, co powoduje stworzenie korozyjnych związków, takich jak kwasy karboksylowe czy amoniak. Konieczne jest użycie odpowiedniego stężenia amin, aby uniknąć procesu ich degradacji. Prowadzone są badania nad polepszeniem efektywności wychwytu oraz zmniejszeniem energochłonności procesu przez dobór odpowiednich mieszanek rozpuszczalników chemicznych [23].

Schemat procesu absorpcji chemicznej przy użyciu amin został przedstawiony na rysunku 2. Spaliny po przejściu przez kocioł są kierowane do komory absorbera.



Rys. 2. Schemat instalacji PCCS metodą absorpcji chemicznej przy zastosowaniu amin

4. OBLICZENIA WYCHWYTU CO₂ METODĄ AMINOWĄ Z WĘGLOWEGO BLOKU ENERGETYCZNEGO NA NADKRYTYCZNE PARAMETRY PARY

Obliczenia wychwytu CO₂ przy użyciu instalacji PCCS za pomocą metody aminowej zostały przeprowadzone na podstawie obliczeń emisji CO₂ z węglowego bloku energetycznego na nadkrytyczne parametry pary [6]. Wyniki pracy symulacji bloku przy różnych obciążeniach przedstawiono w tabeli 1. W warunkach obciążenia 100% elektrownia produkuje 808,96 MW przy konsumpcji węgla na poziomie 92,31 kg/s i ilości emi-

Tam dochodzi do reakcji chemicznej z solwentem, który absorbuje CO₂. Solvent to zazwyczaj wodny roztwór etanoloamin o stężeniu 30% [24, 25]. Nasycony dwutlenkiem węgla solvent kierowany jest do strippera (desorbera), gdzie następuje proces regeneracji. Stripper zbudowany jest z dwóch pionowych kolumn. Po przejściu przez jedną z nich i wstępnym ogrzaniu przez solwent dociera do reboilera. W efekcie dostarczenia ciepła za pomocą pary wodnej temperatura solwentu wzrasta do wartości umożliwiającej separację. Para wodna wraz z dwutlenkiem węgla przepływa w górę, a zregenerowany solvent w stanie ciekłym – w dół, gdzie jest następnie schładzany i kierowany ponownie do absorbera. Mieszanina pary wodnej i dwutlenku węgla jest schładzana, co powoduje wykroplenie pary oraz separację. Następnie dwutlenek węgla jest sprężany do odpowiedniego poziomu ciśnienia umożliwiającego składowanie.

towanych spalin 879,38 kg/s. Wraz ze spadkiem obciążenia elektrowni moc bloku, zużycie węgla oraz sprawność brutto i netto ulegają zmniejszeniu.

W tabeli 2 przedstawiono skład węgla kamiennego, który został użyty w obliczeniach składu gazów wylotowych kierowanych do instalacji wychwytu CO₂. Skład gazów wylotowych w postaci udziałów masowych i molowych został przedstawiony w tabeli 3. Spaliny składają się głównie z azotu (69,5-procentowy udział masowy) oraz dwutlenku węgla (20,98-procentowy udział masowy). Udziały masowe tlenu oraz wody wynoszą odpowiednio 3,39% oraz 5,5%. Dla różnych obciążeń bloku skład gazów wylotowych pozostał ten sam (zmianie ulegał strumień masowy gazów).

Tabela 1
Wyniki symulacji pracy bloku na ultranadkrytyczne parametry pracy [6]

Obciążenie bloku	Moc bloku	Sprawność		Zużycie węgla	Ilość spalin
		brutto	netto		
[%]	[MW]	[%]	[%]	[kg/s]	[kg/s]
100	809,96	48,02	46,43	92,31	879,38
90	734,33	47,79	46,38	83,20	793,24
80	657,25	47,51	46,28	74,24	707,23
70	584,12	47,39	46,26	65,53	624,23
60	509,14	47,23	46,20	56,79	540,94
50	434,52	47,14	46,15	47,73	454,67
40	356,39	46,92	45,98	38,62	367,85

Tabela 2
Skład węgla kamiennego użytego w analizie

Pierwiastek	Udział masowy [%]
C	0,5497
H	0,0350
O	0,0463
N	0,0100
S	0,0080
Cl	0,0000
Wilgoć	0,1275
Popiół	0,2235
Razem	1,0000

Tabela 3
Skład gazów wylotowych

Składnik	Udział masowy [%]	Udział molowy [%]
Azot (N ₂)	69,489460	73,169940
Tlen (O ₂)	3,388145	3,123258
Argon (Ar)	0,402427	0,297147
Woda (H ₂ O)	5,501076	9,007125
Dwutlenek węgla (CO ₂)	20,984630	14,064830
Dwutlenek siarki (SO ₂)	0,166130	0,076492
Węgiel elementarny (C)	0,057712	0,141735
Wodór elementarny (H)	0,003675	0,107536
Tlen elementarny (O)	0,004861	0,008962
Azot elementarny (N)	0,001050	0,002211
Siarka elementarna (S)	0,000840	0,000773
Razem	100,000000	100,000000

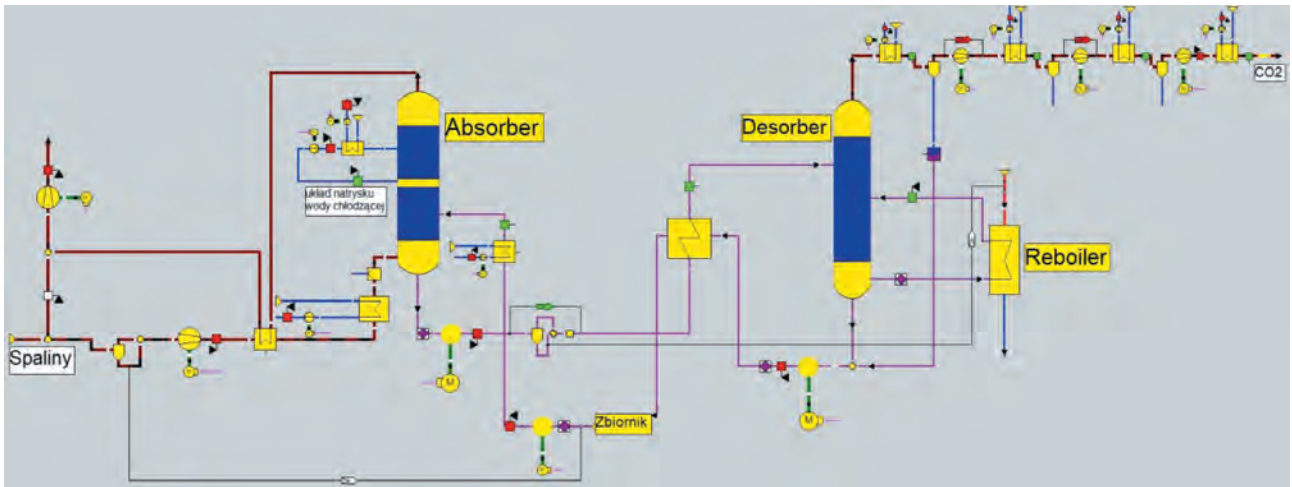
Opracowany model instalacji wychwytu CO₂ metodą aminową z gazów wylotowych przedstawiono na rysunku 3. Główne elementy instalacji to: układ doprowadzania i odprowadzania oczyszczonych spalin, układ absorber–desorber umożliwiający wychwyt CO₂ i regenerację solventu oraz układ separacji i sprężania CO₂. Strumień masy paliwa, a także skład paliwa zostały przyjęte jako dane wejściowe. użytym solventem jest wodny roztwór monoetanolaminy (MEA) o stężeniu 30%. Elektrownia na parametry nadkrytyczne produkuje tylko energię elektryczną, dlatego ciepło potrzebne do regeneracji rozpuszczalnika PPCS jest pobierane z pomocniczego kotła wytwarzającego parę wodną o temperaturze 135°C i ciśnieniu 3 barów, która jest dostarczana do reboilera.

W tabeli 4 zaprezentowano wyniki symulacji wychwytu CO₂ instalacją PCCS dla różnych obciążeń bloku nadkrytycznej elektrowni węglowej. Wychwyt CO₂ zmniejsza się wraz ze spadkiem obciążenia bloku, co jest związane z mniejszym strumieniem gazów wylotowych. Maksymalny osiągnięty wychwyt wyniósł 166,06 kg/s CO₂ przy obciążeniu bloku 100% oraz poborze mocy elektrycznej 89,32 MW.

Moc elektryczna na potrzeby własne instalacji pobierana jest z elektrowni, co wpływa bezpośrednio na sprawność. Zostało to pokazane na rysunku 4, gdzie zaprezentowano sprawność elektrowni z instalacją PCCS przy różnych obciążeniach bloku i bez takiej instalacji. Wraz ze spadkiem obciążenia bloku zmniejsza się sprawność brutto z 48,02% w warunkach 100% obciążenia bloku do 46,92% przy 40% obciążenia bloku. Wraz ze zmniejszaniem obciążenia maleje sprawność netto

bez instalacji PCCS, odpowiednio do 46,43% oraz 45,98% dla obciążeń 100% oraz 40%. Sprawność netto bloku z instalacją PCCS pozostaje na względnie stałym

poziomie 41,1%. Para dostarczana do reboilera jest wytwarzana przez kocioł pomocniczy. Moc wejściowa potrzebna do tego dla pełnego obciążenia wynosi 647,1 MW.

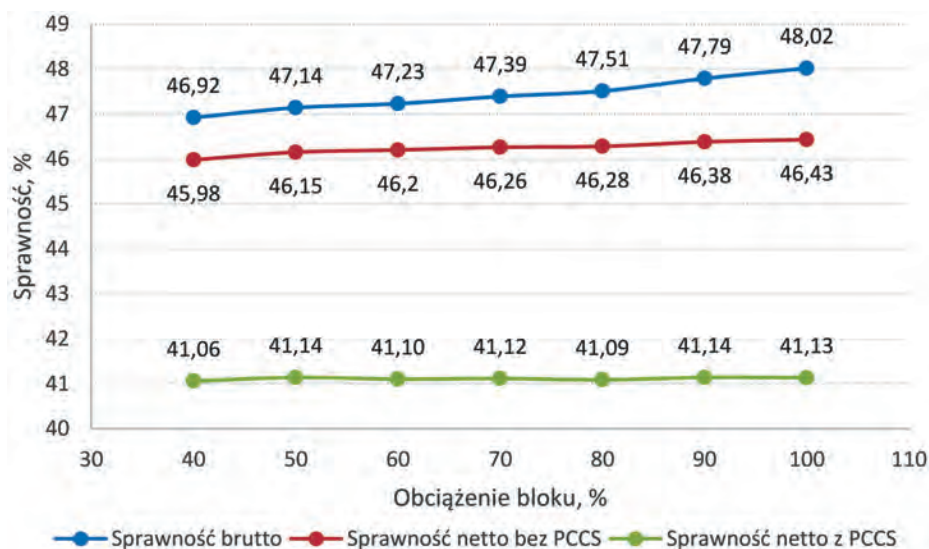


Rys. 3. Model instalacji PCCS metodą absorpcji chemicznej przy użyciu amin jako solventu

Tabela 4

Wyniki symulacji wychwytu CO₂ instalacją PCCS przy różnych obciążeniach nadkrytycznej elektrowni węglowej – strumienie masy i pobór mocy elektrycznej

Obciążenie bloku	Strumień solventu zregenerowanego	Strumień solventu nasyconego	Strumień pary do reboilera		Pobór mocy elektrycznej	Ciepło regeneracji
			[kg/s]	[t/h]		
[%]	[kg/s]	[kg/s]	[kg/s]	[t/h]	[MW]	[MW]
100	1724,24	1890,30	300,80	1082,880	89,32	422,26
90	1554,06	1703,73	271,12	976,032	80,53	380,58
80	1386,70	1520,24	241,90	870,840	71,83	311,02
70	1224,00	1341,88	213,53	768,708	63,41	299,75
60	1060,75	1162,90	185,05	666,180	54,95	259,77
50	891,53	977,38	155,53	559,908	46,20	218,33
40	721,36	790,83	125,84	453,024	37,37	176,66



Rys. 4. Porównanie sprawności elektrowni z instalacją PCCS i bez niej

Przyjęto, że energia ta jest dostarczana spoza układu i nie wpływa na działanie instalacji.

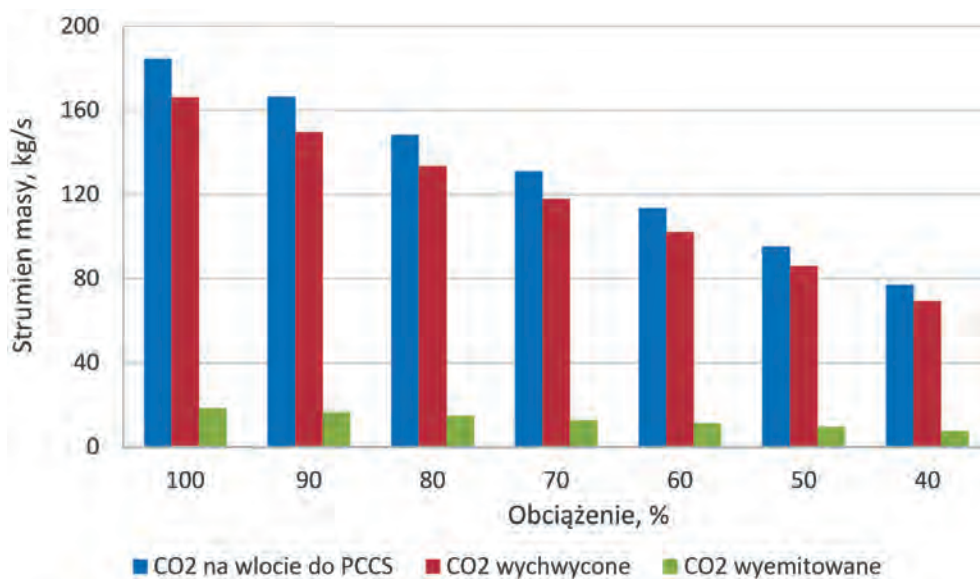
Moc netto oraz redukcja sprawności przy różnych obciążeniach bloku została pokazana w tabeli 5. Spadek sprawności na skutek pracy instalacji PCCS zawiera się w granicach 5,30–4,92 pp. (tj. 11,41–10,70%). Im większe obciążenie bloku, tym większy spadek sprawności.

Wlotowy, wychwycony oraz wyemitowany strumień masy CO₂ przy różnych obciążeniach bloku został zaprezentowany na rysunku 5. Im mniejsze obciążenie, tym mniejszy strumień CO₂, co jest bezpośrednio związane z ilością spalin. W przypadku obciążenia 100% wychwycony strumień masy CO₂ wynosi 166,06 kg/s, a wyemitowany strumień masy 16,46 kg/s.

Tabela 5

Porównanie mocy netto elektrowni z PCCS i bez niego oraz redukcja sprawności elektrowni dla różnych warunków obciążenia

Obciążenie bloku	Moc netto bez PCCS	Moc netto z PCCS	Redukcja sprawności	
			[pp.]	[%]
[%]	[MW]	[MW]		
100	783,14	693,82	5,30	11,41
90	712,66	632,13	5,24	11,30
80	640,23	568,40	5,19	11,22
70	570,19	506,78	5,14	11,12
60	498,04	443,09	5,10	11,03
50	425,39	379,19	5,01	10,86
40	349,25	311,88	4,92	10,70



Rys. 5. Strumień masy CO₂: wlotowy, wychwycony i wyemitowany w zależności od wartości obciążenia

5. PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano ocenę możliwości wychwytu CO₂ metodami *post-combustion* na podstawie przeglądu obecnego stanu rozwoju technologii oraz wyniki analizy termodynamicznej pracy nadkrytycznego bloku energetycznego zasilanego węglem i wyposaż-

zonego w instalację wychwytu CO₂ metodą absorpcji chemicznej. Omówiono uwarunkowania społeczno-gospodarcze sprzyjające rozwojowi technologii wychwytu CO₂. Technologia PCCS oparta na użyciu amin została wskazana jako najbardziej zaawansowana i odpowiednia do zastosowania w obecnie pracujących elektrowniach. Na podstawie składu węgla kamiennego

obliczono skład gazów wylotowych kierowanych do instalacji PCCS. Przyjmując różne wartości obciążenia bloku, obliczono wychwycony strumień masy CO₂ oraz spadek sprawności na skutek działania instalacji PCCS. W warunkach obciążenia nominalnego (moc bloku 809,96 MW) wychwyty CO₂ wyniósł 166,06 kg/s przy poborze mocy elektrycznej na poziomie 89,32 MW. W tym przypadku sprawność elektrowni w porównaniu ze sprawnością bez instalacji PCCS zmniejszyła się o 11,41%. W warunkach mniejszych obciążeń bloku redukcja sprawności nieznacznie malała aż do wartości 10,7% przy obciążeniu 40%. Analizowana technologia wychwytu CO₂ przy użyciu amin charakteryzuje się dużą efektywnością, ale wiąże się ze znaczącym spadkiem sprawności. Proces wychwytu dwutlenku węgla wymaga dostarczenia sporej ilości energii do reboilera, który również wpłynie na redukcję efektywności zastosowania instalacji *post-combustion* w dużych blokach energetycznych. Dalszy rozwój technologii mający na celu jej zastosowanie w rzeczywistych obiektach energetycznych powinien skupić się na zmniejszeniu energochłonności wychwytu dwutlenku węgla.

Podziękowania

Badania prowadzące do wyników zostały wsparte z programu „Inicjatywa Doskonałości – Uczelnia Badawcza” dla Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie.

Badania prowadzące do wyników otrzymały dofinansowanie z subwencji MEiN nr 16.16.130.942 (Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, AGH w Krakowie).

Literatura

- [1] Parlament Europejski, Dyrekcja Generalna ds. Komunikacji: *Czym jest neutralność emisyjna i jak możemy ją osiągnąć do 2050 r.?* 14.04.2023. <https://www.europarl.europa.eu/news/pl/headlines/society/20190926STO62270/czym-jest-neutralnosc-emisyjna-i-jak-mozemy-ja-osiagnac-do-2050-r>.
- [2] International Energy Agency: *The role of CCUS in low-carbon power systems*. IEA, Paris 2020. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-ccus-in-low-carbon-power-systems>.
- [3] International Energy Agency: *CO₂ emissions in 2022*. IEA, Paris 2023. <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022>.
- [4] Crippa M., Guizzardi D., Banja M., Solazzo E., Muntean M., Schaaf E., Pagani F., Monforti-Ferrario F., Olivier J., Quadrelli R., Riszuez Martin A., Taghavi-Moharamli P., Grassi G., Rossi S., Oom D., Branco A., San-Miguel J., Vignati E.: *CO₂ emissions of all world countries – JRC/IEA/PBL 2022 Report*. Publications Office of the European Union, Luxembourg 2022. <https://doi.org/10.2760/730164>.
- [5] International Energy Agency: *Energy Technology Perspectives 2020*. IEA, Paris 2021. <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>.
- [6] Madejski P., Chmiel K., Subramanian N., Kuś T.: *Współczesne metody i technologie wychwytu CO₂*. W: *Mechanizacja, automatyzacja i robotyzacja w górnictwie 2021: monografia: praca zbiorowa*, K. Krauze (red. nauk.). Wydawnictwa AGH, Kraków 2022: 29–36.
- [7] Madejski P., Chmiel K., Subramanian N., Kuś T.: *Methods and techniques for CO₂ capture: Review of potential solutions and applications in modern energy technologies*. *Energies* 2022, 15, 3: 887. <https://doi.org/10.3390/en15030887>.
- [8] Ministerstwo Gospodarki: *Polityka energetyczna Polski do 2030 roku*. Warszawa 2009.
- [9] Olajire A.A.: *CO₂ capture and separation technologies for end-of-pipe applications – A review*. *Energy* 2010, 35, 6: 2610–2628. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.02.030>.
- [10] Więclaw-Solny L., Ściążko M., Tatarczuk A., Krótki A., Wilk A.: *Czy CCS może być tańsze? W poszukiwaniu nowych sorbentów CO₂*. *Polityka Energetyczna* 2011, 14, 2: 441–453.
- [11] Porter R., Fairweather M., Pourkashanian M., Woolley R.: *The range and level of impurities in CO₂ streams from different carbon capture sources*. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2015, 36: 161–174. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2015.02.016>.
- [12] Pandey S.N., Gupta S.K., Tomar A., Kumar A.: *Post combustion carbon capture technology*. In: *National Conference on Eco friendly Manufacturing for Sustainable Development: November 19–21, 2010, GLA University, Mathura, U.P., India*, 2010, paper no. 56.
- [13] Li J.-R., Ma Y., McCarthy M.C., Sculley J., Yu J., Jeong H.-K., Balbuena P.B., Zhou H.-C.: *Carbon dioxide capture-related gas adsorption and separation in metal-organic frameworks*. *Coordination Chemistry Reviews* 2011, 255, 15–16: 1791–1823. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2011.02.012>.
- [14] Vakharia V., Salim W., Wu D., Han Y., Chen Y., Zhao L., Winston Ho W.: *Scale-up of amine-containing thin-film composite membranes for CO₂ capture from flue gas*. *Journal of Membrane Science* 2018, 555: 379–387. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2018.03.074>.
- [15] Rakowski J., Bocian P., Celińska A., Świątkowski B., Golec T.: *Zastosowanie pętli chemicznych w energetyce*. *Energetyka* 2016, 4: 208–213.
- [16] Kárászová M., Zach B., Petrusová Z., Červenka V., Bobák M., Šyc M., Izák P.: *Post-combustion carbon capture by membrane separation, Review*. *Separation and Purification Technology* 2020, 238: 116448. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116448>.
- [17] Zanco S.E., Pérez-Calvo J.-F., Gasós A., Cordiano B., Becattini V., Mazzotti M.: *Postcombustion CO₂ capture: A comparative techno-economic assessment of three technologies using a solvent, an adsorbent, and a membrane*. *ACS Engineering Au* 2021, 1, 1: 50–72. <https://doi.org/10.1021/acseengineeringau.1c00002>.
- [18] Patil M., Vaidya P., Kenig E.: *Bench-scale study for CO₂ capture using AMP/PZ/water mixtures*. *Chemical Engineering Transactions* 2018, 69: 163–168. <https://doi.org/10.3303/CET1869028>.
- [19] Feron P.H.M., Cousins A., Jiang K., Zhai R., Garcia M.: *An update of the benchmark post-combustion CO₂-capture technology*. *Fuel* 2020, 273: 117776. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117776>.
- [20] Spietz T., Dobras S., Chwoła T., Wilk A., Krótki A., Więclaw-Solny L.: *Experimental results of amine emission from the CO₂ capture process using 2-amino-2-methyl-1-propanol (AMP) with piperazine (PZ)*. *International Journal of Greenhouse Gas Control* 2020, 102: 103155. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2020.103155>.
- [21] Xue B., Yu Y., Chen J., Luo X., Wang M.: *A comparative study of MEA and DEA for post-combustion CO₂ capture with different process configurations*. *International Journal of Coal Science & Technology* 2017, 4: 15–24. <https://doi.org/10.1007/s40789-016-0149-7>.
- [22] Mazurkiewicz M., Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E., Piotrowski Z., Pomykała R.: *Metody separacji i wychwytywania CO₂*. *Polityka Energetyczna* 2005, 8 (spec.): 527–538.

- [23] Ávila S.G. de, Logli M.A., Silva L.C.C., Fantini M.C.A., Matos J.R.: *Incorporation of monoethanolamine (MEA), diethanolamine (DEA) and methyl-diethanolamine (MDEA) in mesoporous silica: An alternative to CO₂ capture*. Journal of Environmental Chemical Engineering 2016, 4, 4, part A: 4514–4524. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2016.10.015>.
- [24] Pinto D.D.D., Knuutila H., Fytianos G., Haugen G., Mejdell T., Svendsen H.F.: *CO₂ post combustion capture with a phase change solvent. Pilot plant campaign*. International Journal of Greenhouse Gas Control 2014, 31: 153–164. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.10.007>.
- [25] Bernhardsen I.M., Knuutila H.K.: *A review of potential amine solvents for CO₂ absorption process: Absorption capacity, cyclic capacity and pKa*. International Journal of Greenhouse Gas Control 2017, 61: 27–48. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2017.03.021>.

mgr inż. TOMASZ KUŚ

kus@agh.edu.pl

mgr inż. NAVANEETHAN SUBRAMANIAN

subraman@agh.edu.pl

dr hab. inż. PAWEŁ MADEJSKI, prof. AGH

madejski@agh.edu.pl

dr inż. MICHAŁ KARCH

karch@agh.edu.pl

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

RICHARD KANDZIA
MARIUSZ SZOT

Technological aspects of mining chain production development

This paper presents a brief historical overview of the development and types of mining chains currently in production, as well as their contribution to the global market. The directions of development for mining link chains were identified in terms of the materials and strength parameters applied. The negative influence of certain factors that decrease the performance of mining chains are also demonstrated.

Key words: *chain, safety, durability*

1. INTRODUCTION

The first examples of link chain applications in mining are known from the comprehensive work published in 1556 by Georgius Agricola, titled *De Re Metallica Libri XII*. Book six includes numerous illustrations (Fig. 1) depicting link chains used primarily in vertical bucket elevators intended for pumping water out of underground mines [1, 2].

Link chains replaced hemp ropes which were formerly widespread, but which would quickly decay in damp shaft workings and lose their load capacity. However, the application of chains presented a different disadvantage: damage to a single link would often result in chain failure. Falling chains damaged the structure and lining of shaft ways [3], which ultimately led to the invention of steel ropes in the 19th century.

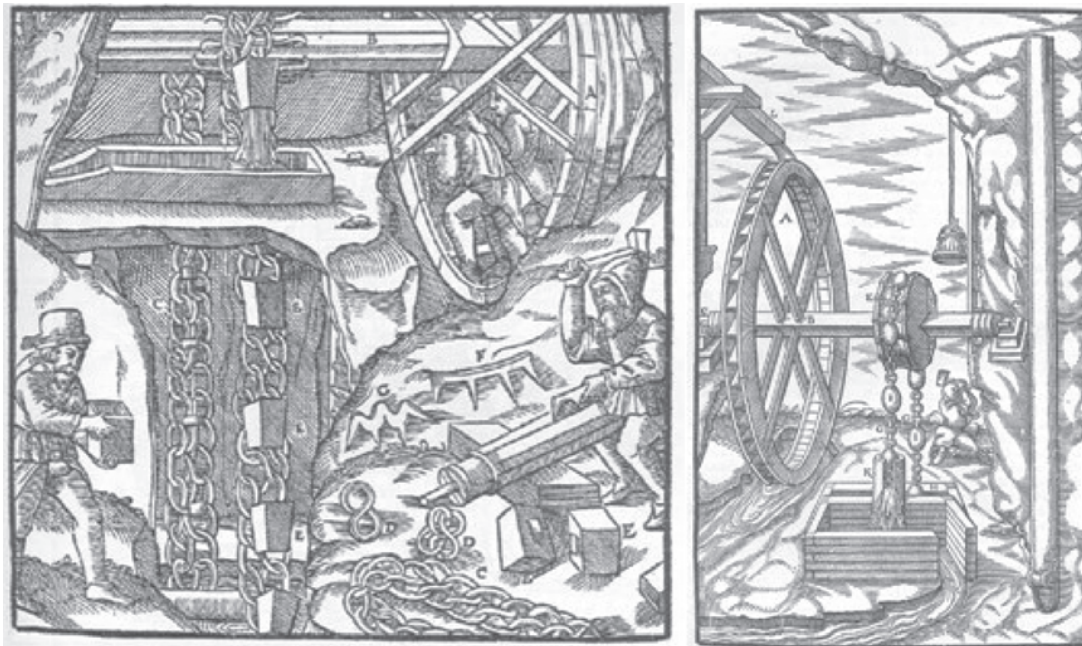


Fig. 1. A bucket chain elevator and a tube chain conveyor [2]

Link chains only saw a resurgence in mining after the introduction of electric link welding – which considerably lowered the production costs and increased the weld quality – and together with the mechanisation of mining processes, particularly with the advent of longwall technology for hard coal deposit extraction.

2. MINING CHAIN DEVELOPMENT

The mechanisation of material transport in hard coal mining began in the 1920s by means of vibrating conveyors, also known as shaker conveyors. The first conveyor utilising a link chain was introduced into mining practice in 1932. It was a retarding disc conveyor, used at inclinations of over 18° (Fig. 2). The purpose of the discs mounted on the chain was to impede the movement of the material rolling down open troughs. Vibrating conveyors and disc conveyors used underground were gradually replaced by chain conveyors [4, 5].



Fig. 2. Retarding disc conveyor

The first chain conveyors were equipped with roller chains, depicted as a diagram in Figure 3 [6]. Such a chain type hindered the relocation of the conveyor, as it allowed the trough track to be bent only in the vertical plane, therefore later conveyor designs began to utilise link chains in the form of strands with dou-

ble outer chains [7]. Initially, these were chains obtained from the shipbuilding industry, e.g. 16×64 mm, i.e. with a pitch equal to four times the diameter, $t = 4 \cdot d$. To increase the conveyor reliability, the chain diameter was increased to 18 mm while retaining a pitch of 64 mm. The chain pitch was retained to preserve the pitch diameter of the drive sprockets and prevent the need to change the drive constructions. On the other hand, the link diameter of 18 mm was the greatest diameter at the time that could be obtained by electrical resistance welding. Only the introduction of flash butt welding in 1952 [6] made it possible to weld chains with greater diameters by means of electric welding. The first longwall chain conveyor equipped with a link chain was tested in the “Bobrek” mine in Upper Silesia, known at the time as “Gräfin-Johanna-Grube”, in 1941 [8, 9].

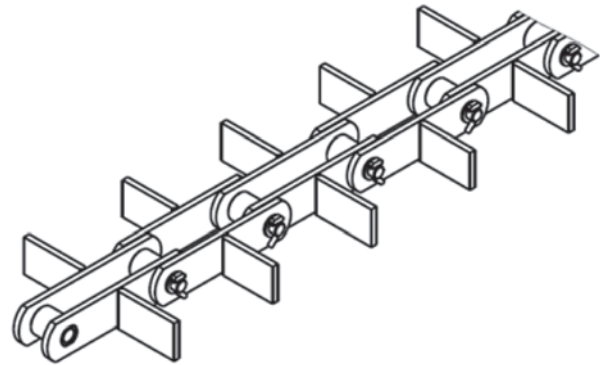


Fig. 3. Example diagram of a roller chain [6]

The demand for hard coal increased after World War II, consequently starting the era of mechanisation in mining. Chains applied in chain conveyors saw a rapid increase in demand, which led to the drafting of the first standard concerning “mining chains”, DIN 22252. Its first edition of March 1951 [10] described only 16×64 mm and 18×64 mm chains.

Initially, mining chains were manufactured in strands of 15 links. The length tolerance was regulated by the standard (+4 mm / -1 mm). It was technologically impossible to produce strands of precisely same length in repeatable series, therefore the 15-link strands were measured and sorted according to the length deviation and subsequently tied into pairs. The pairing of strands with the same length deviation was a result of the using outboard chain assemblies. A typical chain assembly section consists of 2 chain strands, 2 outboard connectors, and 1 scraper (Fig. 4). Depending on the needs, such sections would be com-

bined into series of typical length, e.g. about 10 m, which usually varied based on the logistical capabilities of the user.



Fig. 4. Outboard chain assembly [11]

The development of mining chains was a consequence of increased extraction intensity and the related increased capacity of mining chain conveyors. To increase their operational parameters, the chains were manufactured with gradually increased diameters ($\varnothing 20, 22, 24, 26$ and 30 mm) and progressively better grades of steel [2]. The fourth edition of standard DIN 22252 of December 1973 [12] describes chain sizes that are still in use to this day, e.g. 22×86 mm, 24×87.5 mm, 26×92 mm and 30×108 mm. The 30×108 mm chain was the largest mining chain at the time as well as the first one to be manufactured in long strands and used as a central chain. Initially, the 30×108 mm chain was used as a single central chain, but after the calibration and pairing process was im-

proved, it was also used as a double central chain [13]. The standard [12] introduced a length difference tolerance for strands with lengths of up to 25 m. For a pair of chains, the permissible length difference of both strands was up to 8 mm. The Polish standard PN-G-46701:1997. *Mining link chains* [14] permits a length difference under a test load no greater than 0.15% of the link pitch sum for long chains. Figure 5 presents the history of nominal diameter development for mining chains.

The first type of flat chain was introduced on the market in 1985 [9]. It was a chain with a nominal diameter of 38 mm. All the subsequent chains with greater nominal diameters were flat type chains (Fig. 6), super flat chains or special chains [15]. The 42×137 mm plough chain is an exception in this series, as it was introduced in the form of a regular link chain in 2006. Among the special chains, noteworthy cases include compact chains put into production in the 1980s, whose nominal diameter refers to the horizontal link, whereas the vertical link diameter differs along the link circumference and is typically greater at the bends than the horizontal link diameter. A unique design case includes triple flat chains, whose nominal diameter typically refers to a theoretical computational cross-section. The dates provided in Figure 5 are only approximate, as it is difficult to unanimously declare what should be deemed the date of introduction for a new nominal chain size: the date of the construction design, the patent application, the determination of the manufacturing technology, the first underground use or the inclusion in a standard.

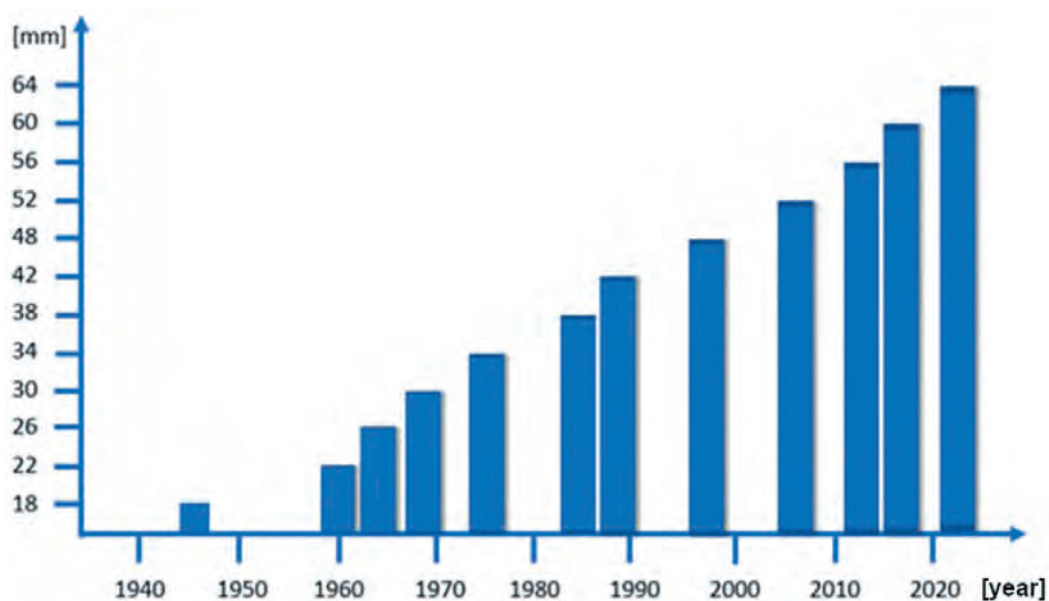


Fig. 5. History of nominal mining chain diameter development

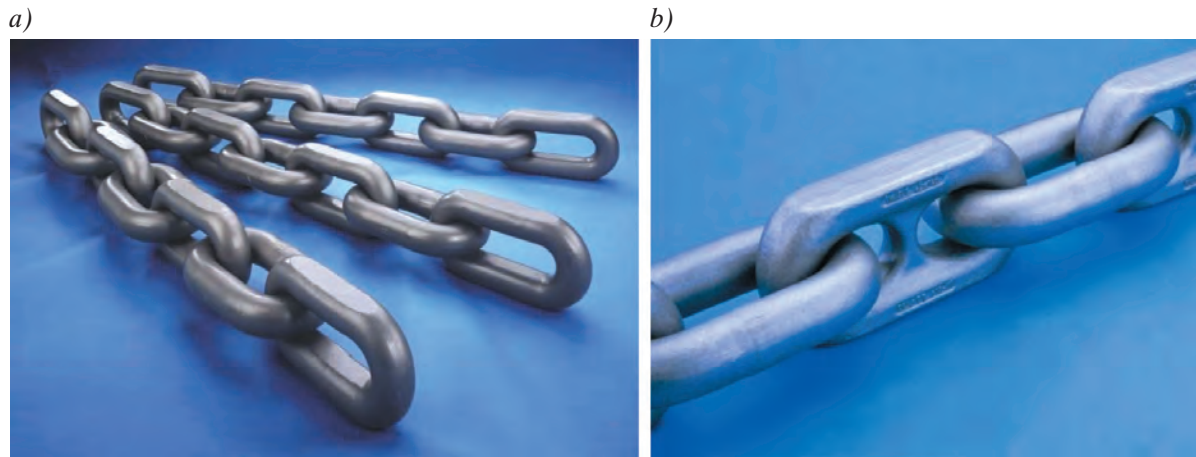


Fig. 6. Chains: a) flat; b) super flat

3. INFLUENCE OF MATERIAL PROPERTIES ON CHAIN PRODUCTION TECHNOLOGY

At the start of the mechanisation period, chains used in mining machines were often still forge welded, i.e. heated in a forge hearth or furnace and forged manually using a hammer. The weld was at the bend, as the welding involved sharp and overlapping bar ends. Welds performed in such a manner did not meet the growing technical needs of the users. The application of resistance welding made it possible to improve the quality of the weld, although its use was limited to links with a bar diameter of 18 mm [6]. Nevertheless, even for mining chains manufactured in this manner, the low quality of the weld was one of the primary reasons for chain failure. Only the introduction of flash butt welding in chain production in 1952 made it possible to significantly improve weld quality. Flash butt welding enabled the development of chains with nominal diameters exceeding $\varnothing 18$ mm. A stable evolution within the scope of chain production can be witnessed since 1940. Market demands resulted in the manufacturing of chains with greater diameters as well as successively increased properties of >900, 1000, 1050, 1100 MPa, which are characterised by significantly higher operational parameters compared to chains per PN and DIN. The applica-

tion of new materials and heat treatment technology made it possible to achieve an optimal and repeatable hardness distribution in each link, as well as to obtain variable hardness in a single link, that is hard bends and plastic straight sections with lower hardness. The type of the applied material and treatment method changed accordingly in successive years, as per the data presented in Table 1.

Currently, the most popular grade of steel used for mining chain production is 1.6758 per the German steel code, that is 23MnNiMoCr54, whose Polish counterpart is called 23G2NMHA. Lower grade steel is often used for chains with link diameters of up to 26 mm, i.e. 23MnNiMoCr52, number 1.6541, whose Polish counterpart is called 23GNMHA. Currently, chain manufacturers utilise the 1.6758 grade of steel with certain modifications concerning the chemical composition.

The chemical composition of the most popular grade of steel used for mining chain production is provided by the relevant standard [16]. The Polish standard [14] does not impose a specific grade of steel on manufacturers. In order to fulfil the requirements of clients in terms of chain strength, fatigue life and the appropriate corrosion protection, chain manufacturers use toughened versions of steel. The publication [17] presents the sample chemical compositions of a 42×137 mm plough chain produced by three different companies (Fig. 7).

Table 1

Type of material and heat treatment

1945	1950	1968	1974	1985	1990	1997
St-35.13K	15Mn3	20MnCr4	23MnNiCrMo64	23MnNiCrMo54	23MnNiCrMo54	23MnNiCrMo54
Natural hardening	Hardening	Hardening and tempering	Hardening and tempering	Hardening and tempering	Double quenching >Ac3	Double quenching >Ac3

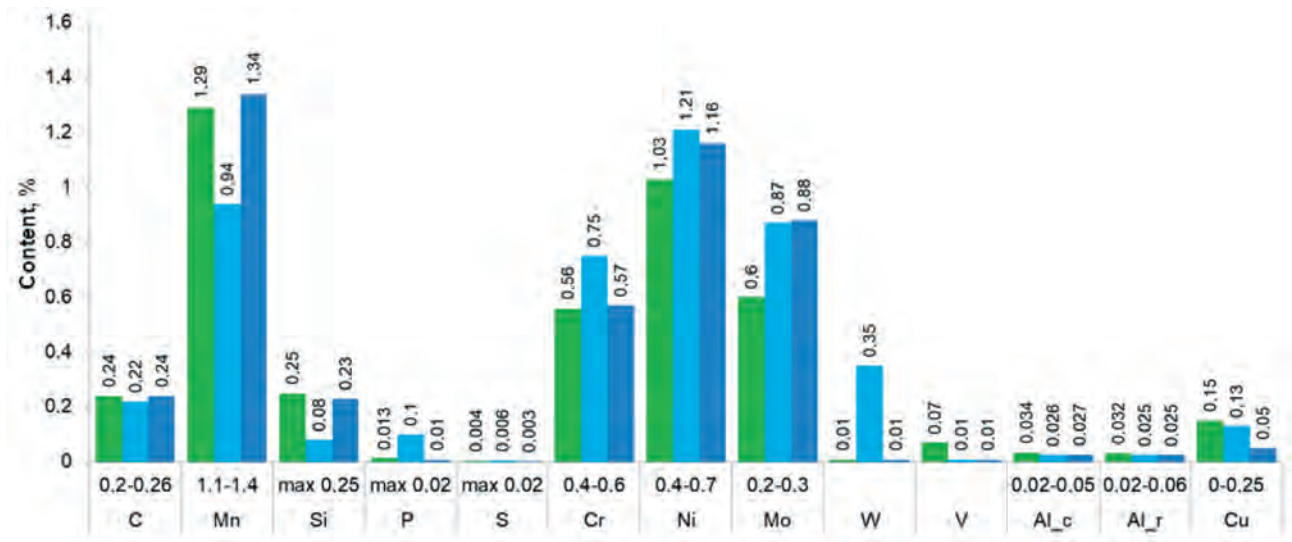


Fig. 7. Example chemical composition of steel

Certain mining chain manufacturers strive to introduce grades of steel on the market that are further improved with the micro-additions of other metals, e.g. wolfram, vanadium, boron and so on. The purpose of these practices is to obtain parameters of steel after heat treatment that would improve the mechanical properties of the mining chains, particularly their impact resistance.

3.1. Influence of material properties on the weldability of steel

The advancements in welding technology led to the development of steel used to form the mining chains. Initially, this included carbon steel (unalloyed), later steel with manganese additions, and only by the end of the 1960s would chain production begin to involve low-alloy steel with manganese, nickel, molybdenum and chromium additions. The first standard describing low-alloy steel for mining chain production was published in 1965. It was the German standard DIN 17115 [18]. Its Polish counterpart is standard PN-89/H-84023/08 [19].

A significant parameter for evaluating the suitability of a given grade of steel for mining chain production is the carbon equivalent C_e . It is a parameter used in welding that expresses the weldability of carbon and low-alloy steel depending on the chemical composition of the steel. It characterises the propensity of a material for developing welding cracks. The carbon equivalent is determined per formula (1) [11]:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + V + Mo}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \% \quad (1)$$

The lower the C_e , the greater a material's weldability. It is assumed that the carbon equivalent also expresses a material's suitability for flash butt welding. Critical carbon equivalent values for flash welding diverge from those acknowledged for fusion welding and are determined experimentally, which is related to the heating temperature and the diameter of the welded bars. It is assumed that flash butt welding can be performed without risk of cracking up to a value of $C_e = 0.8$, whereas the limit for the carbon equivalent for welding is $C_e < 0.9$ [11]. Contaminations, particularly the sulphur and phosphorus contents, also have a significant influence on the weld quality and a material's capacity for welding. Their combined content should not exceed 0.035%. Aluminium and copper are also undesirable alloying components.

3.2. Influence of material properties on chain galvanisation

The problem of mining chain corrosion was solved by the introduction of hot-dip galvanisation, also known as hot dipping, as the zinc is applied on the chain links by means of a several minute long bath in liquid zinc at a temperature of about 440–460°C. During this bath, the zinc atoms undergo diffusion into the crystalline structure of the steel [20], and the surface irregularities and pores are filled with zinc, which generates a layer which strictly adheres to the chain link surface, known as a zinc and steel (zinc-iron) alloy, with a thickness of about 80–120 μm. The coating is characterised by greater adherence to the base and relatively high abrasion resistance.

The quality of the obtained zinc coatings (lustre, smoothness, thickness, adherence etc.) varies and depends on the chemical composition of the steel, particularly on the carbon (C), phosphorus (P) and silicon (Si) contents. The combined carbon and silicon content in the steel should not exceed 0.5%. For steel containing carbon in the form of martensite, an increase in carbon content within 0.01–2.08 wt% systematically increases the reactivity of steel relative to the liquid zinc without extending the linear range of the reaction course. For steel containing silicon, the zinc and iron reaction may proceed with particular intensity, and the contribution of the zinc-iron alloy in the coating will be greater than usual. In extreme cases, the zinc coating may consist completely of the zinc-iron alloy. This phenomenon (known as the Sandelin effect) is observed particularly at silicon contents within 0.03% to 0.14% as well as above 0.25%.

In such cases, the zinc coating is typically dull grey, rough, non-uniform and brittle – vulnerable to deformations and mechanical damage. The influence of the silicon content on the solubility of steel in liquid zinc is presented in Figure 8 [21]. The silicon used in steelmaking leads to a major increase of its reactivity with liquid zinc, which is particularly high at two concentrations of this element, amounting to about 0.1 wt% and about 0.4 wt%.

The zinc coating properties related to the chemical composition of steel are defined in the relevant standard [22]. Therefore, considering the silicon and carbon contents in steel for chain production, the criteria describing the suitability of steel for hot galvanisation can be defined as follows:

$$C + Si < 0.5\% \quad (2)$$

$$0.1 < Si < 0.25\% \quad (3)$$

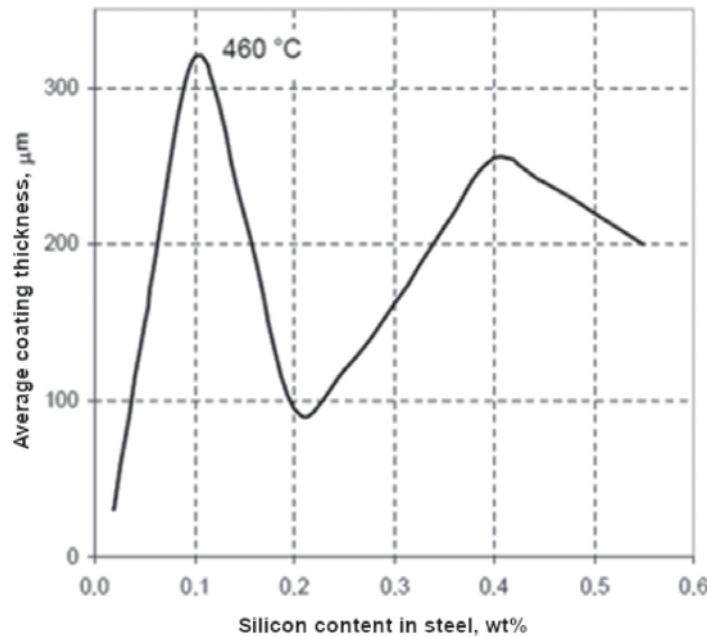


Fig. 8. Influence of silicon on the coating thickness

3.3. The influence of link manufacturing technology on chain strength parameters

For many years, the direction of chain conveyor development has entailed the utilisation of chains formed from thicker bars, better materials and with improved ductility. Initially, experience from mines in western European countries with advanced coal mining demonstrated the validity of this concept. For example [23], in 1983 in France it was shown that a correctly made and selected 26 × 92 mm chain

strand could be used to safely transport 0.6–0.8 Mt of coal under difficult geological and mining conditions, whereas a 34 × 126 mm chain strand could be used for as much as 2.4 Mt of the extracted material. This direction of development led to the production of conveyors with 60 × 189/136 mm chain strands that should be expected to provide even better results. The chart (Fig. 9) presents the progression in the diameter and breaking load values since 1940. As displayed, since 1940 the bar diameter has increased from 16 to 60 mm, while the break load is now 4760 kN.

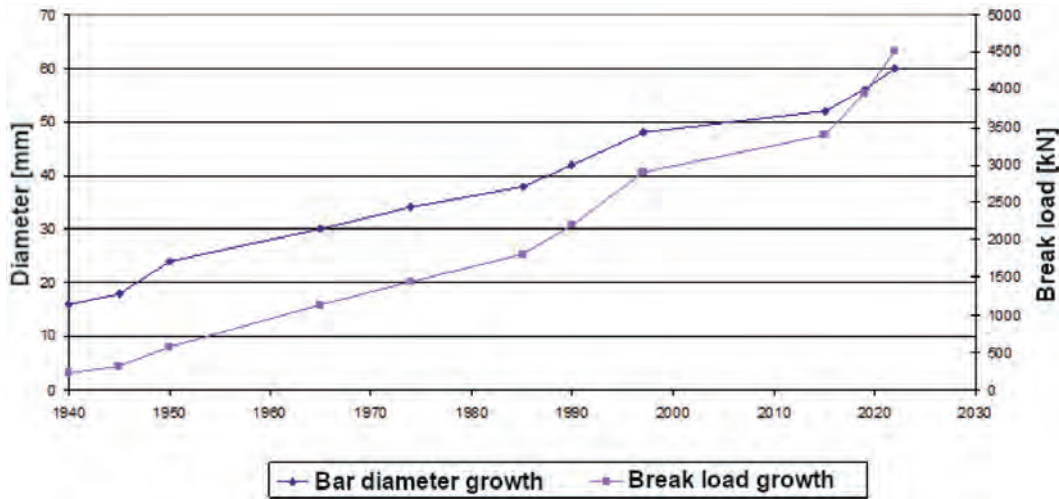


Fig. 9. Strength and geometric parameter progression

3.3.1. Influence of heat treatment on impact resistance

The strength of the steel for chain production has a direct influence on the mining chain quality class, and it depends on the applied heat treatment. A critical step of the multi-stage treatment process, one which determines the final strength parameters, is tempering. In order to identify the relationship between the impact resistance and the tempering temperature of steel for chain production, a series of comparative tests were performed, which compared

samples of 1.6758 steel from four suppliers: A, B, C and D. Figure 10 presents the results of all the tests in the form of charts.

This can best be seen on the example of supplier A that at a temperature range of about 350°C the impact resistance results reach the local minimum, which corresponds to the tempering temperatures of class D chains. High impact resistance values are obtained at tempering temperatures above 450°C, and it is class C chains that undergo tempering at such temperature ranges.

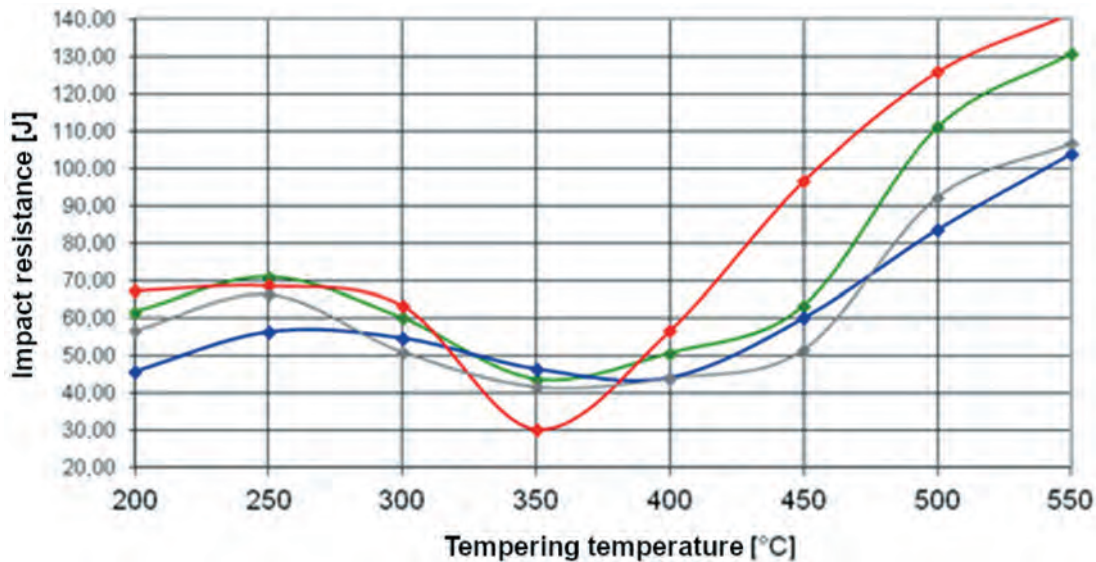


Fig. 10. Test results for impact resistance relative to tempering temperature for steel samples from suppliers A, B, C and D

3.3.2. The influence of the galvanisation process on strength parameters

Experimental tests described in [23] confirmed that hot-dip galvanisation decreases the mechanical prop-

erties of high-strength grades of steel as a result of the additional tempering of the martensitic structure. The key advantage of such steel is the high strength of the material (ductility and tensile strength). Steel

with high silicon, chromium, molybdenum, and manganese content is characterised by high hardness together with high strength. It has a high yield point as well as tensile strength. In the case of this type of steel, the change in the yield point and tensile strength resulting from the hot-dip galvanisation will be considerable. The tests conducted as part of the publication [24] noted a decrease in tensile strength by 17%, whereas 14% was the result obtained as part of the publication [25]. The results described in these works confirm that high-strength steel is only suitable for hot-dip galvanisation when the degree of the strength parameter reduction is known.

4. ANALYSIS OF THE SIZE AND DESIGN OF MINING CHAINS USED IN THE INTERNATIONAL MINING INDUSTRY

The general trend to use increasingly higher nominal mining chain diameters finds confirmation on the example of the volumes produced by one of the leading mining chain manufacturers [26]. The data displayed in Figure 11 is not representative for the total global production, but it nevertheless provides an idea of the approximate percentage contributions of the individual sizes. Periods when specific sizes would dominate the production can be observed when analysing the individual mining markets. On the example of the American market, it can be concluded that the machinery undergoes modernisation about every 10 years, which is followed by a transition to another size of mining chains used in longwall conveyors. In

the 1980s, 34×126 mm link chains were the most popular in the USA, before they were supplanted by flat 38×126 mm chains. After the year 2000, flat 42×146 mm chains were the most commonly applied, whereas after 2010 the market was dominated by chains with a link diameter of 48 mm. Currently, the authors are aware of existing installation modernisation projects aimed at applying chains with a nominal diameter of 52 mm.

The intensification of the production in longwall faces combined with increasingly greater conveyor chain sizes results in an increase of the chain life, measured in tons of transported material, which amounts to a gross weight of 10–12 million tons of material in the case of chains with a nominal diameter of $\varnothing 48$ mm.

In terms of their performance, the mining chain life is primarily limited by the operational conditions, i.e. the coal production intensity, the rock content, the mining conditions, and particularly the prospective occurrence of corrosion, and amounts to 12–24 months regardless of the size and type of the chain.

At the same time, a trend can be observed towards utilising increasingly flatter chains, as a result of adapting their design to the limited dimensions of chain conveyors with the simultaneous increase in the installed electric motor power. The relatively small contribution of triple flat chains visible in Figure 12 is a consequence of their high costs of production and the patent restrictions that limit the possibilities of their circulation. The percentage contribution of specific mining chain types and sizes on individual markets depends on the extraction intensity, the development level of the mining technology and the financial capabilities of the local coal producers.

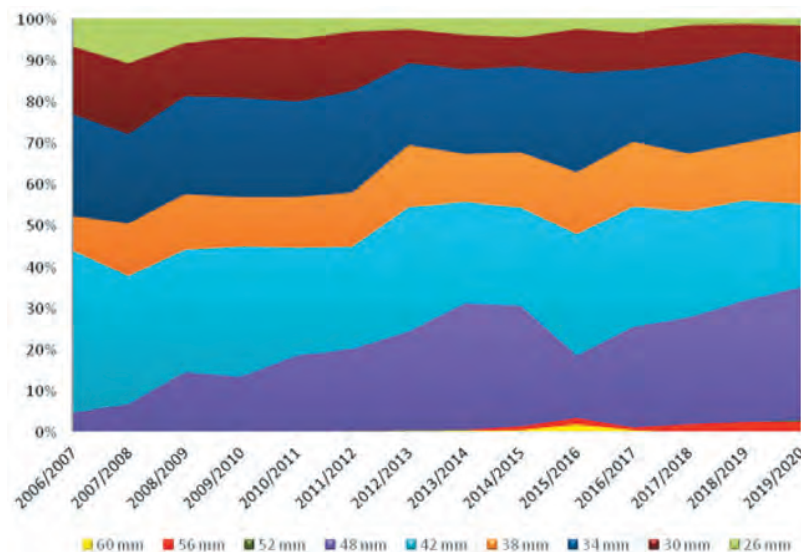


Fig. 11. Percentage contribution of individual mining chain sizes [27]

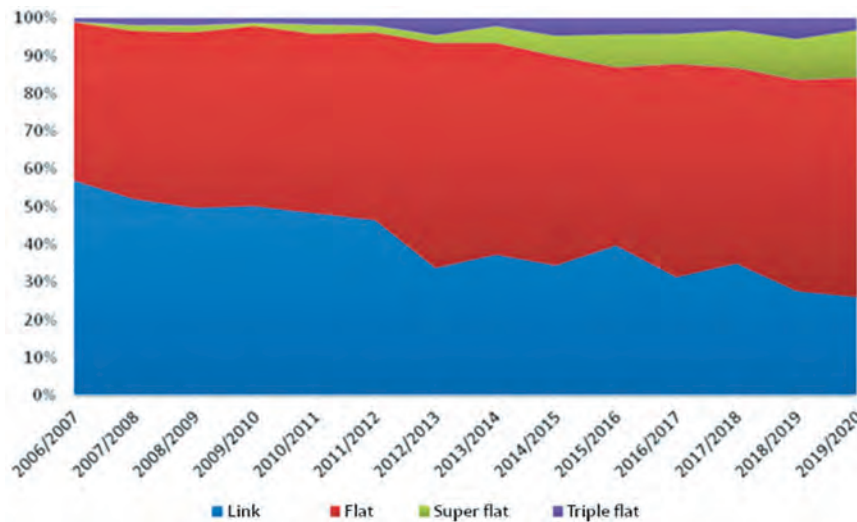


Fig. 12. Percentage contribution of individual mining chain designs on the example of a mining chain manufacturer's overall production [27]

5. CONCLUSIONS

This paper contains a summary of laboratory testing results and the literature review conducted. The first link chains used in mining machinery had a diameter of 16 mm. The smallest chains used in mining conveyors are 14×50 mm, whereas the biggest chains that currently find application in such conveyors have a nominal diameter of 60 mm. Development work is already being conducted on next-generation chains with nominal diameters of 64 mm and $\varnothing 68$ mm. The trend towards increasing the chain diameters has been going on for nearly the last 80 years of mining machinery history, even though it had appeared like a technical limit regarding their production was reached several times already. It also seemed that the application of increasingly greater diameters would not be necessary due to the installation of increasingly powerful motors in chain conveyors and ploughs in order to improve their efficiency. The presented information demonstrates that not every material or type of heat treatment can be used indiscriminately in chain manufacturing. The development of new grades of high-strength steel had a significant influence on the advancements in chain production. Apart from improving the mining chain load-bearing capacity as a consequence of the increased link diameters, the work of the designers and technologists was focused on the following goals:

- to increase the chain strength following the application of new grades of steel,
- to unify the mechanical parameters through precise heat treatment,

- to decrease the vertical link height in combined chains, enabling chain conveyor height reduction,
- to extend chain life by designing links of shapes enabling the slower elongation of chain pitch,
- to obtain repeatable link shapes, particularly in terms of their pitch.

The current trend in development is to design chains equipped with load measurement sensors enabling constant load monitoring as well as chain pre-tensioning control and protection against overloads following the excessive loading or jamming of the conveyor. Work in this scope is being conducted by several research and development centres associated with chain conveyor producers as well as chain manufacturers. Integrating force measurement sensors in a moving conveyor chain is a difficult technical challenge due to the technological barriers pertaining to both the miniaturisation of the measuring system as well as the power supply and the capabilities for measurement data transformation.

Hard coal production by means of longwall mining will remain a major part of the global production of this resource over the next two decades. Given the increase in efficiency and the need to monitor production in order to improve extraction safety, the continued development of the designs and sizes of mining chains should be expected, while the levels of their current demand will remain the same on a global scale.

References

- [1] Agricola G.: *De Re Metallica Libri XII*. Bazylea 1556; *Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen gehören...* Sechstes Buch. Schiffner C., Darmstaedter E. (übersetzt und bearb.). VDI-Verlag, Düsseldorf 1978.

- [2] Philipp G.B., Thiele U., Cooper J.R.: *Eine neue Flachkette mit paßgenauen Kettenrädern für Hochleistungsstreben*. Glückauf 1993, 9: 682–688.
- [3] Philipp G.B.: *Grenzen der Technik – Lebensdauer von Bauteilen – August Wöhlers Schaffen und seine Verdienste*. Bergbau 2008, 5: 224–229.
- [4] Paschedag U.: *Face conveyor systems*. In: Junker M., Lemke M., Heiderich R.-M., Langefeld O., Mozar A., Paschedag U., Philipp G., Witthaus H.: *Technical developments in coal winning*. Vulkan-Verlag GmbH, Essen 2018: 181–224.
- [5] Paschedag U.: *Entwicklungen in der Strebfordertechnik in den letzten 50 Jahren*. Bergbau 2018, 4: 175–182.
- [6] Philipp G.B.: *Die Rundstahlkette als Element der Leistungsübertragung bei Förderern im Strebbau*. RWTH, Aachen 1999 [PhD Dissertation].
- [7] Spies K.: *Leistungsübertragung mit Rundstahlketten*. Glückauf 1993, 6: 411–415.
- [8] Dreher H.: *Górnictwo nie jest sprawą jednego*. XI Międzynarodowa Konferencja Techniki Urabiania „TUR 2019”, Krynica-Zdrój, 17–20 września 2019 r. [conference paper].
- [9] Philipp G.B.: *Conveyor chains, plow chains and flight bars*. In: Junker M., Lemke M., Heiderich R.-M., Langefeld O., Mozar A., Paschedag U., Philipp G., Witthaus H.: *Technical developments in coal winning*. Vulkan-Verlag GmbH, Essen 2018: 225–247.
- [10] DIN 22252, März 1951. *Rundgliederketten*.
- [11] Forch K.: *Werkstoffkundliches Seminar*. Iserlohn, 17.02.2001.
- [12] DIN 22252, Dezember 1973. *Hochfeste Rundstahlketten für den Bergbau*.
- [13] Philipp G.B.: *Chain Matching – The key for high-extraction-rate longwalls*. Glückauf 1998, 2: 24–27.
- [14] Polska Norma PN-G-46701:1997. *Łańcuchy ogniwowe górnice*.
- [15] Kandzia R.: *Kompendium wiedzy o ogniowych łańcuchach górnicych*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze 2018, 1(39): 69–76.
- [16] DIN 22252, Juli 2012. *Rundstahlketten für Stetigförderer und Gewinnungsanlagen im Bergbau*.
- [17] Kandzia R., Szot M.: *Fatigue Life Testing of the Round Link Mining Chains*. Management Systems in Production Engineering 2023, 31(1): 78–85.
- [18] DIN 17115, Juli 2021, *Stähle für geschweißte Rundstahlketten und Ketten-Einzelteile – Technische Lieferbedingungen*.
- [19] Polska Norma PN-H-84023-08:1989. *Stal określonego zastosowania – Stal na łańcuchy ogniwowe – Gatunki*.
- [20] American Galvanizers Association: *Hot-Dip Galvanizing – Abrasion Resistance*. <https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/why-specify-galvanizing/durability> [4.06.2021].
- [21] Głuszko M.: *Zagadnienia ochrony antykorozyjnej konstrukcji stalowych oraz urządzeń elektroenergetycznych eksploatowanych w warunkach atmosferycznych*. Prace Instytutu Elektrotechniki, z. 235, Instytut Elektrotechniki, Warszawa 2008.
- [22] Polska Norma PN-EN ISO 14713-2:2020-07. *Powłoki cynkowe – Wytyczne i zalecenia dotyczące ochrony przed korozją konstrukcji z żeliwa i stali – Część 2: Cynkowanie zanurzeniowe*.
- [23] Schriever K.: *Neue Antriebssysteme für den Bergbau unter Tage*. Glückauf, z. 235, Instytut Elektrotechniki, Warszawa 2008.
- [24] Šmak M., Kubiček J., Kala J., Podaný K., Vaněrek J.: *The influence of Hot-Dip Galvanizing on the Mechanical Properties of High-Strength Steels*. Materials 2021, 14(18): 5219.
- [25] Gunalan S., Mahendran M.: *Experimental investigation of post-fire mechanical properties of cold-formed steels*. Thin-Walled Structures 2014, 84: 241–254.
- [26] Azhari F., Heidarpour A., Zhao X.L., Hutchinson C.R.: *Mechanical properties of ultra-high strength (Grade 1200) steel tubes under cooling phase of a fire: An experimental investigation*. Construction and Building Materials 2015, 93: 841–850.
- [27] Unpublished company internal statistical analyses, 2021.

RICHARD KANDZIA, Ph.D., Eng.
r.kandzia@thiele.de
THIELE GmbH & Co.KG
Werkstr. 3, 58640 Iserlohn, Germany

MARIUSZ SZOT, Ph.D., Eng.
mszot@gig.eu
GIG Central Mining Institute
pl. Gwarków 1, 40-166 Katowice, Poland

RICHARD KANDZIA
MARIUSZ SZOT

Technologiczne aspekty rozwoju produkcji górniczych łańcuchów ogniowych

W artykule przedstawiono krótką historię rozwoju oraz typy aktualnie produkowanych łańcuchów górniczych, ich udział w rynku światowym. Określono kierunki rozwoju łańcuchów ogniowych górniczych w zakresie stosowanych materiałów i parametrów wytrzymałościowych. Wykazano negatywny wpływ niektórych czynników, które obniżają własności użytkowe łańcuchów ogniowych górniczych.

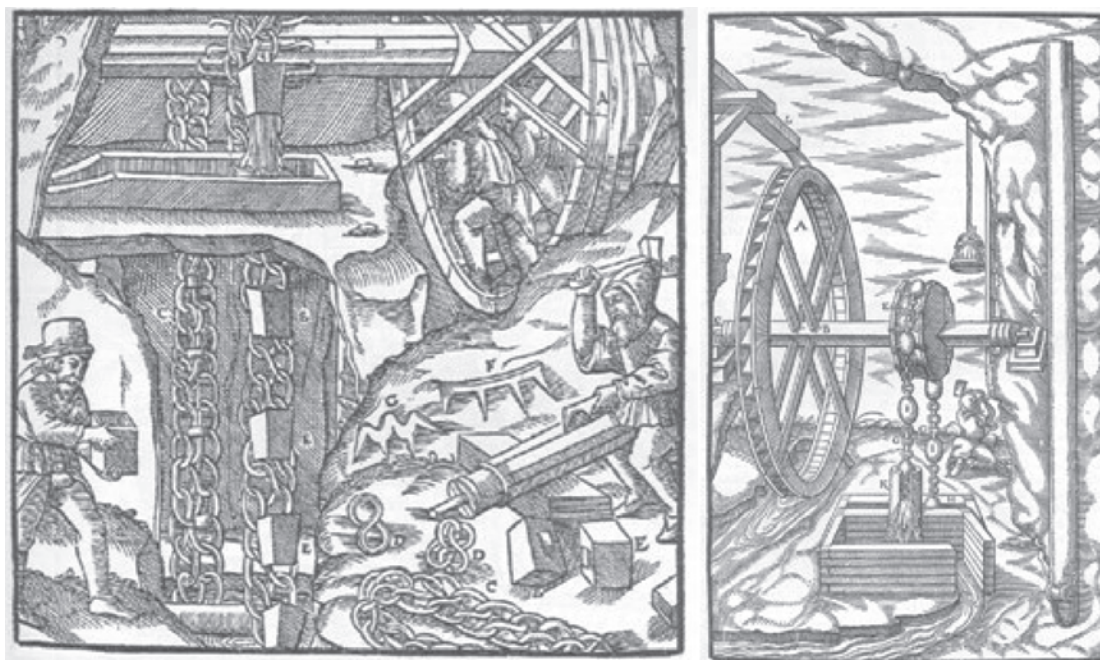
Słowa kluczowe: łańcuch, bezpieczeństwo, trwałość

1. WPROWADZENIE

Pierwsze przykłady zastosowania łańcuchów ogniowych w górnictwie znane są z obszernej pracy opublikowanej w roku 1556 przez Georgiusa Agricolę pod tytułem *De Re Metallica Libri XII*. W księdze szóstej zamieszczone są liczne ilustracje (rys. 1), na których widoczne są łańcuchy ogniowe wykorzystywane głównie w pionowych przenośnikach kubelko-

wych służących do wypompowania wody z podziemi kopalń [1, 2].

Łańcuchy ogniowe zastąpiły wcześniej rozpowszechnione liny konopne, które w wilgotnych wyrobiskach szybowych szybko butwiały, tracąc swą nośność. Stosowanie łańcuchów miało jednak inną wadę: uszkodzenie pojedynczego ogniwa często powodowało zerwanie łańcucha. Opadające łańcuchy niszczyły konstrukcję i obudowę przedziałów szybowych [3], co ostatecznie w XIX wieku doprowadziło do wynalezienia lin stalowych.



Rys. 1. Czerpadło łańcuchowe ciągnowe oraz łańcuchowy przenośnik rurowy [2]

Renesans stosowania łańcuchów ogniowych w górnictwie nastąpił dopiero po wprowadzeniu elektrycznego zgrzewania ogni, co znacznie obniżyło ich koszt produkcji i podniosło jakość zgrzein, oraz wraz z mechanizacją procesów wydobywczych, a w szczególności po wprowadzeniu technologii ścianowej przy eksploatacji pokładów węgla kamiennego.

2. ROZWÓJ ŁAŃCUCHÓW GÓRNICZYCH

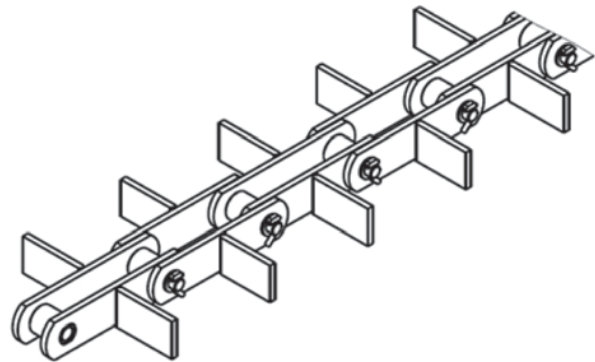
Mechanizacja transportu urobku w górnictwie węgla kamiennego rozpoczęła się w latach 20. XX wieku za pomocą przenośników wibracyjnych, tzw. rynien wstrząsanych. Pierwszy przenośnik wykorzystujący łańcuch ogniowy wprowadzono do eksploatacji w 1932 roku. Był to hamujący przenośnik tarczowy, stosowany na upadach powyżej 18° (rys. 2). Zadaniem tarcz zamontowanych na łańcuchu było wyhamowanie urobku staczającego się w otwartych rynnach. Przenośniki wibracyjne i przenośniki tarczowe zostały pod ziemią stopniowo wyparte przez przenośniki zgrzeblowe [4, 5].



Rys. 2. Hamujący przenośnik tarczowy [4, 5, 8]

Pierwsze przenośniki zgrzeblowe były wyposażone w łańcuchy drabinkowe (galla) schematycznie pokazane na rysunku 3 [6]. Taki typ łańcucha utrudniał przekładkę przenośnika, ponieważ umożliwiał przeginięcie trasy rynnościagu tylko w płaszczyźnie pionowej, dlatego w późniejszych konstrukcjach przenośników

zastosowano łańcuchy ogniowe w postaci ciągów z podwójnymi łańcuchami skrajnymi [7]. Początkowo były to łańcuchy zapożyczone z przemysłu okrętowego, np. $16 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$, tzn. o podziałce równej czterokrotności jego średnicy $t = 4 \cdot d$. W celu zwiększenia niezawodności przenośników zwiększono średnicę łańcuchów do 18 mm, zachowując jednocześnie podziałkę 64 mm. Zachowanie podziałki łańcucha wiązało się z zachowaniem średnicy podziałowej gwiazdy napędowej, co nie wymagało zmiany konstrukcji napędów. Natomiast średnica ogni 18 mm była wtedy największą średnicą, którą można było zgrzewać przy zastosowaniu metody zgrzewania oporowego. Dopiero wprowadzenie zgrzewania wyiskrzeniowego w 1952 roku [6] pozwoliło na elektryczne zgrzewanie łańcuchów o większych średnicach. Pierwszy ścianowy przenośnik zgrzeblowy wyposażony w łańcuch ogniowy został wypróbowany w kopalni „Bobrek” na Górnym Śląsku (wówczas „Gräfin-Johanna-Grube”) w roku 1941 [8, 9].



Rys. 3. Schematyczny przykład łańcucha drabinkowego (galla) [6]

Po drugiej wojnie światowej wzrosło zapotrzebowanie na węgiel kamienny, a w ślad za tym rozpoczęła się era mechanizacji górnictwa. W krótkim czasie zwiększyło się zapotrzebowanie na łańcuchy stosowane w przenośnikach zgrzeblowych, co doprowadziło do powstania pierwszej normy na tzw. łańcuchy górnicze – DIN 22252. Jej pierwsze wydanie z marca 1951 roku [10] uwzględniało jedynie łańcuchy $16 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$ i $18 \text{ mm} \times 64 \text{ mm}$.

Początkowo łańcuchy górnicze były produkowane w odcinkach po 15 ogni. Tolerancję długości regulowała norma (+4 mm / -1 mm). Technologicznie nie było możliwe produkowanie odcinków o dokładnie tej samej długości w powtarzalnych seriach, dlatego odcinki 15-ogniowe były mierzone i sortowane według odchyłki długości, a następnie wiązane w pary. Wiązanie odcinków o tej samej odchyłce długości w pary wynikało ze sposobu pracy ciągów łańcuchowych w tzw. trasach z łańcuchami skrajnymi. Typowy

odcinek trasy łańcuchowej składa się z dwóch odcinków łańcucha ogniowego, dwóch zamków bocznych oraz jednego zgrzebła (rys. 4). W zależności od potrzeb takie odcinki łączyło się w sekcje o typowej długości, np. około 10 m, co zazwyczaj zależało od możliwości logistycznych użytkownika.

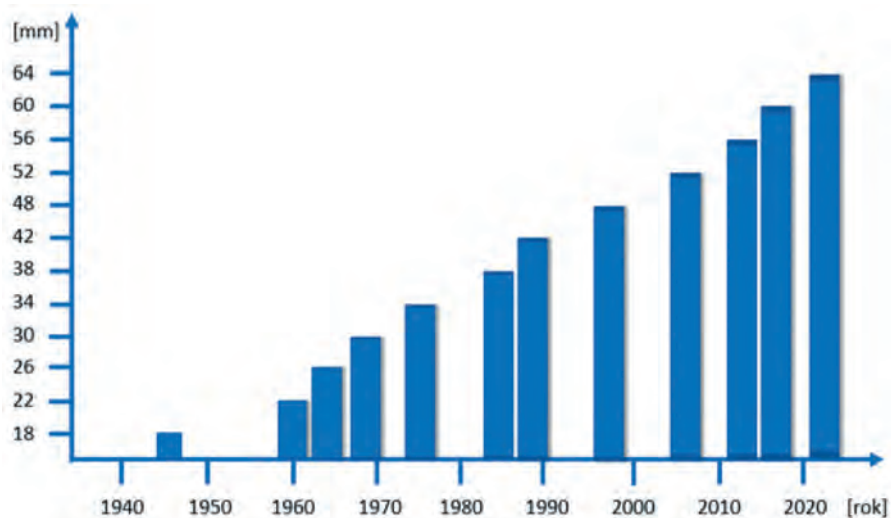


Rys. 4. Trasa łańcuchowa z zewnętrznym prowadzeniem łańcuchów [11]

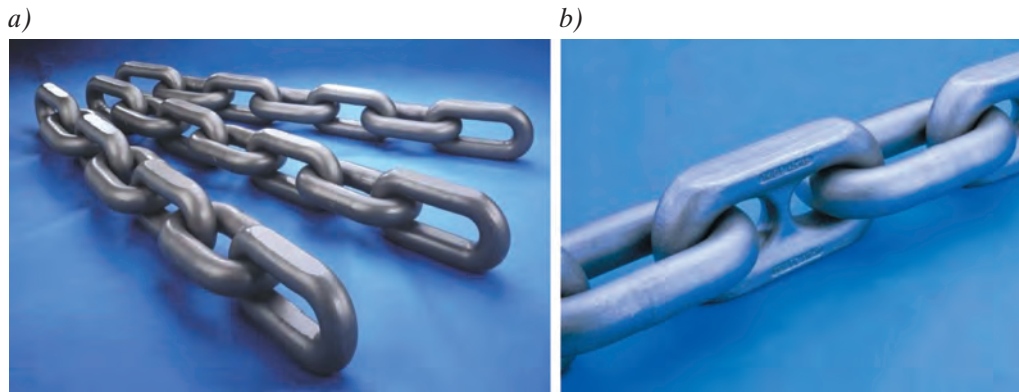
Rozwój łańcuchów górniczych wynikał ze wzrostu intensywności wydobywania i związanej z tym wydajności górniczych przenośników zgrzeblowych. Aby podnieść parametry użytkowe, zwiększano stopniowo średnice łańcuchów ($\varnothing 20$ mm, 22 mm, 24 mm, 26 mm i 30 mm) oraz stosowano coraz to lepsze gatunki stali [2]. Czwarte wydanie normy DIN 22252 z grudnia 1973 roku [12] wymienia znane jeszcze obecnie łańcuchy, np. 22 mm \times 86 mm, 24 mm \times 87,5 mm, 26 mm \times 92 mm i 30 mm \times 108 mm. Łańcuch 30 mm \times 108 mm był w tym czasie największym łańcuchem górniczym i pierwszym, który zaczęto produkować w długich odcinkach i stosować jako łańcuch centralny. Początkowo stosowano łańcuch 30 mm \times 108 mm jako pojedynczy łańcuch centralny, a po udoskonaleniu procesu kalibracji

i parowania również jako podwójny łańcuch centralny [13]. Norma [12] wprowadza tolerancję różnicy długości dla odcinków o długości do 25 m. Dla pary łańcuchów dopuszcza się różnicę długości obu odcinków do 8 mm. Polska Norma PN-G-46701:1997. *Łańcuchy ogniowe górnicze* [14] dla łańcuchów długich dopuszcza różnicę długości pod obciążeniem próbnym nie większą niż 0,15% sumy podziałek ogniw. Na rysunku 5 pokazana jest historia rozwoju średnic nominalnych łańcuchów górniczych wykonywanych z prętów okrągłych.

Pierwszy łańcuch płaski został wprowadzony na rynek w roku 1985 [9]. Był to łańcuch o średnicy nominalnej pręta 38 mm. Wszystkie kolejne łańcuchy o większych średnicach nominalnych były łańcuchami płaskimi (rys. 6), superpłaskimi lub łańcuchami o konstrukcjach specjalnych [15]. Wyjątek w tym szeregu stanowi łańcuch strugowy 42 mm \times 137 mm, który pojawił się w formie zwykłego łańcucha ogniowego w roku 2006. Wśród łańcuchów specjalnych wyróżniają się łańcuchy kompaktowe wprowadzone do produkcji w latach 80. XX wieku, w których średnica nominalna odnosi się do ogniwa poziomego, natomiast średnica ogniw pionowych jest zróżnicowana na obwodzie, a na łukach zazwyczaj większa niż średnica ogniwa poziomego. Szczególnym przypadkiem konstrukcyjnym są łańcuchy potrójnie niskie, w których średnica nominalna odnosi się zazwyczaj do teoretycznego przekroju obliczeniowego. Daty podane na rysunku 5 są tylko orientacyjne, ponieważ trudno jednoznacznie ustalić, co należy uznać za datę wprowadzenia nowego rozmiaru nominalnego łańcucha: czy datę opracowania konstrukcji, zgłoszenia patentowego, ustalenia technologii produkcji, pierwszego wdrożenia pod ziemią, czy wpisania do normy.



Rys. 5. Historia rozwoju średnic nominalnych łańcuchów górniczych



Rys. 6. Łańcuchy: a) płaskie; b) superpłaskie

3. WPŁYW WŁASNOŚCI MATERIAŁOWYCH NA TECHNOLOGIĘ PRODUKCJI ŁAŃCUCHÓW

Łańcuchy wykorzystywane w maszynach górniczych w początkach mechanizacji były jeszcze często zgrzewane ogniskowo, tzn. rozgrzewane na palenisku koksowym lub w piecu, a następnie kute ręcznie za pomocą młota. Zgrzeina znajdowała się na łuku, co wynikało z faktu, iż zgrzewano zaostrzone i nachodzące na siebie końcówki pręta. Tak wykonywane zgrzeiny nie odpowiadały rosnącym wymaganiom technicznym użytkowników. Zastosowanie zgrzewania oporowego pozwoliło na poprawę jakości zgrzeiny, ale jego stosowanie było ograniczone do ogniw o średnicy pręta 18 mm [6]. Jednak również w tak produkowanych łańcuchach górniczych słaba jakość zgrzeiny była jedną z głównych przyczyn zrywania łańcuchów. Dopiero wprowadzenie zgrzewania wyiskrzeniowego do produkcji łańcuchów w roku 1952 pozwoliło na zdecydowaną poprawę jakości zgrzein. Technologia zgrzewania wyiskrzeniowego umożliwiła rozwój łańcuchów o średnicach nominalnych powyżej 18 mm. Od 1940 roku następuje ciągły rozwój w zakresie produkcji łańcuchów. Potrzeba rynku spowodowała uruchomienie produkcji łańcuchów o zwiększonych średnicach i łańcuchów o podwyższonych własnościach kolejno >900 MPa, 1000 MPa, 1050 MPa, 1100 MPa, które charakteryzują się znacznie wyższymi parametrami użytkowymi w porównaniu z łańcuchami we-

dług PN, DIN. Stosowane nowe materiały i technologia obróbki cieplnej pozwoliły na osiągnięcie optymalnego i powtarzalnego rozkładu twardości w każdym ogniwie, jak również uzyskać zmienną twardość w pojedynczym ogniwie, czyli twarde łuki i uplastycznione odcinki proste o niższej twardości. Odpowiednio w kolejnych latach zmieniano rodzaj stosowanego materiału oraz rodzaj obróbki – dane zestawiono w tabeli 1.

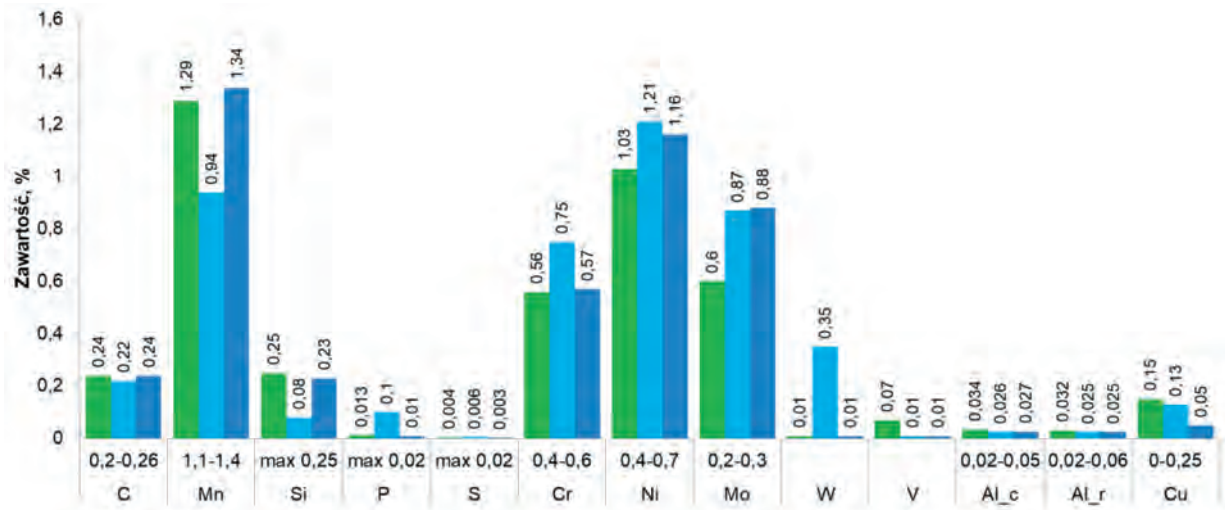
Obecnie najpopularniejszym gatunkiem stali wykorzystywanym do produkcji łańcuchów górniczych jest 1.6758 według niemieckiego klucza stali, czyli 23MnNiMoCr54, którego polski odpowiednik nosi nazwę 23G2NMHA. Dla łańcuchów o średnicach ogniw do 26 mm wykorzystuje się często stal niższego gatunku, 23MnNiMoCr52, numer 1.6541, której polski odpowiednik nosi nazwę 23GNMHA. Obecnie do produkcji łańcuchów stosowany jest gatunek stali o numerze 1.6758, z pewnymi modyfikacjami dotyczącymi składu chemicznego.

Skład chemiczny najpopularniejszego gatunku stali wykorzystywanego do produkcji łańcuchów górniczych podaje norma [16]. Norma polska [14] nie narzuca producentom łańcuchów określonego gatunku stali. Producenci łańcuchów, aby spełnić wymagania zamawiających w zakresie wytrzymałości łańcuchów, trwałości zmęczeniowej, odpowiedniego zabezpieczenia korozyjnego stosują ulepszone wersje stali. W pracy [17] przedstawiono przykładowe składy chemiczne łańcucha strugowego 42 mm × 137 mm trzech różnych producentów (rys. 7).

Tabela 1

Rodzaj materiału i obróbki cieplnej

1945	1950	1968	1974	1985	1990	1997
St-35.13K	15Mn3	20MnCr4	23MnNiCrMo64	23MnNiCrMo54	23MnNiCrMo54	23MnNiCrMo54
Naturalne hartowanie	Hartowanie	Hartowanie z odpuszczaniem	Hartowanie z odpuszczaniem	Hartowanie z odpuszczaniem	Hartowanie podwójne >Ac3	Hartowanie podwójne >Ac3



Rys. 7. Przykładowy skład chemiczny stali

Poszczególni producenci łańcuchów górnich starają się wprowadzić na rynek gatunki stali, które dodatkowo wzbogacane są mikrododatkami innych metali, np. wolframu, wanadu, boru i innych. Celem tych praktyk jest uzyskanie po obróbce termicznej takich parametrów stali, które poprawią własności mechaniczne łańcuchów górnich, a w szczególności osiągnięcie wyższej udarności.

3.1. WPŁYW WŁASNOŚCI MATERIAŁOWYCH NA ZGRZEWALNOŚĆ STALI

Wraz z rozwojem technologii zgrzewania nastąpił rozwój stali, z których wykonywano łańcuchy górnicze. Początkowo były to stale węglowe (niestopowe), następnie stale z dodatkiem manganu, a dopiero pod koniec lat sześćdziesiątych XX wieku do produkcji łańcuchów zaczęto stosować stale niskostopowe z dodatkiem manganu, niklu, molibdenu i chromu. W roku 1965 została wydana pierwsza norma opisująca stale niskostopowe do produkcji łańcuchów górnich. Była to norma niemiecka DIN 17115 [18]. Jej polskim odpowiednikiem jest norma PN-89/H-84023/08 [19].

Istotnym parametrem pozwalającym ocenić przydatność danego gatunku stali do produkcji łańcuchów górnich jest tzw. równoważnik węgla C_e . Jest to parametr stosowany w spawalnictwie mówiący o spawalności stali węglowych i niskostopowych w zależności od składu chemicznego stali. Charakteryzuje on skłonność materiału do występowania pęknięć spawalniczych. Równoważnik węgla wyznacza się ze wzoru (1) [11]:

$$C_e = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + V + Mo}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \% \quad (1)$$

Im niższa wartość C_e , tym lepsza spawalność materiału. Zakłada się, że równoważnik węgla ocenia zdolność materiału również do zgrzewania wyiskrzeniowego. Wartości krytyczne równoważnika węgla dla zgrzewania odbiegają od wartości uznanych dla spawania i są wyznaczane doświadczalnie, co związane jest z temperaturą podgrzania i średnicą zgrzewanych prętów. Przyjmuje się, że zgrzewanie wyiskrzeniowe można przeprowadzić bez ryzyka pęknięć do wartości $C_e = 0,8$, natomiast wartością graniczną równoważnika węgla dla zgrzewania jest $C_e < 0,9$ [11]. Duży wpływ na jakość zgrzeiny i zdolność materiału do zgrzewania mają również zanieczyszczenia, a w szczególności zawartość siarki i fosforu. Ich łączna ilość nie powinna przekraczać 0,035%. Niepożądane jako składniki stopowe są również aluminium i miedź.

3.2. Wpływ własności materiałowych na cynkowanie łańcuchów

Rozwiązaniem problemu korozji miało okazać się wprowadzenie cynkowania ogniowego łańcuchów górnich, nazywanego również cynkowaniem zanurzeniowym, ponieważ nanoszenie cynku na ogniwa łańcucha odbywa się podczas kilkuminutowej kąpeli w ciekłym cynku, w temperaturze około 440–460°C. Podczas tej kąpeli dochodzi do dyfuzji atomów cynku w strukturę krystaliczną stali [20], wypełnienia powierzchniowych nierówności i porów cynkiem, w wyniku czego tworzy się warstwa bardzo ściśle przylegająca do powierzchni ogniwa łańcucha określana jako stop stal-cynk (żelazo-cynk) o wysokości około 80–120 μm. Powłoka ta charakteryzuje się dużą przyczepnością do podłoża oraz stosunkowo dużą odpornością na ścieranie.

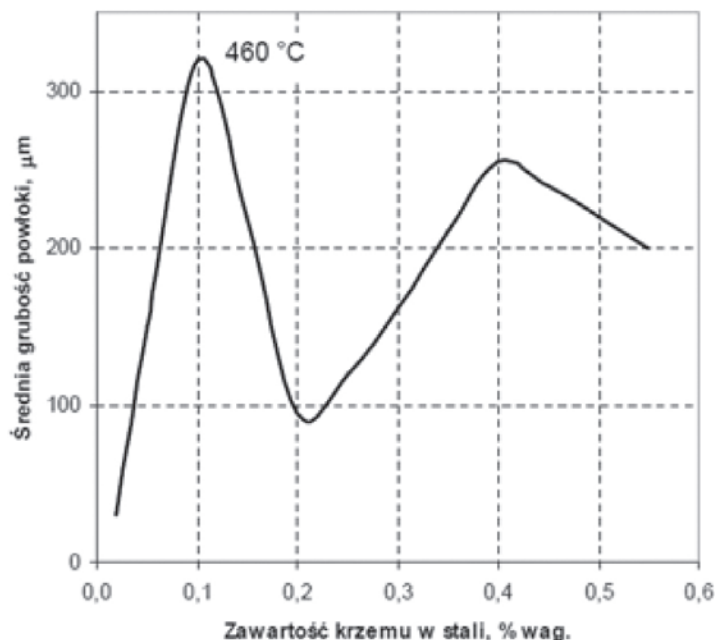
Jakość uzyskiwanych powłok cynkowych (połysk, gładkość, grubość, przyczepność itp.) jest różna i zależy od składu chemicznego stali w szczególności od zawartości węgla (C), fosforu (P) i krzemu (Si). Zawartość węgla i krzemu w stali nie powinna przekraczać łącznie 0,5%. Dla stali zawierających węgiel w postaci martenzytu wzrost zawartości węgla w przedziale 0,01–2,08% mas. systematycznie zwiększa reaktywność stali względem ciekłego cynku, nie rozszerzając zakresu liniowego przebiegu reakcji. Zdarza się, że w stalach zawierających krzem reakcja żelazo-cynk przebiegnie szczególnie intensywnie i udział stopu żelazowo-cynkowego w powłoce będzie wyższy niż normalnie. W skrajnym przypadku powłoka cynkowa może składać się całkowicie ze stopu żelazowo-cynkowego. Zjawisko to (tzw. efekt Sandelina) obserwuje się zwłaszcza przy zawartości krzemu od

0,03% do 0,14%, jak również powyżej 0,25%. W tych przypadkach powłoka cynkowa jest najczęściej matowoszara, chropowata, nierównomierna, krucha – wrażliwa na odkształcenia i uszkodzenia mechaniczne. Wpływ zawartego w stali krzemu na jej rozpuszczalność w ciekłym cynku przedstawia rysunek 8 [21]. Stosowany w metalurgii stali krzem powoduje znaczny wzrost jej reaktywności z ciekłym cynkiem i jest szczególnie wysoki przy dwóch stężeniach tego pierwiastka wynoszących około 0,1% i około 0,4% mas.

Właściwości powłoki cynkowej powiązane ze składem chemicznym stali określa norma [22]. Dlatego mając na uwadze zawartość krzemu i węgla w stali łańcuchowej, możemy określić kryteria przydatności stali do cynkowania ogniowego:

$$C + Si < 0,5\% \quad (2)$$

$$0,1 < Si < 0,25\% \quad (3)$$

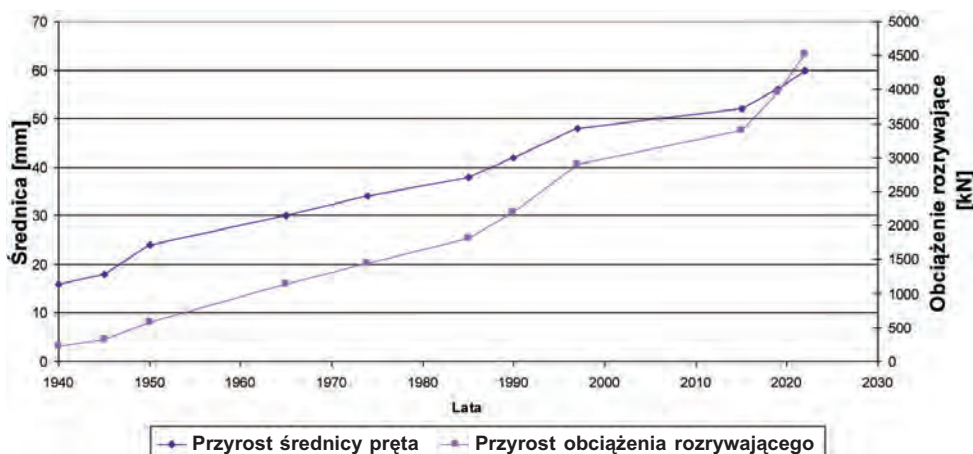


Rys. 8. Wpływ krzemu na grubość powłoki

3.3. Wpływ technologii wykonania ogniów na parametry wytrzymałościowe łańcuchów

Od wielu lat kierunkiem rozwoju w dziedzinie przenośników zgrzeblowych jest stosowanie łańcuchów wykonanych z grubszych prętów, lepszych materiałów i zastosowanej lepszej obróbki plastycznej. Doświadczenia z kopalń krajów zachodnioeuropejskich o rozwiniętym górnictwie węglowym wykazywały początkowo słuszność tego kierunku rozwojowego. Przykładowo [23] w 1983 roku we Francji wykazano, że prawidłowo wykonanym i dobranym ciągnem łańcu-

chowym 26 mm × 92 mm można w trudnych warunkach górniczo-geologicznych bezawaryjnie przetransportować 0,6–0,8 Mt węgla, zaś ciągnem łańcuchowym 34 mm × 126 mm aż 2,4 Mt urobku. Ten kierunek rozwojowy doprowadził do wyprodukowania przenośników z ciągnami o łańcuchach 60 mm × 189/136 mm, dla których należy się spodziewać jeszcze lepszych rezultatów ilościowych. Na wykresie (rys. 9) zestawiono zmiany w średnicy i wartości obciążenia zrywającego od 1940 roku. I tak od roku 1940 od średnicy pręta 16 mm doszliśmy do średnicy 60 mm i obciążenia zrywającego 4760 kN.



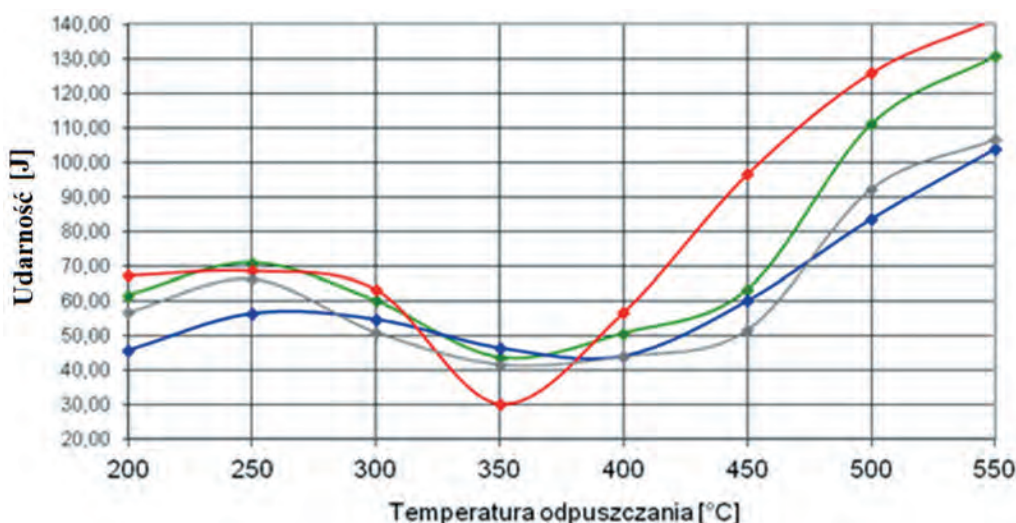
Rys. 9. Zmiany parametrów wytrzymałościowych i geometrycznych

3.3.1. Wpływ obróbki cieplnej na udarność

Wytrzymałość stali łańcuchowej, od której zależy klasa jakości łańcuchów górniczych, uzależniona jest od przeprowadzonej obróbki termicznej. Krokiem wielostopniowej obróbki decydującym o końcowych parametrach wytrzymałościowych jest odpuszczanie. W celu ustalenia zależności wielkości udarności od temperatury odpuszczania stali łańcuchowej przeprowadzono cykl badań porównawczych, w których porównano próbki

stali gatunku 1.6758 pochodzące od czterech dostawców: A, B, C i D. Na rysunku 10 naniesiono w formie wykresów wyniki wszystkich badań.

Na przykładzie dostawcy A jest najbardziej widoczne, że w zakresie temperatur około 350°C wyniki udarności osiągają lokalne minimum, co odpowiada temperaturom odpuszczania łańcuchów klasy D. Wysokie wartości udarności uzyskuje się przy temperaturach odpuszczania powyżej 450°C. W zakresie takich temperatur odpuszczane są łańcuchy klasy C.



Rys. 10. Wyniki badań udarności w zależności od temperatury odpuszczania próbek stali pochodzących od dostawców A, B, C i D

3.3.2. Wpływ procesu cynkowania na własności wytrzymałościowe

Badania doświadczalne opisane w [23] potwierdziły, że cynkowanie ogniowe obniża właściwości mechaniczne gatunków stali wysokowytrzymałych w wyniku dodatkowego odpuszczania struktury martenzytycznej. Kluczowymi zaletami stali wysokowytrzymałych są pla-

styczność i wytrzymałość na rozciąganie. Stale o dużej zawartości krzemu, chromu, molibdenu, manganu charakteryzują się dużą twardością połączoną z dużą wytrzymałością. Posiadają wysoką granicę plastyczności oraz wytrzymałość na rozciąganie. W przypadku tego rodzaju stali zmiana granicy plastyczności i wytrzymałości na rozciąganie wynikająca z cynkowania ogniowego będzie duża. W przypadku badań prowadzonych

w pracy [24] zanotowano spadek wytrzymałości na rozciąganie o 17%, a w przypadku wyników badań dla pracy [25] 14%. Wyniki opisane w opracowaniach badawczych potwierdzają, że stale wysokowytrzymałe nadają się do cynkowania ogniowego tylko wtedy, gdy stopień obniżenia właściwości wytrzymałościowych jest znany.

4. ANALIZA WIELKOŚCI I KONSTRUKCJI ŁAŃCUCHÓW GÓRNICZYCH STOSOWANYCH W ŚWIATOWYM PRZEMYSŁE WYDOBYWCZYM

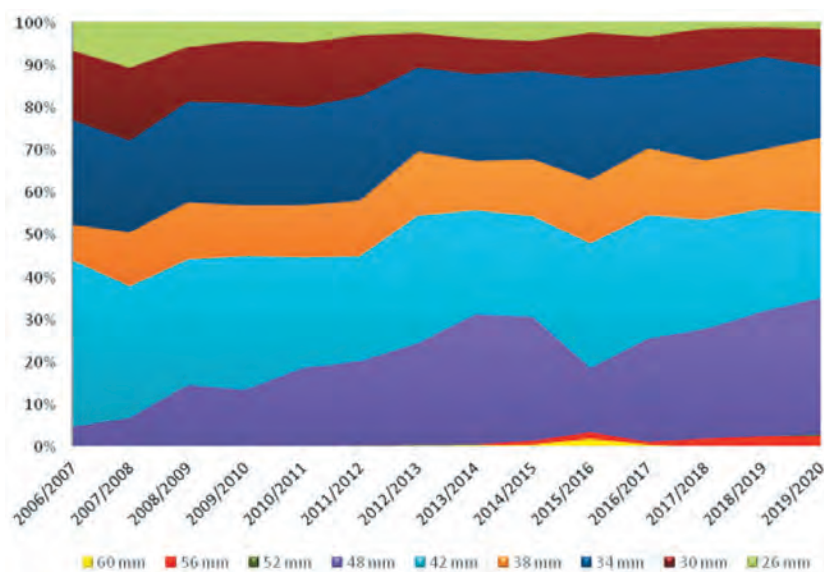
Generalny trend do stosowania coraz to większych średnic nominalnych łańcuchów górniczych potwierdza się na przykładzie ilości produkowanych przez jednego z wiodących producentów łańcuchów górniczych [26]. Ilości pokazane na rysunku 11 nie są reprezentatywne dla łącznej produkcji światowej, dają jednak wyobrażenie o tym, jaki w przybliżeniu jest udział procentowy poszczególnych rozmiarów. Analizując pojedyncze rynki górnicze, można zaobserwować okresy ilościowej dominacji poszczególnych rozmiarów. Na przykładzie rynku amerykańskiego można stwierdzić, że co mniej więcej 10 lat dochodzi do modernizacji parku maszynowego i przeskoku do kolejnego rozmiaru łańcuchów górniczych stosowanych w przenośnikach ścianowych. W latach 80. w USA najpopularniejsze były łańcuchy ogniowe 34 mm × 126 mm, które następnie wyparte zostały przez łańcuchy płaskie 38 mm × 126 mm. Po roku 2000 najczęściej

stosowane były łańcuchy płaskie 42 mm × 146 mm, natomiast po roku 2010 rynek został zdominowany przez łańcuchy o średnicy ogniów 48 mm. Aktualnie autorom znane są projekty modernizacji istniejących instalacji uwzględniające łańcuchy o średnicy nominalnej 52 mm.

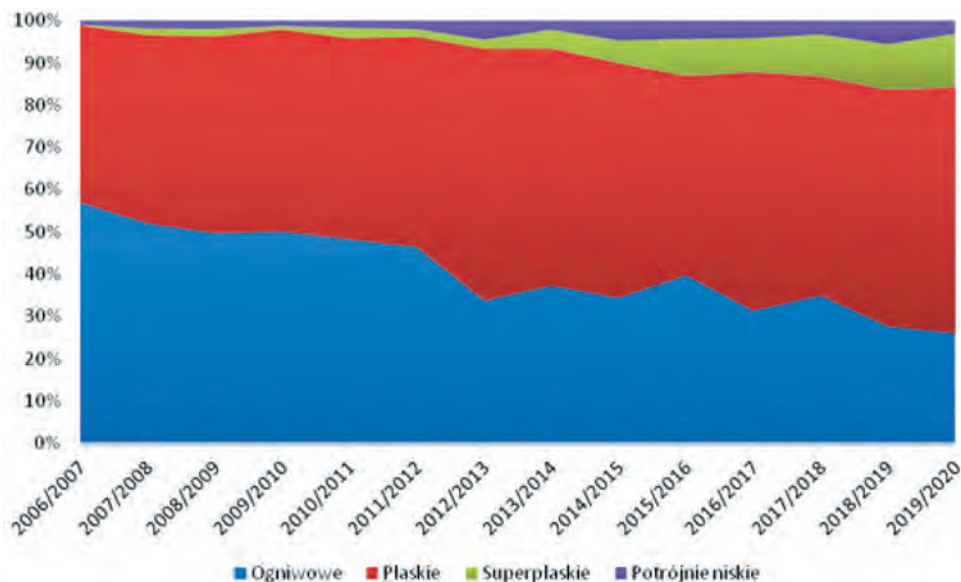
Intensyfikacja produkcji w przodkach ścianowych w połączeniu z coraz większymi rozmiarami łańcuchów przenośnikowych skutkuje zwiększeniem żywotności łańcuchów mierzonej w tonach odstawionego urobku i dochodzi do 10–12 milionów ton urobku brutto w przypadku łańcuchów o średnicy nominalnej 48 mm.

Żywotność łańcuchów górniczych z uwagi na okres eksploatacji ograniczona jest przede wszystkim warunkami eksploatacji, tzn. intensywnością wydobywania, ilością skały płonnej, warunkami górniczymi, a w szczególności ewentualnym występowaniem korozji i wynosi niezależnie od rozmiaru i typu łańcucha 12–24 miesięcy.

Jednocześnie można zaobserwować trend do stosowania coraz to niższych łańcuchów, co spowodowane jest dopasowaniem ich konstrukcji do ograniczonych gabarytów przenośników zgrzeblowych przy jednoczesnym wzroście zainstalowanych mocy silników elektrycznych. Widoczny na rysunku 12 stosunkowo niewielki udział łańcuchów potrójnie niskich wynika z wysokich kosztów ich produkcji oraz obostrzeń patentowych ograniczających możliwości ich rozpowszechnienia. Udział procentowy poszczególnych typów i rozmiarów łańcuchów górniczych na wyodrębnionych rynkach zależy od stopnia intensywności wydobywania, zaawansowania techniki górniczej oraz możliwości finansowych działających tam producentów węgla.



Rys. 11. Udział procentowy poszczególnych rozmiarów łańcuchów górniczych [27]



Rys. 12. Udział procentowy poszczególnych konstrukcji łańcuchów górniczych na przykładzie produkcji jednego z producentów łańcuchów górniczych [27]

5. WNIOSKI

Niniejszy artykuł jest podsumowaniem wyników badań laboratoryjnych oraz prowadzonej kwerendy literatury. Pierwsze łańcuchy ogniowe stosowane w maszynach górniczych miały średnicę 16 mm. Najmniejsze łańcuchy stosowane w przenośnikach górniczych to 14 mm × 50 mm, natomiast największe łańcuchy używane obecnie w przenośnikach górniczych mają średnicę nominalną 60 mm. Prowadzone są już prace rozwojowe nad łańcuchami kolejnych generacji o średnicach nominalnych 64 mm i 68 mm. Trend do powiększania średnicy łańcuchów utrzymał się przez ostatnich prawie 80 lat historii maszyn górniczych, choć już kilkakrotnie wydawało się, że osiągnięto granicę możliwości technicznych w ich produkcji. Wydawało się, że nie będzie potrzeby stosowania coraz to większych średnic z powodu instalowania w przenośnikach zgrzeblowych czy strugach węglowych coraz to większych mocy napędów celem zwiększenia ich wydajności. Przedstawiony materiał wskazuje, że nie możemy bezkrytycznie stosować dowolnego materiału oraz rodzaju obróbki cieplnej w produkcji łańcuchów. Istotny wpływ na rozwój produkcji łańcuchów miało opracowanie nowych gatunków stali wysokowytrzymałych. Poza zwiększaniem nośności łańcuchów górniczych w wyniku zwiększania średnicy ogniw prace konstruktorów i technologów koncentrowały się na następujących celach:

- zwiększaniu wytrzymałości łańcuchów w wyniku stosowania nowych gatunków stali,
- ujednorodnieniu parametrów mechanicznych w wyniku precyzyjnej obróbki termicznej,
- obniżaniu wysokości ogniw pionowych w łańcuchach kombinowanych umożliwiających redukcję wysokości przenośników zgrzeblowych,
- wydłużaniu żywotności łańcuchów przez projektowanie ogniw o kształtach umożliwiających wolniejsze wydłużanie podziałki łańcucha,
- uzyskaniu powtarzalności kształtu ogniw, a w szczególności ich podziałki.

Aktualnym trendem rozwojowym jest opracowanie łańcuchów wyposażonych w czujniki pomiaru obciążenia umożliwiające stałe jego monitorowanie, kontrolę wstępnego napięcia łańcucha oraz jego zabezpieczenie przed przeciążeniami w wyniku nadmiernego załadunku lub blokad przenośnika. Prace w tym kierunku są prowadzone przez kilka ośrodków badawczo-rozwojowych skupionych wokół producentów przenośników zgrzeblowych oraz producentów łańcuchów. Zintegrowanie czujników pomiaru siły w poruszającym się łańcuchu przenośnikowym jest wyzwaniem technicznym trudnym do realizacji z powodu barier technologicznych dotyczących zarówno miniaturyzacji systemu pomiarowego, jak i zasilania w energię elektryczną oraz możliwości transformacji danych pomiarowych.

Produkcja węgla kamiennego metodą ścianową w następnych dwóch dekadach będzie również stanowiła dużą część produkcji światowej tego surowca. Z uwagi na wzrost wydajności, potrzebę monitorowania produkcji – w celu zwiększenia bezpieczeństwa

eksploatacji – należy się liczyć z dalszym rozwojem konstrukcji i rozmiarów łańcuchów górniczych oraz w skali światowej z utrzymaniem dotychczasowego zapotrzebowania na ich produkcję.

Literatura

- [1] Agricola G.: *De Re Metallica Libri XII*. Bazylea 1556; *Zwölf Bücher vom Berg- und Hüttenwesen gehören...* Sechstes Buch. Schiffner C., Darmstaedter E. (übersetzt und bearb.). VDI-Verlag, Düsseldorf 1978.
- [2] Philipp G.B., Thiele U., Cooper J.R.: *Eine neue Flachkette mit präzisen Kettenrädern für Hochleistungsstreben*. Glückauf 1993, 9: 682–688.
- [3] Philipp G.B.: *Grenzen der Technik – Lebensdauer von Bauteilen – August Wöhlers Schaffen und seine Verdienste*. Bergbau 2008, 5: 224–229.
- [4] Paschedag U.: *Face conveyor systems*. W: Junker M., Lemke M., Heiderich R.-M., Langefeld O., Mozar A., Paschedag U., Philipp G., Witthaus H.: *Technical developments in coal winning*. Vulkan-Verlag GmbH, Essen 2018: 181–224.
- [5] Paschedag U.: *Entwicklungen in der Strebördertechnik in den letzten 50 Jahren*. Bergbau 2018, 4: 175–182.
- [6] Philipp G.B.: *Die Rundstahlkette als Element der Leistungsübertragung bei Förderern im Strebbau*. RWTH, Aachen 1999 [rozprawa doktorska].
- [7] Spies K.: *Leistungsübertragung mit Rundstahlketten*. Glückauf 1993, 6: 411–415.
- [8] Dreher H.: *Górnictwo nie jest sprawą jednego*. XI Międzynarodowa Konferencja Techniki Urabiania „TUR 2019”, Krynica-Zdrój, 17–20 września 2019 r. [artykuł konferencyjny].
- [9] Philipp G.B.: *Conveyor chains, plow chains and flight bars*. W: Junker M., Lemke M., Heiderich R.-M., Langefeld O., Mozar A., Paschedag U., Philipp G., Witthaus H.: *Technical developments in coal winning*. Vulkan-Verlag GmbH, Essen 2018: 225–247.
- [10] DIN 22252, März 1951. *Rundgliederketten*.
- [11] Forch K.: *Werkstoffkundliches Seminar*. Iserlohn, 17.02.2001.
- [12] DIN 22252, Dezember 1973. *Hochfeste Rundstahlketten für den Bergbau*.
- [13] Philipp G.B.: *Chain Matching – The key for high-extraction-rate longwalls*. Glückauf 1998, 2: 24–27.
- [14] Polska Norma PN-G-46701:1997. *Łańcuchy ogniwowe górnicze*.
- [15] Kandzia R.: *Kompendium wiedzy o ogniowych łańcuchach górniczych*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze 2018, 1(39): 69–76.
- [16] DIN 22252, Juli 2012. *Rundstahlketten für Stetigförderer und Gewinnungsanlagen im Bergbau*.
- [17] Kandzia R., Szot M.: *Fatigue Life Testing of the Round Link Mining Chains*. Management Systems in Production Engineering 2023, 31(1): 78–85.
- [18] DIN 17115, Juli 2021, *Stähle für geschweißte Rundstahlketten und Ketten-Einzelteile – Technische Lieferbedingungen*.
- [19] Polska Norma PN-H-84023-08:1989. *Stal określonego zastosowania – Stal na łańcuchy ogniwowe – Gatunki*.
- [20] American Galvanizers Association: *Hot-Dip Galvanizing – Abrasion Resistance*. <https://galvanizeit.org/hot-dip-galvanizing/why-specify-galvanizing/durability> [4.06.2021].
- [21] Głuszko M.: *Zagadnienia ochrony antykorozyjnej konstrukcji stalowych oraz urządzeń elektroenergetycznych eksploatowanych w warunkach atmosferycznych*. Prace Instytutu Elektrotechniki, z. 235, Instytut Elektrotechniki, Warszawa 2008.
- [22] Polska Norma PN-EN ISO 14713-2:2020-07. *Powłoki cynkowe – Wytyczne i zalecenia dotyczące ochrony przed korozją konstrukcji z żeliwa i stali – Część 2: Cynkowanie zanurzeniowe*.
- [23] Schriever K.: *Neue Antriebsysteme für den Bergbau unter Tage*. Glückauf 1979, 10.
- [24] Šmak M., Kubiček J., Kala J., Podaný K., Vaněrek J.: *The influence of Hot-Dip Galvanizing on the Mechanical Properties of High-Strength Steels*. Materials 2021, 14(18): 5219.
- [25] Gunalan S., Mahendran M.: *Experimental investigation of post-fire mechanical properties of cold-formed steels*. Thin-Walled Structures 2014, 84: 241–254.
- [26] Azhari F., Heidarpour A., Zhao X.L., Hutchinson C.R.: *Mechanical properties of ultra-high strength (Grade 1200) steel tubes under cooling phase of a fire: An experimental investigation*. Construction and Building Materials 2015, 93: 841–850.
- [27] Niepublikowane wyniki wewnętrznej analizy statystycznej firmy THIELE, 2021.

dr inż. RICHARD KANDZIA
r.kandzia@thiele.de
THIELE GmbH & Co.KG
Werkstr. 3, 58640 Iserlohn, Niemcy

dr inż. MARIUSZ SZOT
mszot@gig.eu
GIG Central Mining Institute
pl. Gwarków 1, 40-166 Katowice

RADOSŁAW REJMAN
KAROLINA GREŃ
RAFAŁ ŻELAZKO
WOJCIECH LIWACZ

The Kalman autonomous planetary rover

The project presented in the article is proof of the usefulness of student organizations and its effectiveness in the popularization of advanced technologies as well as future solutions in industry. A student-developed planetary rover, using a Kalman filter and other algorithms responsible for dynamic terrain mapping and pathfinding, is capable of non-collision movement in the most challenging environments. Moreover, the rover uses a 6DOF arm developed by students to undertake manual actions, such as soil sampling or maintenance tasks with ease. The invention is provided with a drill to be capable of extracting a sample from a depth of 30 cm, which is expected to greatly enhance the research of the geological history of the surveyed region. The robot has been tested numerous times at planetary rover competitions with success, proving the potential of such platforms as one of starting points in space exploration and opportunities in industrial use, especially in hard-to-reach mining areas. The featured project represents an inspiration for future young engineers and scientists by opening perspectives for implementing similar technologies for more efficient and safer operations in industry.

Key words: rover, robot, autonomy, mechanization, mining

1. INTELLIGENT PROCESSES

In the context of robotics, an intelligent process refers to the capabilities of a robot or a robotic system in terms of autonomous decision-making, information processing, learning from the experience and adapting to changing conditions. Intelligent processes in robotics cover a variety of advanced features, which enables robots to fulfil complex tasks, interact with the environment and humans, as well as improving their abilities. Below are a few examples of intelligent processes in a context of robotics:

- Movement planning: Robots use movement planning algorithms to plan optimal routes and avoid collisions when moving in an environment.
- Computer vision: Robotic systems use machine vision techniques, such as image recognition and scene analysis, in order to identify objects, humans as well as read road signs.

- Adaptive control: Robots can adjust own actions to changing conditions, e.g. respond to unexpected obstacles or new tasks.
- Machine learning: Robots learn from experience, gathering data from their surroundings and using it to perfect their own abilities to make more intelligent decisions.
- Human-robot interaction: Robots utilize speech and emotion recognition technology to better communicate and cooperate with humans.
- Autonomy: Autonomous robots are capable of independent actions without constant human supervision, making decisions in real-time based on data gathered from sensors.

The aim of intelligent processes in robotics is to increase the efficiency, safety, and utility of robots, by enabling more advanced tasks for them which would be impossible to achieve by standard, programmed machines. However, at the same time, they

need advanced technology, algorithms, and proper safety guarantees to prevent any potential unpredictable behaviour of the robots.

1.1. Macrocams and visual analysis

There are a variety of cameras on board the rover, including ones that are dedicated to autonomous driving, analogue and digital cameras which are used at the time of remote manual control over the rover driving, as well as cameras that allow close-up images to be obtained [1]. The observation of a rock under magnification is sometimes a key element to its identification. The ability to specify rock characteristics has significance in estimating regional mining potential. For this purpose, on board the Arducam IMX298 MIPI 16MP macrocam is used, which enables the observation of rocks at substantial zoom levels and saving results in the form of pictures. The macrocam works the best at a distance of 6–10 cm, giving significant magnification while preserving sufficient material quality.

MS Learns platform offers a free course using data from NASA to learn how to develop an artificial intelligence network to recognize rock samples [2]. The course allows participants to acquire geological data analysis skills, imaging processing, and machine learning techniques, which can find a use in supporting op-

erations conducted on Earth and in space. It brought new opportunities for the Kalman rover project, since such a network would allow the real-time detection of objects of higher interest. This would allow the rover to notify operators as to whether it had found anything interesting in surveyed location, as well as record timestamps in the footage itself for later human analysis of the recording fragments. This would be especially useful during various competitions when it is necessary to analyse the collected research material in a limited time. That is why the Science team, independently of the Software team, took the course for the acquisition of new skills and the implementation of its own neural network.

1.2. Trajectory and inversed kinematics

The automatization of sample collection is a critical element in branches such as geological surveys or space exploration. One advanced approach in that area is the use of programmed trajectories. This depends on a pre-defined movement path for the device collecting samples, for example, a planetary rover manipulator. Thanks to programmed trajectories, precise movement control, and sample collection, location determination is possible, which minimizes risks of damaging or losing samples.

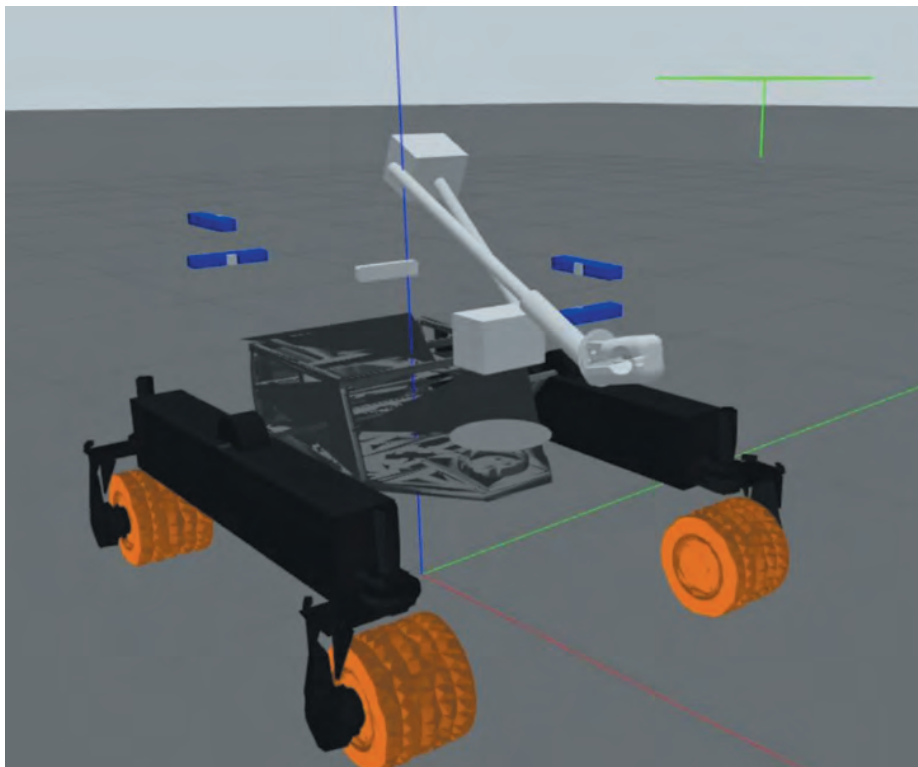


Fig 1. Model of a rover in the app of ground station, visualizing status of individual elements in the space

Inversed kinematics is an indispensable element of programmed trajectories implementation. It is a mathematical mechanism allowing the determination of an appropriate location and the orientation of various elements of the manipulator with the aim of reaching final position. In the case of sample collection, inversed kinematics provides a determination of the adequate gripper or tool settings to aptly place it where sample will be collected.

By using programmed trajectories and inversed kinematics, the automatization of sample collection is becoming more efficient, precise, and effective. It not only accelerates sample collection process, but also allows for safe and accurate acquisition of information, which are essential for scientific research and space exploration, in a way which is more effective and advanced technologically. A screenshot from the app to control the robot remotely, on which simplified model of the rover undertaking operation with trajectories of the arm, is visible on Figure 1.

1.3. Distributed intelligence

Distributed intelligence is often applied in the context of complex systems such as communities of organisms, groups of people, and also in the field of technology, in robotics and artificial intelligence. In such systems, intelligence arises from the interaction and collaboration of multiple elements that together create an organized and intelligent system. In the field of technology, distributed intelligence can refer to the cooperation of multiple robots to accomplish complex tasks. Each robot may have its own limited capabilities, but as a group, they can effectively complete a task that would be unattainable individually. The Kalman planetary rover is a robot with advanced construction that allows it to navigate challenging terrain. The rover can move between different waypoints, including geological objects such as rocks or obstacles like poles and stakes. During the traverse, data is collected in the form of GPS coordinates. If Kalman were actually being used as a planetary rover, there would be an opportunity to gather data obtained from the rover's onboard sensors along with data from orbiters. Combining data from orbiters and Kalman's onboard data using artificial intelligence algorithms would enable the better processing of the information, leading to more detailed geological interpretations of the region, especially concerning the precise mapping of its surface. The Kalman rover uti-

lizes tools such as GPS, encoders, and depth cameras. During actual missions, it would be valuable to expand this toolset by adding elements that would make signal triangulation and detection of the sun's position possible. Sun position monitoring could serve as a safety feature for the rover. For instance, if there ever were any communication issues, the rover could use the sun's position to determine its current location and relay that information to the ground station. This would aid in locating the rover in the case of any malfunction or loss of communication. If the unit would leverage photovoltaic panels for charging, sun position detection could allow for optimal positioning of the panels to efficiently capture solar energy and extend the operational capabilities of the vehicle. Additionally, if the rover has to travel at a significant distance from the ground station or other communication endpoint, radio signal triangulation would help to precisely determine the direction from which the transmission originates. This would allow for better connectivity and improve communication quality.

2. EXCAVATING ABILITIES

2.1. Gripper

The main concept in the Kalman planetary rover project is application of modularity. For the purpose of the realization of various tasks, the rover is equipped with several types of jaws, which are mounted on a manipulator and the choice of them is adjusted to the specific tasks the rover is expected to perform. For precise operations, the special gripper is used, featuring shaped tabs which prove to be useful for carrying objects or performing easy maintenance tasks, such as unscrewing or screwing valves. Models of overlays in use with the ready gripper module are presented in Figure 2 [3].

The set of jaws used for excavating purposes has also been designed in a unique way. The design of those jaws makes it possible to obtain soil samples and after that, thanks to the tight connection of the upper and bottom jaws, the transfer of the sample to a mobile lab or special container intended for storage is feasible. Such flexibility and functionality of the modular jaws greatly enhances the universality of the Kalman rover, enabling the successful completion of various missions on a planet surface.

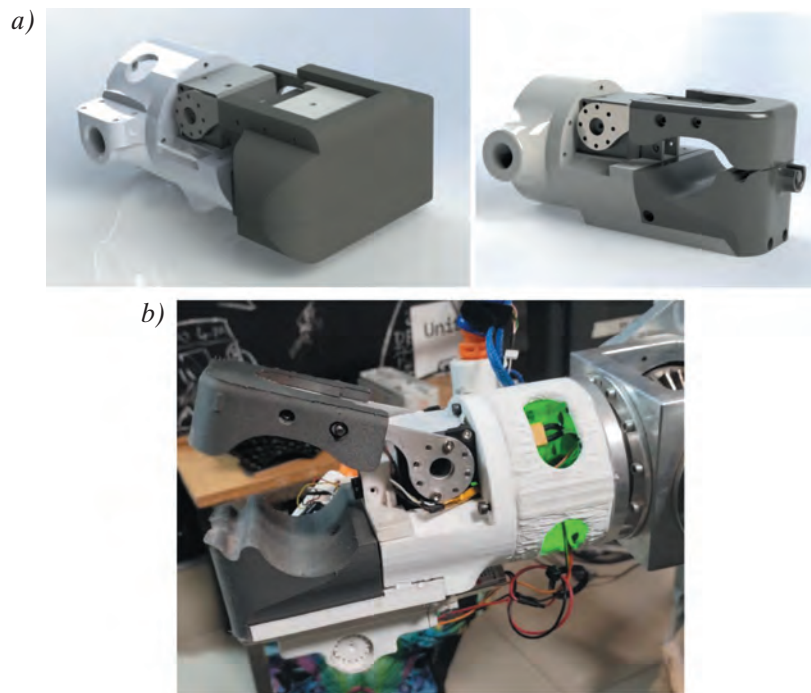


Fig. 2. Models (a) and assembled gripper (b)

2.2. Arm

Since it implemented a new mechanical 6DOF arm, the Kalman planetary rover gained the ability to work in two modes: autonomously and via remote control. The new arm offers significantly higher precision in task performance thanks to 6 degrees of freedom of movement. Equipped with cameras, it enables the rover to undertake the efficient observation of ob-

jects in its vicinity. A special advantage of the 6DOF arm is its large scale of operations and reach, which makes observation and sampling from less accessible places easier for the rover. The robot arm is becoming an invaluable tool to support repair operations, thereby increasing the functional value and the efficiency of the operations of the Kalman rover [3]. In Figure 3 a model of the arm currently in use is presented.



Fig. 3. Arm 6DOF currently in use

2.3. Drill

The drive system used in this project was inspired and adjusted directly from solutions available on the market, and its design includes several key components. The core of the drive is a DC brush motor with 18 V voltage. Besides that, planetary gear combined with a safety (ball) coupling is installed and the combination of those two elements ensures reliable functioning of the system. A mechanism of rack and pinion was used to achieve vertical movement. Such mechanism is propelled by the DC drive, which was mounted with the planetary gear and ensures smooth and efficient functioning. Additionally, special rails have been used to stabilize mechanism movement, which allows smooth and controlled lowering. The whole drive system was carefully adapted and optimized to not only provide high performance, but also the safety and stability of operations. Due to the functioning of the components from previously used devices, as well as precise mechanical solutions, this

drive unit is not only an efficient tool but also an excellent example of the adaptation of existing technology to new uses.

The current drill model has been developed to meet the requirements of new European Rover Challenge rules, during which the rover should have the capability of obtaining a sample from a depth of more than 30 cm. The Mars regolith analogue expected during the competition makes it vital that subsequent prototypes will not only be tested for the ability to drill, but also for durability of the materials and elements used, in order to securely store the retrieved core at the end of the operation. The mechanism of the drill as well as core auger is shown in Figure 4.

The implementation of 3D printing allows fast prototyping of further iterations of an auger for applications of new forms improving the functioning. When a specific model meets expectations in terms of overall performance, the manufacture of components from more durable materials, such as steel, follows.

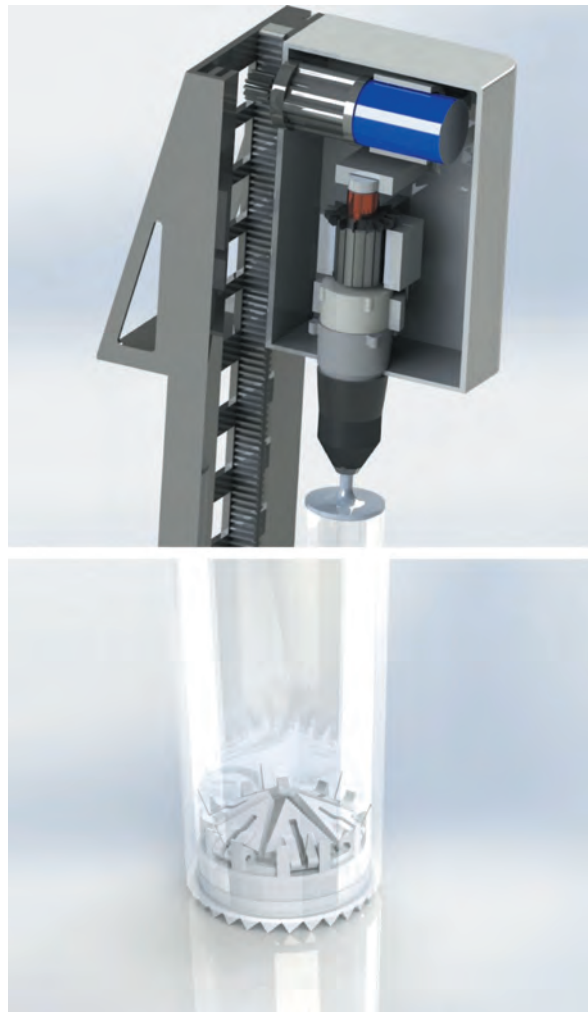


Fig. 4. Models of current versions of the mechanisms of the drill and core tube

3. AUTONOMY

3.1. Robot localization

The Kalman rover was named to honour Rudolf Kalman, inventor of the Kalman filter, an algorithm which has been in use in robotics extensively since the 1960's. The Kalman filter helps with robot's sensor readings denoising and predicting its status at any moment in time. The Kalman rover utilizes that algorithm to multiply the efficiency of odometry, which is a subsystem measuring changes in repositioning and determining its position in space. Kalman odometry is based on a GPS module and IMU containing gyroscope and accelerometer. These instrument readings are compared with the results of visual odometry, which measures the robot's movement based on imagery from cameras placed around its hull. All of the gathered data is combined, which, with the help of the Kalman filter, gives highly accurate information about the rover's position with millimetre-level accuracy.

3.2. Terrain mapping

Martian landscapes are full of boulders, steep cliffs, and craters. Such difficult environments pose a challenge for planetary rovers like Kalman. Rovers

would not be able to traverse autonomously without the use of any cameras and environmental sensors. Therefore, Kalman is equipped with a set of electronic "eyes" in the form of Intel RealSense depth cameras that operate simultaneously as standard cameras and also in a manner akin to a LIDAR scanner. RealSense cameras use stereoscopic vision, which means that they feature two infrared sensors located on both ends of them. Through them, cameras extract the depth of the image viewed in a way that is similar to human vision [4].

Information about depth sent by the cameras are represented as a point cloud, where every "pixel" in the image frame corresponds to one vertex in the cloud. Unfortunately, such a data format contains a lot of redundant information and does not allow us to determine with ease in which directions Kalman is able to drive. For this reason, autonomic Kalman algorithms convert the data stream from the cameras to extract only those features our rover is concerned with from the detailed point cloud, namely whether or not an obstacle is present in a particular location. Kalman, along with the course of the traverse, repeats the point cloud analysis multiple times and saves inaccessible areas in a so-called cost-map, a two-dimensional matrix that stores the structure of the surroundings visible from an aerial perspective around the rover. A visualized point cloud is included in Figure 5.

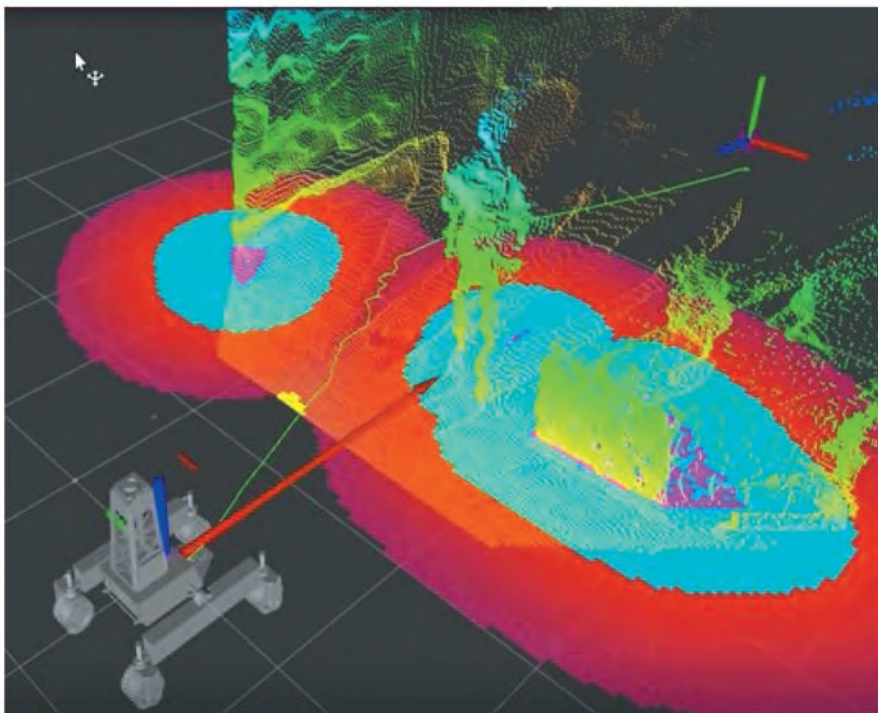


Fig. 5. Point cloud recorded by the rover during trials

3.3. Determining and tracking the pathway

Kalman uses cost-map via an A-star (A*) algorithm to plan non-collision pathways of movements at the time of the travel to assigned coordinates. Finally,

another autonomy module, the so-called “path follower”, changes the planned traverse and information about the position of the robot into the commands for his wheels. The concept is presented on Figure 6.

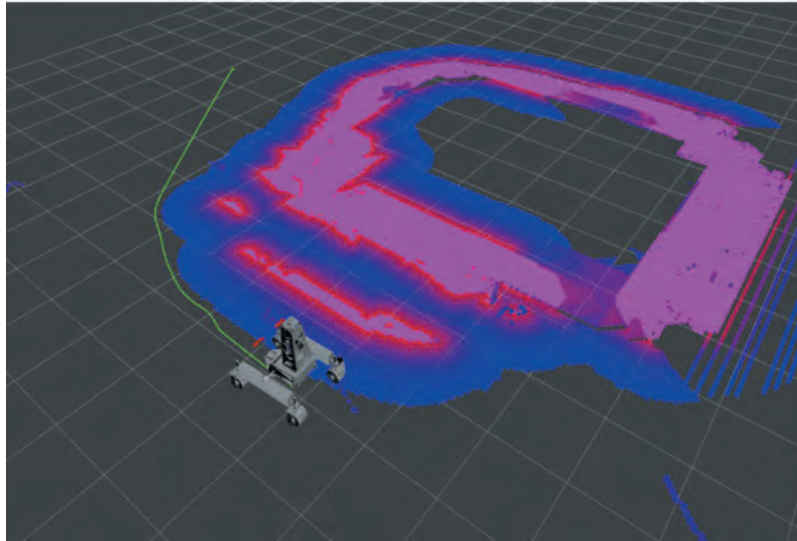


Fig. 6. Remembered obstacle locations in a coordinate system and designated path

3.4. Object detection

Kalman is able to detect all kinds of objects used during the competition as points of interests for the rover. Such functionality is implemented with AI (Artificial Intelligence) used in combination with conventional

methods of computer vision. For instance, the black arrows used in the competition in India are identified by simple edge detection and contrast adjustments of camera images, while cones, which are more difficult to detect, are traced by a neural network trained especially for this purpose. Its imaging is shown in Figure 7.

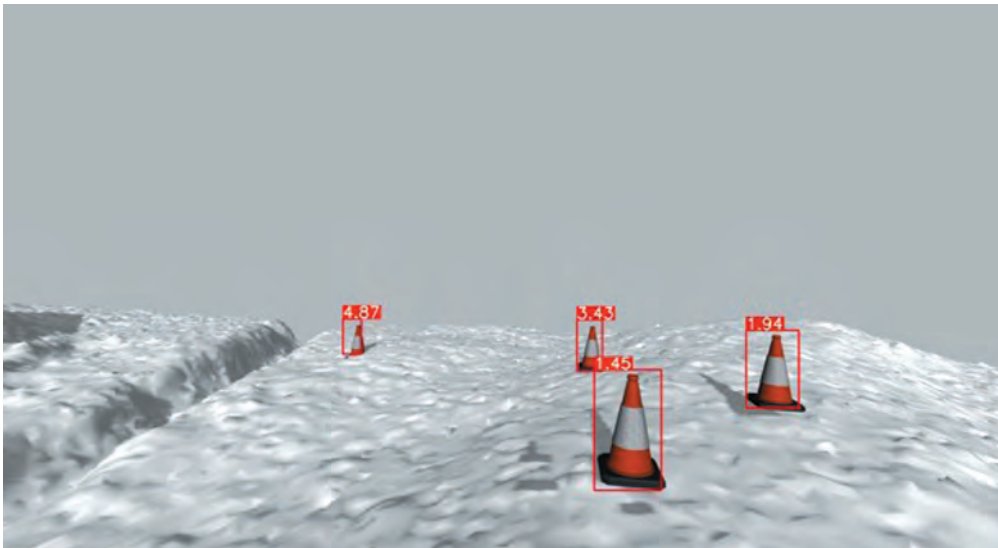


Fig. 7. Cones detected by the rover

3.5. Supervisor: Kalman's brain

Despite the fact that the Kalman rover can easily move on a planet surface and detect objects it finds

interesting, this alone is not enough to perform a successful autonomous exploratory mission. Kalman also has a so-called “supervisor” that serves as the brain of the robot during a mission. This supervisor controls

all of the activities which the robot is expected to perform during the traverse and plots next target points for the rover. Before the start of every contest, the rules of the autonomous competition are published and, based on this instruction, the supervisor is designed by us to maximize the capabilities of Kalman. In summary, Kalman's autonomous driving system combines sophisticated algorithms, including Kalman filter, visual odometry, pathway planning, object detection and supervision module. A complex structure like this enables autonomous navigation, terrain mapping, object detection, and performing complex tasks in difficult Martian environments. The combined functionality of those subsystems ensures the success of Kalman's autonomous exploration missions.

4. CONCLUSION

Kalman is a robot which can perform tasks autonomously and its mechanical design makes it capable of handling demanding terrain well. Such a planetary rover could participate in space voyages as a companion during space walks as it is able to carry cargo and tools, and is able to provide aid in emergency situations. It can also take part in exploration and mining missions, which can be helpful during the field reconnaissance that may be crucial while expanding territory for colony development. Kalman, via modules such as the gripper, mobile research laboratory, or core

drill, can provide assistance in the assessment of resources on a designated area. Kalman has the capability to detect places of interest and record their location in addition to its ability to make contact with the base. Part of the tasks that would accompany the colonization of an alien planet could be performed by Kalman.

References

- [1] Olszewski M., Bednorz S., Łagan M.: *Łazik Kalman – Elektronika, Software oraz Science*. 59. Hutnicza Konferencja Studenckich Kół Naukowych AGH, Kraków 2022 [unpublished].
- [2] *Classify space rocks by using Python and artificial intelligence*. <https://learn.microsoft.com/en-us/training/paths/classify-space-rocks-artificial-intelligence-nasa/> [30.07.2023].
- [3] Gliwiński Ł., Mika A., Gibiec M.: *Kalman – łazik planetarny, który ewoluuje dzięki mechanicznym innowacjom*. 60. Hutnicza Konferencja Studenckich Kół Naukowych AGH, Kraków 2023.
- [4] Bednorz S., Urbanik I.: *Autonomiczna nawigacja łazika Planetarnego Kalman*. II Studencka Konferencja Kosmiczna, Wrocław 2022 [unpublished].

RADOSŁAW REJMAN, Eng.
rrejman@student.agh.edu.pl

KAROLINA GREŃ, Eng.
kgren@student.agh.edu.pl

RAFAŁ ŻELAZKO
rayferric@student.agh.edu.pl

WOJCIECH LIWACZ
wliwacz@student.agh.edu.pl

AGH University of Krakow
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland

RADOŚLAW REJMAN
KAROLINA GREŃ
RAFAŁ ŻELAZKO
WOJCIECH LIWACZ

Autonomiczny łazik planetarny Kalman

W artykule zaprezentowano projekt, który stanowi dowód na przydatność organizacji studenckich oraz skuteczność popularyzacji zaawansowanych technologii i rozwiązań w przemysłowej przyszłości. Opracowany przez studentów autonomiczny łazik planetarny, wykorzystując filtr Kalmana oraz pozostałe algorytmy odpowiedzialne między innymi za dynamiczne mapowanie terenu oraz wyznaczanie ścieżek, jest w stanie bezkolizyjnie poruszać się nawet w najbardziej wymagających środowiskach. Łazik wykorzystuje również skonstruowane przez studentów ramię 6DOF do swobodnego podejmowania zadań manualnych, takich jak pobieranie próbek gleby czy zadania naprawcze. Jest on także wyposażony w wiertło, które umożliwi pobranie próbki gleby z głębokości co najmniej 30 cm, co mocno wesprze badania historii geologicznej regionu. Robot został wielokrotnie przetestowany z sukcesem na zawodach łazików planetarnych, co potwierdza potencjał takich platform w eksploracji kosmicznej i możliwości zastosowania w przemyśle, szczególnie w trudno dostępnych obszarach górniczych. Prezentowany projekt stanowi inspirację dla przyszłych młodych inżynierów i naukowców, otwierając perspektywy na wykorzystanie podobnych technologii w efektywniejszym i bezpieczniejszym funkcjonowaniu przemysłu.

Słowa kluczowe: łazik, robot, autonomia, mechanizacja

1. INTELIGENTNE PROCESY

W kontekście robotyki inteligentny proces odnosi się do zdolności robota lub systemu robotycznego do podejmowania autonomicznych decyzji, przetwarzania informacji, uczenia się z doświadczenia i adaptowania się do zmieniających się warunków. Inteligentne procesy w robotyce obejmują szereg zaawansowanych funkcji, które pozwalają robotom wykonywać skomplikowane zadania, interakcję z otoczeniem i ludźmi oraz samodzielne doskonalenie swoich umiejętności. Oto kilka przykładów inteligentnych procesów w kontekście robotyki:

- Planowanie ruchu: roboty wykorzystują algorytmy planowania ruchu, aby zaplanować optymalne trasy i unikać kolizji, gdy przemieszczają się po otoczeniu.
- Widzenie komputerowe: systemy robotyczne wykorzystują techniki widzenia maszynowego, takie jak rozpoznawanie obrazów i analiza sceny, aby identyfikować obiekty, ludzi czy odczytywać znaki drogowe.
- Sterowanie adaptacyjne: roboty mogą dostosowywać swoje działania do zmieniających się warunków,

np. reagować na niespodziewane przeszkody lub nowe zadania.

- Uczenie maszynowe: roboty uczą się z doświadczenia, zbierając dane ze swojego otoczenia i wykorzystując je do doskonalenia swoich umiejętności oraz podejmowania bardziej inteligentnych decyzji.
- Interakcja człowiek–robot: roboty wykorzystują technologie rozpoznawania mowy i emocji, aby lepiej komunikować się i współpracować z ludźmi.
- Autonomiczność: roboty autonomiczne są zdolne do samodzielnego działania bez stałej kontroli człowieka, podejmując decyzje w czasie rzeczywistym na podstawie danych z sensorów.

Inteligentne procesy w robotyce mają na celu zwiększenie efektywności, bezpieczeństwa i użyteczności robotów, umożliwiając im bardziej skomplikowane zadania, których nie byłyby w stanie wykonać zwykłe, programowane maszyny. Jednocześnie jednak wymagają one zaawansowanych technologii, algorytmów i odpowiedniego zapewnienia bezpieczeństwa, aby zapobiec ewentualnym nieprzewidzianym zachowaniom robotów.

1.1. Makrokamera i analiza wizyjna

Na pokładzie łazika znajduje się wiele różnych kamer, między innymi służących do jazdy autonomicznej, są też kamery analogowe oraz cyfrowe, które wykorzystywane są podczas poruszania się, kiedy łazik sterowany jest manualnie, czy też kamery, które pozwalają uzyskać obraz w powiększeniu [1]. Obserwacja obiektów skalnych w powiększeniu jest niekiedy kluczowym elementem podczas ich identyfikacji, charakterystyka skał ma bowiem znaczenie podczas szacowania możliwości wydobywczych w regionie. W tym celu na pokładzie łazika marsjańskiego wykorzystywana jest makrokamera Arducam IMX298 MIPI 16MP, która umożliwia obserwowanie skał w znacznym powiększeniu oraz zapisywanie wyników obserwacji w formie zdjęć. Makrokamera działa najlepiej w odległości 6–10 cm, dając znaczne powiększenie przy zachowaniu odpowiedniej jakości materiału.

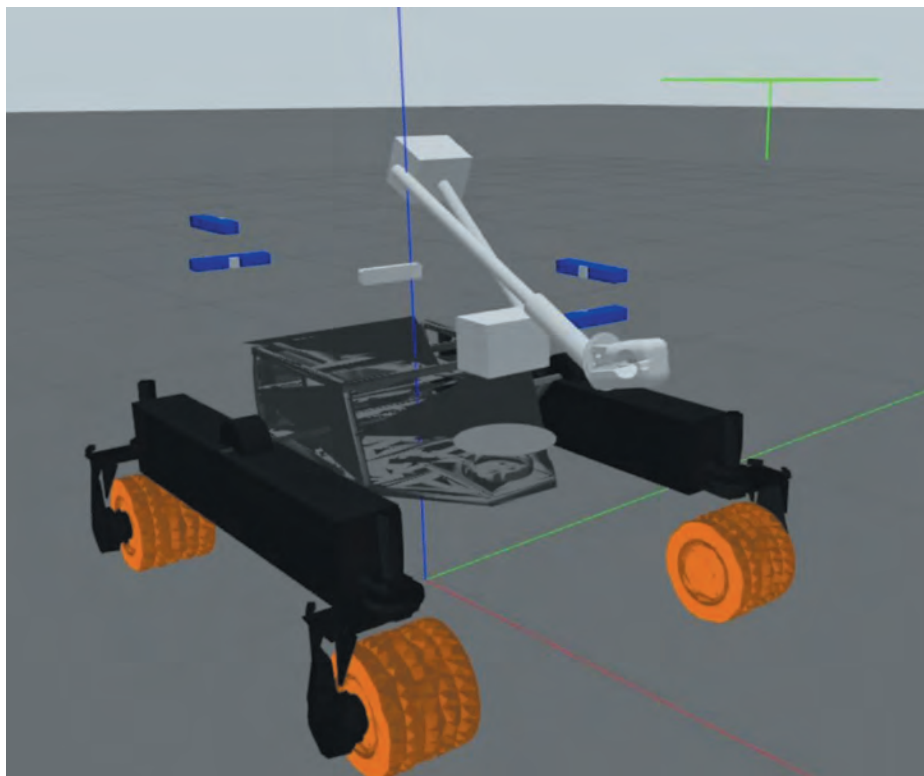
Platforma MS Learn oferuje darmowy kurs, który wykorzystuje dane z NASA do nauki tworzenia modelu sieci sztucznej inteligencji do rozpoznawania skał [2]. Kurs pozwala na zdobycie umiejętności analizy danych geologicznych, przetwarzania obrazów i technik uczenia maszynowego, co może znaleźć zastosowanie we wspieraniu działań prowadzonych na ziemi i w kosmosie. To otwiera nowe możliwości dla projektu łazika Kalmana, ponieważ taka sieć pozwoli-

łaby na wychwytywanie w czasie rzeczywistym obiektów większego zainteresowania. Dzięki temu łazik mógłby informować, że w danym terenie znalazł coś ciekawego oraz sam zapisywać znaczniki czasowe w nagrywanym materiale wideo do późniejszej analizy fragmentów przez człowieka. Byłoby to przydatne zwłaszcza w trakcie różnych zawodów, kiedy trzeba w krótkim czasie dokonać analizy zebranego materiału badawczego. Dlatego w zespole Science, niezależnie od zespołu Software, rozpoczęto także kurs dla pozyskania nowych umiejętności i zaimplementowania własnej sieci neuronowej.

1.2. Trajektorie i kinematyka odwrotna

Automatyzacja pobierania próbek jest kluczowym elementem w dziedzinach takich jak badania geologiczne czy eksploracja kosmiczna. Jednym z zaawansowanych podejść w tym zakresie jest wykorzystanie zaprogramowanych trajektorii. Polega to na wcześniejszym zdefiniowaniu ścieżki ruchu dla urządzenia biorącego próbki, np. dla manipulatora łazika planetarnego. Dzięki zaprogramowanym trajektoriom możliwe jest precyzyjne sterowanie ruchem i dokładne określenie położenia punktów pobierania próbek, co minimalizuje ryzyko ich uszkodzenia lub utraty.

Kinematyka odwrotna jest nieodzownym elementem w implementacji zaprogramowanych trajektorii.



Rys. 1. Model łazika w aplikacji stacji naziemnej, obrazujący stan poszczególnych elementów w przestrzeni

Stanowi ona matematyczny mechanizm, który umożliwia wyznaczenie odpowiednich położeń i orientacji dla różnych elementów manipulatora w celu osiągnięcia określonej pozycji docelowej. W przypadku pobierania próbek kinematyka odwrotna umożliwia wyznaczenie odpowiednich ustawień dla chwytaka czy narzędzia, aby trafnie umieścić go w miejscu, w którym ma nastąpić pobranie próbek.

Dzięki zastosowaniu zaprogramowanych trajektorii i kinematyki odwrotnej automatyzacja pobierania próbek staje się bardziej skuteczna, precyzyjna i efektywna. To nie tylko przyspiesza proces pobierania próbek, ale także pozwala na bezpieczne i dokładne zdobywanie informacji, które są niezbędne do prowadzenia badań naukowych oraz eksploracji kosmicznej w sposób bardziej efektywny i zaawansowany technologicznie.

Na rysunku 1 przedstawiono zrzut ekranu z aplikacji do sterowania robotem, na którym widać uproszczony model łazika podczas operacji z trajektoriami ramienia.

1.3. Inteligencja rozproszona

Inteligencja rozproszona jest często stosowana w kontekście systemów złożonych, takich jak społeczności organizmów, grupy ludzi, a także w dziedzinie technologii, np. w robotyce czy sztucznej inteligencji. W takich systemach inteligencja wynika z interakcji i współdziałania wielu elementów, które razem tworzą zorganizowany i inteligentny układ.

W dziedzinie technologii inteligencja rozproszona może odnosić się do współpracy wielu robotów w celu wykonania skomplikowanych zadań. Każdy robot może mieć ograniczone zdolności, ale jako grupa są w stanie skutecznie wykonać zadanie, które indywidualnie byłoby nieosiągalne.

Łazik planetarny Kalman to robot o zaawansowanej konstrukcji, dzięki której jest w stanie poruszać się w trudnym terenie. Łazik potrafi poruszać się pomiędzy różnymi punktami, to jest obiektami geologicznymi (np. skałami) czy też przeszkodami takimi jak tyczki czy pachołki. Podczas trawersu gromadzone są dane w postaci współrzędnych GPS. W momencie, w którym Kalman byłby wykorzystywany faktycznie jako łazik planetarny, istniałaby wówczas możliwość gromadzenia danych uzyskanych z pokładu łazika wraz z danymi pochodzącymi z orbiterów. Połączenie danych z orbiterów oraz pokładu Kalmana wraz z algorytmami sztucznej inteligencji dałoby możliwość lepszego przetwarzania uzyskanych informacji, co wpłynęłoby na uzyskanie bardziej szczegółowych danych interpretacji geologicznej danego regionu, zwłaszcza gdy chodzi o dokładne mapowanie powierzchni terenu.

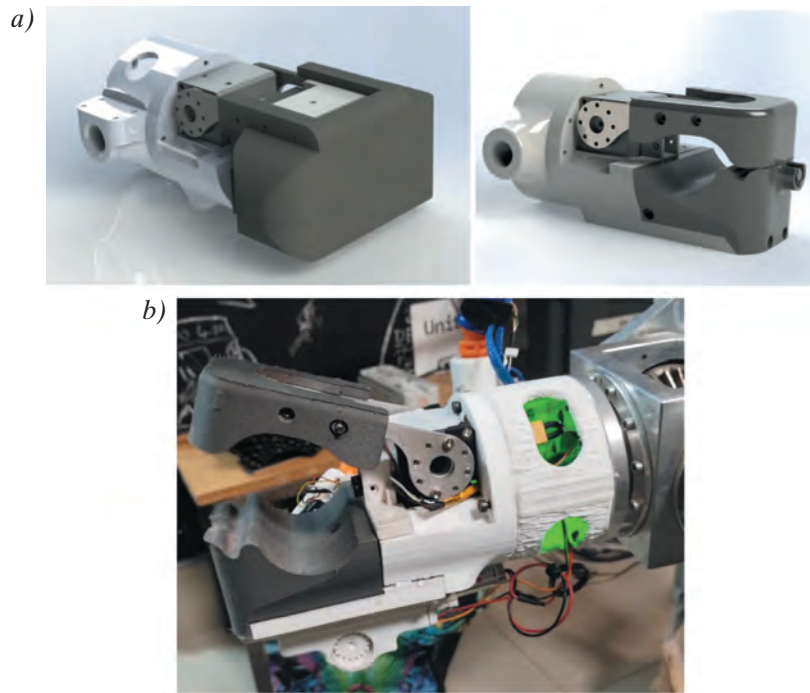
W konstrukcji Kalmana wykorzystano narzędzia takie jak GPS, enkodery oraz kamery głębi. Podczas faktycznych misji warto byłoby rozszerzyć zestaw narzędzi, dodając elementy, które pozwolą na detekcję pozycji słońca czy triangulację dla lepszego pozycjonowania. Detekcja pozycji słońca może być używana jako funkcja bezpieczeństwa dla łazika. Na przykład, jeśli wystąpią problemy z komunikacją, łazik może wykorzystać pozycję słońca do określenia swojej lokalizacji i przekazania tych danych do bazy naziemnej. To może pomóc w znalezieniu łazika w przypadku awarii lub utraty połączenia. Gdy jednostka posiada panele fotowoltaiczne do ładowania, detekcja pozycji słońca umożliwia wtedy optymalne ich rozłożenie w celu wydajniejszego poboru energii jego promieniowania i przedłużenia zdolności operacyjnych. Natomiast w przypadku, gdy łazik znajduje się w dużej odległości od stacji naziemnej lub innych punktów komunikacyjnych, triangulacja sygnału może pomóc w precyzyjnym określeniu kierunku, z którego przychodzą sygnały komunikacyjne. Dzięki temu możliwe jest lepsze utrzymanie połączenia i poprawa jakości komunikacji.

2. MOŻLIWOŚCI WYDOBYWCZE

2.1. Chwytnak

W projekcie łazika planetarnego Kalman kluczowym założeniem jest zastosowanie modułowości. W celu realizacji różnorodnych zadań łazik wyposażony jest w kilka rodzajów szczęk, które są montowane na manipulatorze, a ich wybór jest dostosowany do konkretnych zadań, jakie łazik ma wykonać. Do precyzyjnych operacji wykorzystywany jest chwytak o specjalnej konstrukcji, wyposażony w profilowane wypustki, które okazują się przydatne podczas przenoszenia przedmiotów lub wykonywania prostych prac serwisowych, takich jak odkręcanie czy zamykanie zaworów. Modele wykorzystywanych nakładek wraz z gotowym modułem chwytaka znajdują się na rysunku 2 [3].

Zestaw szczęk wykorzystywany w celach wydobywczych również został zaprojektowany w sposób unikalny. Konstrukcja tych szczęk umożliwia pobieranie próbek gleby, a następnie dzięki szczelnemu połączeniu szczęki górnej i dolnej możliwe jest przeniesienie pobranej próbki do mobilnego laboratorium badawczego lub specjalnego pojemnika przeznaczonego do przechowywania takich próbek. Ta elastyczność i funkcjonalność modułowego podejścia do szczęk znacznie zwiększa wszechstronność łazika Kalmana, umożliwiając mu skuteczne wykonywanie różnorodnych misji na powierzchni planety.



Rys. 2. Modele (a) oraz złożony chwytak (b)

2.2. Ramię

Łazik planetarny Kalman od momentu wprowadzenia nowego rozwiązania, jakim jest mechaniczne ramię 6DOF, zyskał możliwość pracy w dwóch trybach: autonomicznym oraz z kontrolą operatora. Dzięki sześciu stopniom swobody nowe ramię oferuje znacznie większą precyzję w wykonywaniu zadań. Wyposażone w kamery umożliwia łazikowi efektywną obserwację obiektów w najbliższym otoczeniu. Szczególną

zaletą tego ramienia 6DOF jest jego duża skala działania i zasięg, co pozwala na obserwację oraz pobieranie próbek z mniej dostępnych uprzednio dla Kalmana miejsc. Ramię robota staje się nieocenionym narzędziem wspierającym operacje naprawcze, podnosząc tym samym wartość funkcjonalną i efektywność działania łazika Kalmana [3].

Na rysunku 3 znajduje się model obecnie stosowanego ramienia.



Rys. 3. Obecnie stosowane ramię 6DOF

2.3. Wiertło

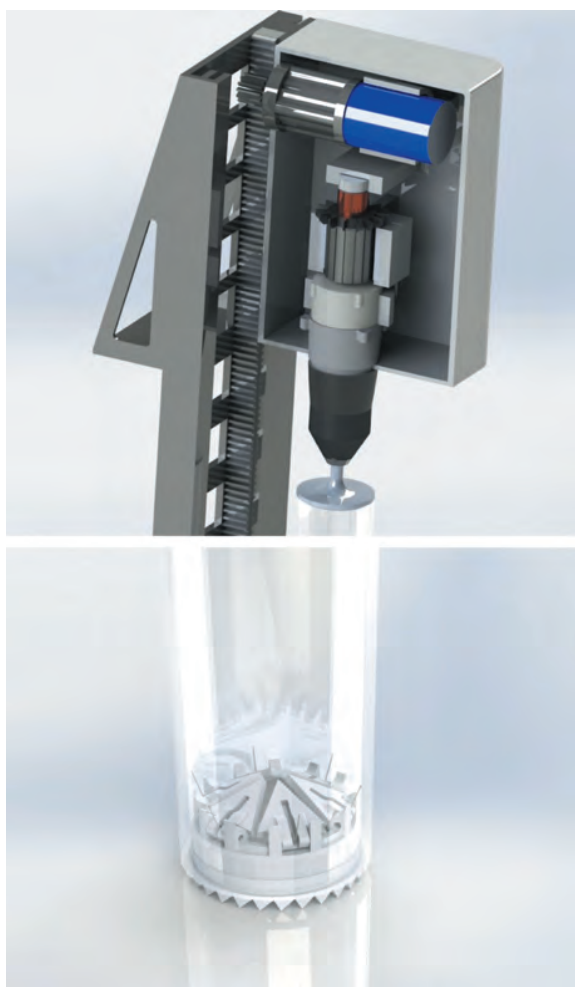
Układ napędowy użyty w tym projekcie został zaczerpnięty z rozwiązań dostępnych na rynku. Tak dostosowana konstrukcja obejmuje kilka kluczowych elementów. Na początku znajduje się silnik szczotkowy DC o napięciu 18 V, który stanowi rdzeń napędu. Następnie zastosowano przekładnię planetarną, która jest skompletowana ze sprzęgłem bezpieczeństwa (kulkowym), a połączenie tych dwóch elementów zapewnia niezawodne działanie układu. Aby osiągnąć ruch pionowy, użyto mechanicznego mechanizmu koła zębatego-listwy zębatej. Ten mechanizm jest napędzany przez silnik DC, który został zestawiony z przekładnią planetarną, co gwarantuje płynność i skuteczność działania. Dodatkowo zastosowano specjalne prowadnice, które stabilizują ruch mechanizmu, co pozwala na jego harmonijne i kontrolowane opuszczanie się.

Cały układ napędowy został starannie dostosowany i zoptymalizowany, aby zapewnić nie tylko wysoką wydajność, ale także bezpieczeństwo i stabilność pracy. Dzięki wykorzystaniu podzespołów z uprzednio

stosowanych urządzeń oraz precyzyjnym rozwiązaniom mechanicznym ten zespół napędowy jest nie tylko skutecznym narzędziem, ale również doskonałym przykładem adaptacji istniejących technologii do nowych zastosowań.

Obecny model świdra powstał w celu spełnienia wymagań nowych zasad European Rover Challenge, według których łazik ma mieć możliwość pobrania próbki spod powierzchni o głębokości większej niż 30 cm. Analog regolitu marsjańskiego, jakiego należy się spodziewać podczas zawodów, sprawia, że kolejne prototypy muszą być sprawdzane pod kątem nie tylko możliwości wwiercania się, ale i odporności zastosowanych materiałów i elementów, aby na zakończenie operacji szczelnie przechować pobrany rdzeń. Mechanizm wiertła oraz świder rdzeniowy pokazano na rysunku 4.

Druk 3D pozwala na szybkie prototypowanie kolejnych iteracji świdra i zastosowanie nowych form usprawniających funkcjonowanie. W momencie, gdy konkretny model spełni oczekiwania pod względem ogólnego działania, następuje wykonanie elementów z bardziej odpornych materiałów, takich jak stal.



Rys. 4. Modele obecnych wersji mechanizmu wiertła oraz rdzeniówki

3. AUTONOMIA

3.1. Lokalizowanie robota

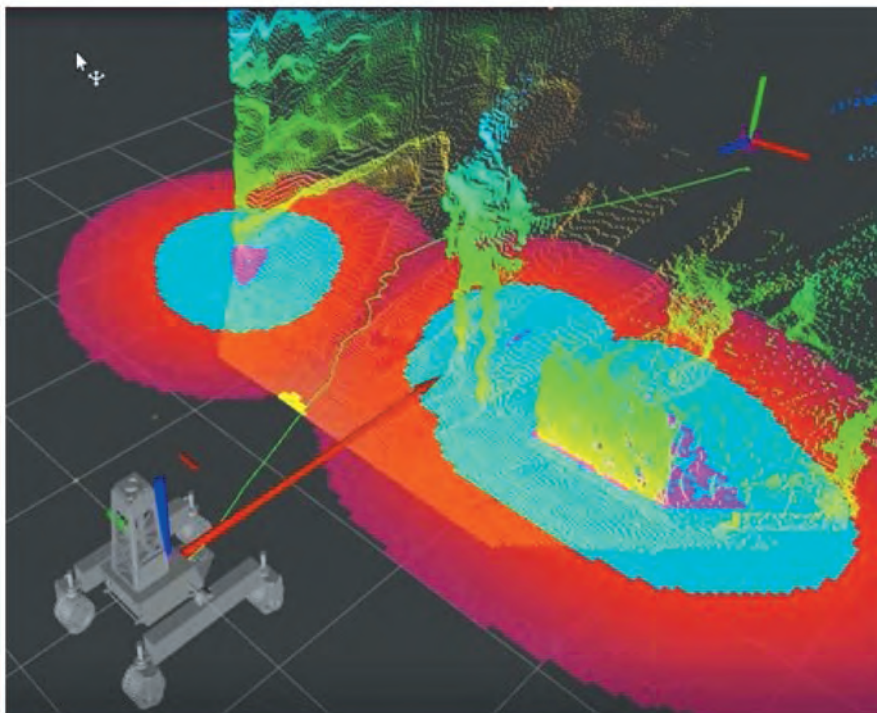
Łazik Kalman nazwany został na cześć Rudolfa Kalmana, czyli twórcy tzw. filtru Kalmana, algorytmu, który już od lat sześćdziesiątych na szeroką skalę używany jest w robotyce. Pozwala on odszumiać odczyty z czujników robota i przewidywać jego stan w dowolnej chwili w czasie. Łazik Kalman wykorzystuje ten algorytm do zwielokrotnienia wydajności odometrii, czyli podsystemu mierzącego zmiany w położeniu robota i określającego jego pozycję w przestrzeni. Odometria Kalmana opiera się na modułach GPS oraz IMU zawierających żyroskop i akcelerometr. Odczyty z tych przyrządów są porównywane z wynikami odometrii wizualnej, która mierzy ruch robota na podstawie zdjęć z kamer rozmieszczonych dookoła jego kadłuba. Wszystkie zebrane dane są ze sobą łączone, co przy użyciu filtru Kalmana daje bardzo precyzyjne informacje o położeniu łazika z dokładnością rzędu milimetrów.

3.2. Mapowanie terenu

Marsjańskie krajobrazy pełne są gładów, stromych klifów i kraterów. Tęgo typu trudne warunki stanowią wyzwanie dla łazików planetarnych pokroju Kalmana.

Łaziki nie byłyby w stanie poruszać się autonomicznie bez jakichkolwiek kamer lub czujników otoczenia. Dlatego Kalman wyposażony jest w zestaw elektronicznych „oczu” w postaci czterech kamer głębi Intel RealSense, które jednocześnie działają jak standardowa kamera oraz podobnie jak skaner LIDAR w jednym urządzeniu. Kamery RealSense wykorzystują widzenie stereoskopowe, a to oznacza, że posiadają dwa czujniki podczerwieni umieszczone na ich obu końcach. Dzięki nim kamera jest w stanie wydobyć informacje o głębi widzianego obrazu w podobny sposób, jak robiłaby to para ludzkich oczu [4].

Informacje o głębi pochodzące z kamer są przedstawiane w postaci chmury punktów, gdzie każdy piksel w klatce obrazu odpowiada co najwyżej jednemu wierzchołkowi w chmurze. Niestety ten format danych zawiera dużo zbędnych informacji i nie pozwala nam w łatwy sposób określić, w których kierunkach Kalman jest w stanie pojechać. Dlatego autonomiczne algorytmy Kalmana przetwarzają strumień danych z kamer tak, aby wyciągnąć z dokładnej chmury punktów tylko to, co interesuje łazik, czyli to, czy w danym miejscu znajduje się przeszkoda, czy też nie. Kalman wraz z przebiegiem podróży wielokrotnie dokonuje tej analizy chmury punktów i zapamiętuje niedostępne miejsca w tzw. cost-mapie, czyli dwuwymiarowej macierzy przechowującej strukturę otoczenia widocznego z lotu ptaka dookoła łazika. Zobrazowanie chmury punktów znajduje się na rysunku 5.

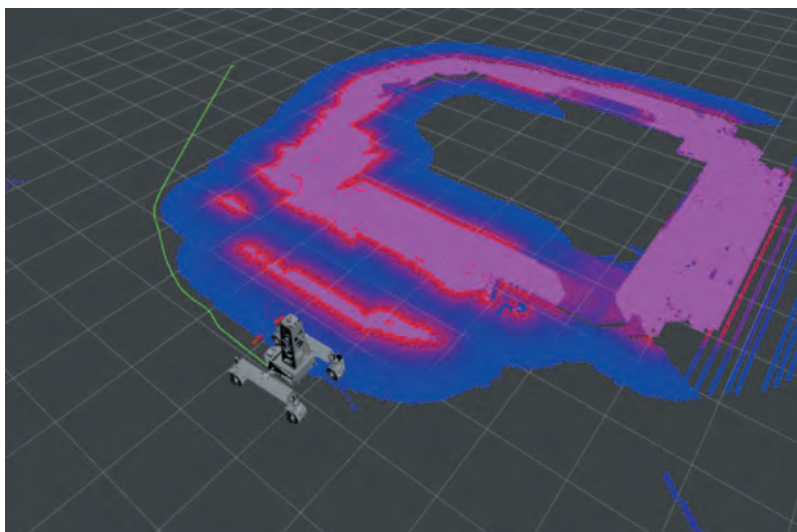


Rys. 5. Chmura punktów zarejestrowana przez łazik podczas testów

3.3. Wyznaczanie i śledzenie ścieżki

Kalman wykorzystuje cost-mapę, by za pomocą algorytmu A-star (A*) planować bezkolizyjne ścieżki ruchu w trakcie podróży do miejsca o zadanych

współrzędnych. Na sam koniec inny moduł autonomii, tzw. *path follower*, zamienia zaplanowaną ścieżkę oraz informacje o położeniu robota na polecenia dla jego kół. Idea została przedstawiona na rysunku 6.

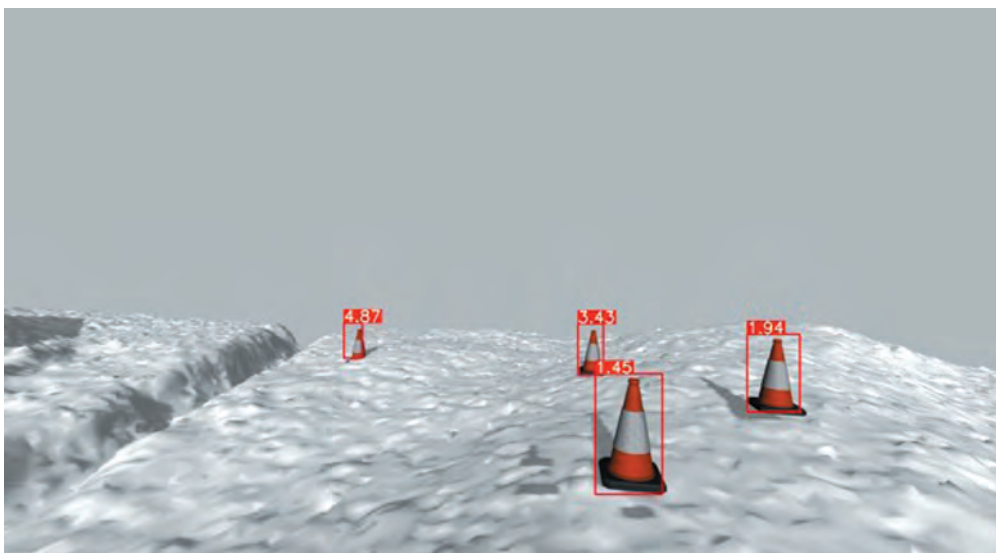


Rys. 6. Zapamiętane położenie przeszkód w układzie współrzędnych i wyznaczona ścieżka

3.4. Wykrywanie obiektów

Kalman potrafi również wykrywać wszelkiej maści obiekty używane podczas zawodów jako punkty zainteresowania dla łazika. Taka funkcjonalność jest zaimplementowana przy zastosowaniu sztucznej inteligencji w połączeniu z tradycyjnymi metodami *computer*

vision. Przykładowo czarne strzałki używane na zawodach w Indiach są identyfikowane dzięki zwykłemu wykrywaniu krawędzi i dostosowywaniu kontrastu zdjęć z kamer, a trudniejsze do wykrycia pachołki drogowe są odnajdywane przez specjalnie wytrenowaną w tym celu sieć neuronową. Jej zobrazowanie znajduje się na rysunku 7.



Rys. 7. Pachołki wykryte przez łazik

3.5. Supervisor: mózg Kalmana

Mimo że łazik Kalman potrafi bez problemu przemieszczać się po powierzchni planety oraz wykrywać

interesujące go obiekty, samo to nie wystarczy, aby przeprowadzić udaną autonomiczną misję badawczą. Kalman posiada również tzw. *supervisor*, który spełnia rolę „mózgu” robota podczas wykonywania misji.

Supervisor kontroluje wszystkie czynności, które ma wykonać robot w trakcie przejazdu, i wytycza kolejne punkty docelowe dla łazika. Przed rozpoczęciem każdego zadania publikowane są zasady konkurencyjnej i na podstawie tej instrukcji supervisor jest przez nas projektowany tak, aby w jak najlepszy sposób wykorzystać możliwości Kalmana

System autonomicznej jazdy Kalman łączy ze sobą zaawansowane algorytmy, w tym filtr Kalmana, odometrię wizualną, planowanie ścieżki, wykrywanie obiektów i moduł nadzorczy. Ta kompleksowa struktura umożliwi Kalmanowi autonomiczną nawigację, mapowanie terenu, wykrywanie obiektów i wykonywanie złożonych zadań w trudnych marsjańskich środowiskach. Połączona funkcjonalność tych podsystemów zapewnia sukces autonomicznych misji badawczych Kalmana.

4. PODSUMOWANIE

Kalman jest robotem, który potrafi działać autonomicznie, a jego mechaniczna konstrukcja sprawia, że jest w stanie dobrze poradzić sobie w wymagającym terenie.

Łazik planetarny, taki jak Kalman, mógłby brać udział w kosmicznych wozach jako towarzysz kosmicznych spacerów, ponieważ potrafi nosić ładunki, przenosić narzędzia, jest w stanie udzielić pomocy w nagłych wypadkach. Może uczestniczyć również w pracach poszukiwawczych i wydobywczych, co może być pomocne podczas zwiadu terenowego, który może być klu-

czowy podczas rozszerzania terytorium w przypadku rozbudowy kolonii. Kalman dzięki modułom takim jak chwytak, mobilne laboratorium badawcze czy też świder rdzeniowy jest w stanie pomóc w ocenie zasobów na danym terenie. Kalman potrafi wykrywać interesujące miejsca oraz zapisywać ich lokalizację czy komunikować się z bazą. Część z zadań, które towarzyszyłyby kolonizacji obcej planety mogłyby być wykonywane przez Kalmana.

Literatura

- [1] Olszewski M., Bednorz S., Łagan M.: *Łazik Kalman – Elektronika, Software oraz Science*. 59. Hutnicza Konferencja Studenckich Kół Naukowych AGH, Kraków 2022 [niepublikowane].
- [2] *Classify space rocks by using Python and artificial intelligence*, <https://learn.microsoft.com/en-us/training/paths/classify-space-rocks-artificial-intelligence-nasa/> [30.07.2023].
- [3] Gliwiński Ł., Mika A., Gibiec M.: *Kalman – łazik planetarny, który ewoluuje dzięki mechanicznym innowacjom*. 60. Hutnicza Konferencja Studenckich Kół Naukowych AGH, Kraków 2023.
- [4] Bednorz S., Urbanik I.: *Autonomiczna nawigacja łazika planetarnego Kalman*. II Studencka Konferencja Kosmiczna, Wrocław 2022 [niepublikowane].

inż. RADOŚLAW REJMAN

rrejman@student.agh.edu.pl

inż. KAROLINA GREŃ

kgren@student.agh.edu.pl

RAFAŁ ŻELAZKO

rayferric@student.agh.edu.pl

WOJCIECH LIWACZ

wliwacz@student.agh.edu.pl

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

**We would like to extend our heartfelt thanks to the reviewers of papers for
“MINING – Informatics, Automation and Electrical Engineering”
journal in 2022**

**Chcielibyśmy serdecznie podziękować recenzentom artykułów do czasopisma
„MINING – Informatics, Automation and Electrical Engineering” w 2022 roku**

Wacław Andrusikiewicz, AGH University of Krakow, Krakow, Poland
Witold Biały, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland
Ryszard Błażej, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland
Przemysław Bodziony, AGH University of Krakow, Krakow, Poland
Katarzyna Cyran, AGH University of Krakow, Krakow, Poland
Jarosław Domin, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland
Józef Jonak, Lublin University of Technology, Lublin, Poland
Iwona Jonczy, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland
Marek Kalita, KOMAG Institute of Mining Technology, Gliwice, Poland
Paweł Kamiński, Przedsiębiorstwo Budowy Szybów S.A., Tarnowskie Gory, Poland
Piotr Kasza, AGH University of Krakow, Krakow, Poland
Witold Kawalec, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland
Piotr Małka, Wodociągi Miasta Krakowa S.A. (Krakow Water), Poland
Katarzyna Midor, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland
Tomasz Olejnik, Lodz University of Technology, Lodz, Poland
Maksymilian Ozdoba, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław, Poland
Zbigniew Rak, AGH University of Krakow, Krakow, Poland
Zenon Rożenek, KAZ Sp. z o.o., Gliwice, Poland
Kazimierz Różkowski, AGH University of Krakow, Krakow, Poland
Krzysztof Skrzypkowski, AGH University of Krakow, Krakow, Poland
Kazimierz Stoiński, Central Mining Institute, Katowice, Poland
Zbigniew Szkudlarek, KOMAG Institute of Mining Technology, Gliwice, Poland
Marek Szygula, KOMAG Institute of Mining Technology, Gliwice, Poland
Janina Świątek, Central Mining Institute, Katowice, Poland
Jakub Wiech, Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland
Andrzej N. Wieczorek, Silesian University of Technology, Gliwice, Poland
Jacek Zarzycki, AGH University of Krakow, Krakow, Poland

