https://doi.org/10.7494/miag.2021.4.548.31

PAWEŁ MADEJSKI
SŁAWOMIR RÓŻYCKI
MARIAN BANAŚ
TADEUSZ PAJĄK

Selected aspects of coal gasification for application in low-emission energy technologies

Solid fuel electricity generation has been known and used for many years. The combustion of solid fuels is a complex process that requires proper preparation of the fuel, carrying out the combustion process, as well as the removal of harmful substances in the form of dust and gaseous pollutants (NOx, SOx, CO) from exhaust gases emitted into the environment. For decades, the gaseous form has been considered the noblest form of fuel. Gaseous fuels can be easily transported over long distances, are immediately ready for combustion and the composition of the fuel mixture can be freely adjusted. The constant pursuit to reduce anthropogenic greenhouse gas emissions require the use of low-emission and zero-emission energy generation technologies. In the case of coal, this will mean a shift from direct combustion to more advanced systems powered by gaseous fuel. The paper presents an overview of the available techniques and technologies of solid fuel gasification aimed at the production of gaseous fuels, which can be used in low-emission energy technologies. The computational methods of the gasification process are also presented, which allow the selection of the best technology and operating parameters of individual reactors.

Key words: *gasification, gas fuel, syngas, gas technology*

1. INTRODUCTION

The process of fossil-derived solid fuels gasification significantly increases their applicability while reducing their negative environmental impact [1]. Produced by thermal decomposition, in a small quantity of air\oxygen or water vapor, the basic product of gasification, called syngas (synthetic gas), can be used both for heat generation in the energy sector and for the production of synthetic hydrocarbons in the petroleum and chemical sector [2]. Such a wide range of applications is, on the one hand, an opportunity for the development of this technology and, on the other, a risk that the products obtained will not be used where the benefits of their use will be the greatest. Given the current problems of ensuring clean air in many regions of the world, and the need to reduce greenhouse gas emissions [3], the use of syngas in energy technologies seems appropriate (Fig. 1). The combustion of solid fuels causes relatively greater emissions than the combustion of gaseous fuels (emission of both solid and gaseous pollutants), especially in the case of low-power boilers that are not equipped with flue gas cleaning systems, and where the combustion process conditions are often significantly different from optimal [4]. There are many indications that the greater use of syngas can be expected in the chemical industry in the future [5].

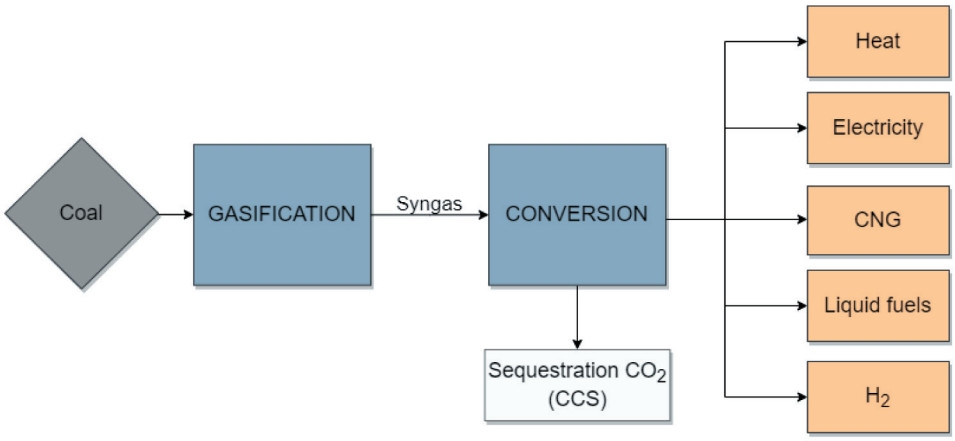


Fig. 1. Syngas as universal energy resource

2. GASIFICATION TECHNOLOGIES – SOLUTION OVERVIEW

Solid fuel gasification technologies are categorized according to the design solutions of the system used for the gasification process (including the reactor itself) and the process parameters: temperature, properties of the feedstock, gasifying agent and its concentration, pressure. The achievable process parameters parameters are determined by the choice of the gasification system.

The gasification systems are distinguished by the method of heat supply to the process (with direct heating – autothermal, with indirect heating – allothermal) and the movement of the reactants in the reactor. The basic types include moving bed gasifiers (downdraft and updraft), fluidized bed gasifiers (bubbling fluidized-bed or circulating fluidized-bed), and entrained-flow gasifiers. Moving bed gasifiers are referred to in the literature and hereinafter interchangeably as fixed bed reactors. Diagrams of most common gasifier types are shown in Figure 2.

The type of reactor determines the temperature range in which the gasification process is carried out and affects the temperature profile along the length of the reactor. An increase in temperature usually increases the proportion of hydrogen and carbon monoxide in the produced syngas, while an increase in pressure increases the proportion of methane [6]. The main differences between reactor types are presented in Table 1.

In commercial applications, reactors of various designs are used, operating with different sets of the process parameters – at present it is difficult to define the optimal variant, although development trends can already be indicated. Updraft reactors are suitable for raw materials where moisture accounts for up to 50 wt%. Feedstock with a high inert content, such as coal dust, sewage sludge or municipal waste, which are not suitable for fixed bed reactors, have been successfully gasified in bubbling fluidized bed reactors. Wood biomass is not suitable for entrained-flow reactors, unless it is pretreated in torrefaction and grinding processes [7]. In practice, bio-coal suspensions with bio-oil are used, as well as wood or bio-coal dispersed/dissolved in glycerol, ethylene glycol, phenolic oil or bioliquids [8]. Fixed bed reactors are currently being used less and less. Fluidized bed reactors, despite many advantages, have gained relatively little commercial interest. Currently, the most commonly developed and used reactors are entrained-flow ones [9].

2.1. Coal

Coal gasification technologies have been in operation since the beginning of the 19th century. The popularity of this raw material as a gasification feedstock is high due to the stability of supplies, relatively stable quality parameters and low price. Coal is commercially gasified in fixed bed gasifiers (Lurgi [10] and British Gas Lurgi [11, 12]), fluidized bed gasifiers (Great Point Energy [13], Winkler [14], TRIG [15]) and entrained-flow gasifiers (GE Energy [16], Texo, Koppers-Tozek, Shell [1]).

In the past, the synthesis gas obtained from coal was used for various purposes. During World War II, processing into transport fuels in the Fischer-Tropsch synthesis process predominated [17], while in the last 60 to 70 years a significant amount of it was converted into hydrogen for the production of ammonia [18]. In the last 25 years it has been intensively used in commercial power plants with the use of technologies based on an integrated gasification combined cycle (IGCC) [19].

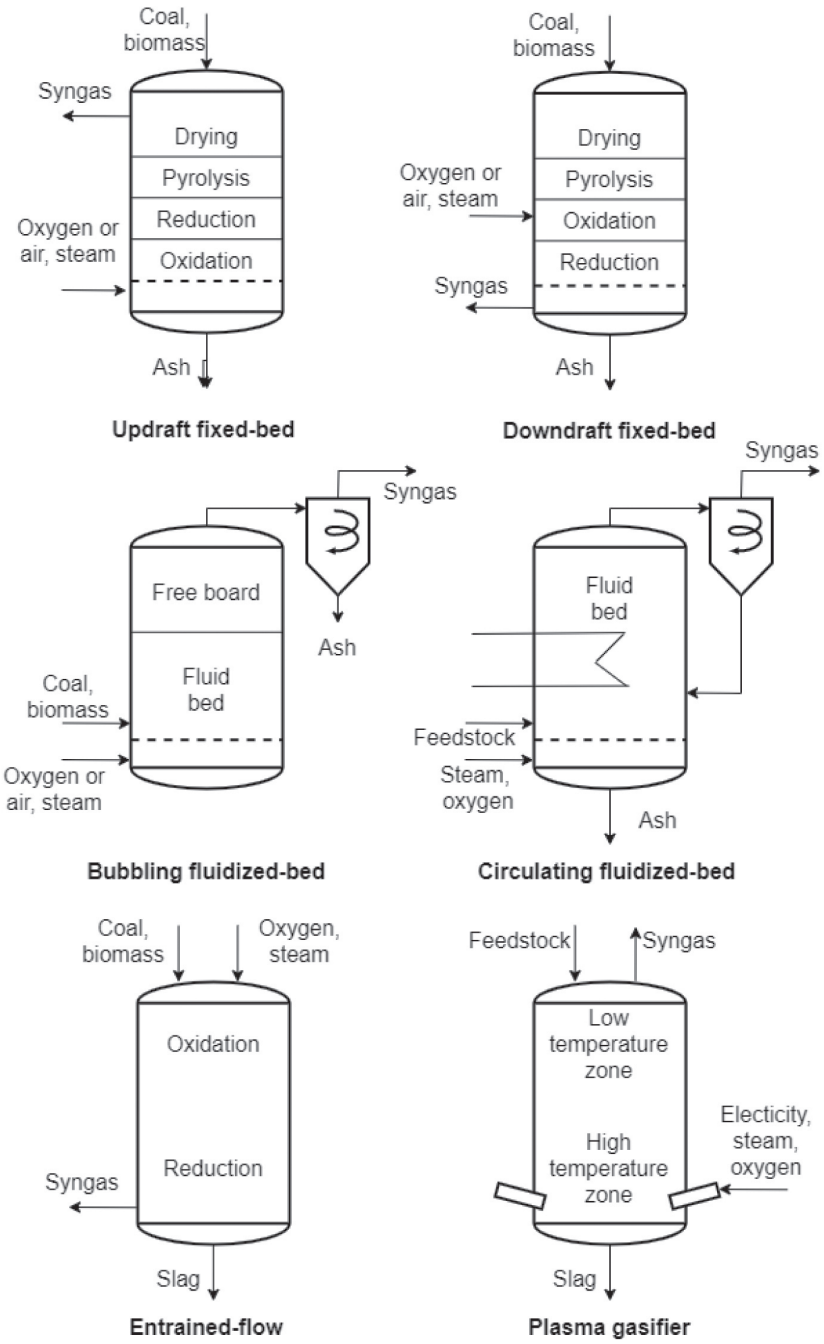


Fig. 2. General scheme of synthesis gas reactors (based on [3, 9, 10])

Table 1

Comparison of the primary types of gasification reactors [6]

Property	Fixed-bed	Fluidized-bed	Entrained-flow
Particle size [mm]	<51	<6	<0,15
Gas outlet temperature [°C]	450–600	800–1000	>1260
Temperature in the reaction zone [°C]	1090	800–1000	1990
Demand for an oxidizing agent	low	moderate	high
Characteristics of ash	dry	dry	slag
Scale	small	medium	large
Operational problems	tars blocking equipment and pipelines	low carbon conversion	material problems due to high temp.
Installed power [GW]	18.7 (42%)	0.9 (2%)	25.4 (56%)

2.2. Cogasification with biomass

The level of greenhouse gas emissions has become one of the benchmarks for the application of technological solutions in both environmental and economic terms. For this reason, mainly those gasification technologies that allow the use of biomass or waste not suitable for further processing are being developed. As a rule, the gasification process of such materials is analogous to that of coal, but the differences in their structure and heterogeneity constitute a major technical challenge. This means that the design of the reactors must be modified [20], to increase their flexibility in working with particles of greater differentiation in size and shape, moisture, calorific value and content of the elements: carbon, hydrogen, oxygen, sulfur and nitrogen, as well as ash and trace elements (which, however, can significantly affect the course of the process and the quality of the products received) [21]. Taking into account the features of individual types of reactors, a fluidized bed reactor is often used for gasification of biomass (HoSt [22], ANDRITZ AG [23], Valmet Corporation [24], Eqtec [25]), but also in this case other reactors can be used: fixed bed (Shangqiu Haiqi Machinery Equipment [26], Chanderpur Works [27], Infinite Energy [28]), entrained-flow (Siemens AG [29]). Despite many technical and logistical problems [30], which often ended with the cessation of operation of biomass gasification plants, there is still considerable interest in these technologies [12]. It is related to the higher exergy efficiency of gasification compared to the combustion process [31].

The reduction in the number of operational problems typical for biomass gasification can be achieved by co-gasification with coal [32]. Adapting the technology to gasification of these fuels in different mass proportions greatly facilitates the management of the continuity of energy production. In cogasification, the efficiency of the process is also improved by ensuring a sufficiently high calorific value of the feed.

3. CHEMICAL MECHANISM OF THE GASIFICATION PROCESS

From a chemical point of view, a number of redox reactions occur during the gasification process. Depending on the process temperature, carbon in the form of either pre-decomposed organic compounds or in the form of radicals is oxidized by the so-called gasifying agent. Oxygen, hydrogen, water vapor, or even carbon dioxide may be the gasifying agent. Depending on the gasification agent used, chemical reactions during gasification can be as follows:

– Gasification with oxygen:

$$2C + O_2 \rightarrow 2CO \qquad \Delta H = -246 \text{ KJ/mol}$$

Oxygen as a gasifying agent may be in the form of air, but due to the formation of nitrogen oxides at high temperatures, it is better to use pure oxygen for gasification. The reaction is exothermic and with volume increases, so the shifting of the equilibrium toward the products is achieved by cooling and reducing the pressure, i.e. taking away heat and removing the CO produced.

– Gasification with hydrogen:

$$C + 2H_2 \rightarrow CH_4 \qquad \Delta H = -75 \text{ KJ/mol}$$

Here, the reaction is also exothermic, but proceeds with a reduction in volume, so to speed up the process, heat should be taken and pressure increased.

– Gasification with steam:

$$C + H_2O \rightarrow CO + H_2 \qquad \Delta H = +119 \text{ KJ/mol}$$

The reaction is endothermic and is proceeding with an increase in volume.

– Gasification with carbon dioxide:

$$C + CO_2 \rightarrow 2CO \qquad \Delta H = +172 \text{ KJ/mol}$$

The reaction is also endothermic and is proceeding with an increase in volume.

Apart from the reaction of coal with the gasifying agents in the gasification process, there are a number of reactions of gasification products. Here are some:

$$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O \qquad \Delta H = -206 \text{ KJ/mol}$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \qquad \Delta H = -41 \text{ KJ/mol}$$

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 \qquad \Delta H = -676 \text{ KJ/mol}$$

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O \qquad \Delta H = +119 \text{ KJ/mol}$$

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \qquad \Delta H = +206 \text{ KJ/mol}$$

In the real gasification process, not one reaction takes place, but several at once, therefore controlling these processes requires a lot of effort. It is performed by controlling the pressure (delivering or receiving reagents) and controlling the temperature.

Moreover, when the process is carried out at very high temperatures, reagents in the radical form can

participate in the reactions, in which take place the degradation of O_2 to radical oxygen O*, degradation of water molecules into O* radical, and hydrogen molecule or directly into hydrogen radicals 2H*. These radicals are very reactive and easily react with carbon as well as other compounds present in the gasifying mixture.

The use of carbon dioxide as a gasifying agent can be a very attractive method of its management – the product of such a process is carbon monoxide (CO), which is an energy carrier. The most promising gasification option is the use of steam as a gassing agent – the product is not only combustible carbon monoxide, but also gaseous hydrogen, which after separation is the desired energy carrier. It is gaining more and more popularity due to the possibility of its use in conventional combustion engines, gas turbines and fuel cells.

4. CALCULATION METHODS FOR THE GASIFICATION PROCESS

The accuracy of the results of the modeling gasification processes depends on the assessment of technical, economic, and ecological efficiency, which is the basis for deciding on the legitimacy of the project that may increase the efficiency of using solid fuels. As a result of modeling, process parameters are determined: the amount of individual media and the resulting gas composition [33]. Modeling also allows to examine the influence of the composition of the feedstock, the type of gasifying agent, and the parameters of the gasification process on the obtained results [31]. The gasification process calculations are laborious. Therefore, they are performed almost exclusively in software. Their further development in terms of the accuracy of results is supported by the so-called machine learning and the use of neural networks [34].

4.1. Engineering methods

Conversion of solid fuel in the gasification process can be modeled using the equilibrium approach alone, using only the kinetic approach, and also using these two approaches simultaneously [35]. The use of engineering computational methods is associated with making many assumptions, depending on the selected method. These are the assumptions related to the temperature distribution in the reactor, heat exchange with the environment, the individual reactions rate. These methods usually don't take into account the formation of tars, replace coal fuel with pure carbon (graphite) and ignore the impact of the ash present in the raw material on the process. Nevertheless, practice has shown that the use of these methods leads to an approximation sufficient for engineering purposes [33].

Equilibrium models are among the oldest, most well documented and frequently used. The results obtained from these models are characterized by high compliance, especially in the analyzes of gasification at high temperatures (>850° C). Wang et al. showed that they are very useful, especially in the modeling of IGCC installations [36]. In one of the modeled cases, they obtained the consistency of the syngas composition modeling results with the experiment results at the level above 99% (relative error below 1%). Based on this model, they demonstrated how to maximize Cold Gas Efficiency (CGE) by optimizing the gasification temperature, oxygen supply and steam supply. The achieved improvement of CGE was 10% [37].

Kinetic models provide more information on the gasification mechanisms useful for process design and development but require more computational effort and are partly based on complex empirical kinetic equations [3]. Nowadays, a convenient method of modeling is the use of Aspen Plus software [38–41], in which there is no need to determine many chemical reactions occurring during gasification, but a process flow diagram should be created, and chemical compounds that may be present in the process, as well as the conditions of the process (flow, temperature, pressure), should be defined.

4.2. CFD modeling of the solid fuel conversion process

Many multidirectional changes between the substrates and the gasifying agent occur in the gasifier, which may also be affected by gasification products. The final effect of the process is significantly influenced, apart from the process parameters, by the shape and dimensions of the reactor, which determine the time and conditions in which the reactants stay. For this reason, the engineering methods that have proven successful in balancing the mass and energy of the gasification process are not sufficient to

improve the design of reactors and minimize the emission of undesirable compounds [42]. The significant progress made in recent years in the field of numerical modeling techniques and the efficiency of computing machines allows for the modeling of the behavior of raw materials and products in the 3D model of the reactor [43, 44]. The model can take into account the fluid dynamics, the size and structure of the raw material particles, the kinetics of chemical reactions, mass and energy exchange between the solid and gas phases [45]. Modeling methods are further developed to reduce calculation time while maintaining or improving the consistency of results. For example, Mularski and Modlinski have demonstrated the significant impact of the adopted kinetic parameters on the composition of the producer gas and proposed a new procedure for optimizing input data [46]. The result of CFD modeling is, inter alia, distribution of velocity, temperature, unreacted raw material and gasification products.

5. STRATEGIES FOR COAL GASIFICATION

The energy sector is a key element of the economy, as its competitiveness largely depends on it. For this reason, it is present in the policies and strategies of countries around the world, and these, in turn, largely determine the feasibility and cost-effectiveness of projects in specific technologies. As an opportunity to convert raw materials into useful products (including fuels and energy), gasification is included in the strategies of all developed countries. Selected information, which presents a political attitude and reflects the state of knowledge, is presented in the following subsections.

5.1. European Union

The European Green Deal, together with Fit for 55, aims at the reduction of at least 55% of the European Union's greenhouse gas emissions by 2030 compared to 1990. Increased use of hydrogen is meant to help achieve this goal. The EU strategy for the development of hydrogen production advocates obtaining hydrogen from fossil fuels with carbon dioxide capture. According to EU estimates, in order for it to be able to compete with hydrogen from fossil fuels without CCS, carbon-emission prices between 55 and 90 Euro per ton of carbon dioxide equivalent (CO_2e) would be necessary. This level was already reached in mid-2021, and at the time of writing this paper, the price was above its upper limit.

5.2. Poland

The government document "Energy policy of Poland until 2040" states that the global effects of research and development activities (R&D) indicate the existence of a potential for low-emission or zero-emission use of coal. In practice, this is to allow for partial further use of coal generating units. For this reason, the policy recommends searching, testing and implementing new methods of coal use and processing, i.e. gasification, oxy-combustion and other clean coal technologies.

At present, LW Bogdanka is discussing the cost-effectiveness of IGCC using Mitsubishi Hitachi Power Systems technology with a capacity of 500 Mwe [47].

5.3. United States of America

The Fossil Fuels Office of the US Department of Energy (DOE) supports the development of modular gasification technologies of various types and qualities of coal, as well as blends of coal with biomass and other waste, aimed at the production of clean syngas suitable for the production of electricity, chemicals, hydrogen, transport fuels and other products depending on the needs of the internal market. In 2021, the DOE selected four projects for which it awarded $2 million in research and development (R&D) support to refine the technology for the gasification of coal-biomass mixtures and plastic waste. According to assumptions, these technologies are designed to produce hydrogen while ensuring a negative carbon balance.

5.4. Japan

In the strategy of the Japanese Agency for Natural Resources and Energy of July 2018 (The 5th Strategic Energy Plan) it was stated, inter alia, that in order to further reduce greenhouse gas emissions, the development and practical applications of a new genera-

tion of highly efficient coal-based energy production technologies will be promoted, such as the integrated coal gasification combined cycle (IGCC) and the integrated coal gasification fuel cell combined cycle (IGFC). As a result, the world's largest 525 MWe IGCC installation was launched in Iwaki in 2021, with 48% efficiency.

5.5. Australia

Australia, rich in coal seams, in the published strategy „First Low Emissions Technology Statement – 2020" indicates coal gasification combined with carbon dioxide sequestration as one of the cheapest methods of producing pure hydrogen in the short-term perspective. For this reason, the Australian government is expected to allocate $50 million to research and development (R&D) projects aimed at achieving commercialization.

6. CONCLUSIONS

The discussion on the purposefulness and efficiency of coal gasification in the era of decarbonization, pursuing for climate neutrality and implementing new and more stringent EU regulations in the field of climate protection is of great importance. However, it requires the development and implementation of advanced and dedicated technologies that follow these regulations, ensuring highly efficient production of fuels for low-emission energy generation.

Coal has tremendous potential for other energy-chemical applications, the basis of which will be the processes of its conversion: gasification or hydrogenation. The scientific community is facing a number of challenges, the realization of which will create the possibility of developing effective, climate-friendly technologies of the 21st century for the generation of energy and raw materials from coal deposits. There are many arguments in favor of coal gasification, including:

- improving the efficiency of low-emission electricity generation from hard coal, aiming at high-efficiency zero-emission coal-fired units integrated with the capture of CO_2 from the flue gas,
- increasing the raw material independence for the petrochemical industry,
- facilitating the process of biomass gasification (co-gasification).

The review of solid fuel gasification technologies has shown that there are advanced technologies available that can be applied to many raw materials. The type of reactor has a significant influence on the physicochemical properties of the obtained products, apart from the parameters of the raw materials. It determines the feasible process conditions and the way in which the raw material should be prepared. The selection of an appropriate solution strongly depends on the intended method of further use of the products and the possibility of waste management (including waste heat). Proper correlation of the gasification technology with the technology of energy use of its products is necessary from the point of view of maximizing the total energy efficiency and contributes to the reduction of the emission of greenhouse gases and pollutants: tars, dust, ammonia, hydrogen sulfide, hydrogen chloride, etc. [48]. For this purpose, available modeling methods can be used, which have repeatedly shown a high correlation with the experimental results. Optimization of the design of the selected gasification reactor is possible thanks to the numerical modeling methods, which are being constantly developed, but already enable the achievement of reliable (verified and validated) results with the use of CFD (Computational Fluid Dynamics).

Acknowledgments

The research leading to these results has received partial funding from the Norway Grants 2014–2021 via the National Centre for Research and Development. Article has been prepared within the frame of the project: "Negative CO_2 emission gas power plant–NOR/POLNORCCS/NEGATIVE-CO2-PP/0009/2019-00 which is co-financed by program "Applied research" under the Norwegian Financial Mechanisms 2014–2021 POLNOR CCS 2019–Development of CO_2 capture solutions integrated in power and industry processes.

References

[1] Mishra A., Gautam S., Sharma T.: *Effect of operating parameters on coal gasification.* International Journal of Coal Science & Technology 2018, 5, 2: 113–125.

[2] Abdoulmoumine N., Adhikari S., Kulkarni A., Chattanathan S.: *A review on biomass gasification syngas cleanup.* Applied Energy 2015, 155: 294–307.

[3] Tennison I. et al.: *Health care's response to climate change: a carbon footprint assessment of the NHS in England.* The Lancet Planetary Health 2021, 5: 84–92.

[4] Balmes J.R.: *Household air pollution from domestic combustion of solid fuels and health*. Journal of Allergy and Clinical Immunology 2019, 143, 6: 1979–1987.

[5] Kwaśniewski K., Kopacz M., Grzesiak P., Kapłan R., Sobczyk E.J.: *Zgazowanie węgla: uwarunkowania, efektywność i perspektywy rozwoju.* Wydawnictwa AGH, Kraków 2015.

[6] Klimiuk E., Pawłowska M., Pokój T.: *Biopaliwa: Technologie dla zrównoważonego rozwoju*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.

[7] You S., Ok Y.S., Tsang D.C. W., Kwon E.E., Wang C.-H.: *Towards practical application of gasification: a critical review from syngas and biochar perspectives*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 2018, 48, 22–24: 1165–1213.

[8] Svoboda K., Pohořelý M., Hartman M., Martinec J.: *Pretreatment and feeding of biomass for pressurized entrained flow gasification.* Fuel Processing Technology 2009, 90, 5: 629–635.

[9] Chmielniak T., Ściążko M.: *Development state and analysis of available gasification technologies used for solid fuels and wastes*. In: *Development of coal, biomass and wastes gasification technologies with particular interest in chemical sequestration of CO_2: a monograph*, red. A. Strugała, AKNET, Kraków 2012, 200–208.

[10] *Lurgi FBDB^{TM} – Fixed Bed Dry Bottom Gasification*. Air Liquide, https://www.engineering-airliquide.com/lurgi-fbdb-fixed-bed-dry-bottom-gasification [15.02.2022].

[11] *Clean Energy and Clean Air in one word: ENVIROTHERM*, 2012. https://enviro.su//assets/uploads/2018/10/Brochure_Envirotherm_Technologies.pdf [15.02.2022].

[12] Jafri Y., Waldheim L., Lundgren J.: *Emerging Gasification Technologies for Waste & Biomass.* IEA Bioenergy, 2020.

[13] Swanson M., Henderson A.: *Fluid-Bed Testing of Greatpoint Energy's Direct Oxygen Injection Catalytic Gasification Process for Synthetic Natural Gas and Hydrogen Coproduction. Year 6 – Activity 1.14 – Development of a National Center for Hydrogen Technology.* Grand Forks, Energy & Environmental Research Center, University of Dakota, USA 2012.

[14] Toporov D., Abraham R.: *Gasification of low-rank coal in the High-Temperature Winkler (HTW) process*. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 2015, 115, 7.

[15] Guan X.: *Particulate control devices in Kemper County IGCC Project*. Energy Reports 2019, 5: 969–978.

[16] *Lihuayi Again Selects GE's Gasification Technology to Boost Refinery Hydrogen Production.* GE News, https://www.ge.com/news/press-releases/lihuayi-again-selects-ges-gasification-technology-boost-refinery-hydrogen-production [15.02.2022].

[17] Andrews A., Logan J.: *Fischer-Tropsch Fuels from Coal, Natural Gas, and Biomass: Background and Policy*. CRS Report for Congress 2008, USA.

[18] Breault R.W.: *Gasification processes old and new: A basic review of the major technologies*. Energies 2010, 3, 2: 216–240.

[19] Phillips J.N., Booras G.S., Marasigan J.: *The history of integrated gasification combined-cycle power plants*. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017.

[20] Thomson R., Kwong P., Ahmad E., Nigam K.D.P.: *Clean syngas from small commercial biomass gasifiers; a review of gasifier development, recent advances and performance evaluation*. International Journal of Hydrogen Energy 2020, 45, 41: 21087–21111.

[21] Dahou T., Defoort F., Khiari B., Labaki M., Dupont C., Jeguirim M.: *Role of inorganics on the biomass char gasification reactivity: A review involving reaction mechanisms and kinetics models*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2021, 135.

[22] *Fluidized Bed Gasifier Plants. Biowaste Gasification.* HoSt Bioenergy, https://www.host.nl/en/biomass-gasification [15.02.2022].

[23] *ANDRITZ Carbona Bubbling Fluidized Bed (BFB) gasifier*. https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/power-generation/gasification/bfb-gasifiers [15.02.2022].

[24] *Valmet Gasifier for biomass and waste*. https://www.valmet.com/energyproduction/gasification/ [15.02.2022].

[25] *Patented Gasification Technology.* EQTEC Technology, https://eqtec.com/patented-gasification-technology/ [31.01.2022].

[26] *Henan Haiqi Environmental Protection Technology Co., Ltd-biomass burner, pellet burner, sawdust burner, biomass gasifier, waste pyrolysis gasification*. http://www.haiqi-machine.com/ [15.02.2022].

[27] *Downdraft Biomass Gasifiers and Updraft Biomass Gasifiers*. https://www.chanderpur.com/biomass-gasifier.php [15.02.2022].

[28] *Biomass Gasifiers, Gasifiers Pellets Supplier, Biomass Uses, Bio Fuel*. http://www.infiniteenergyindia.com/biomass-gasifiers.html [15.02.2022].

[29] *Gasification Technology Center*. TU Bergakademie Freiberg. https://tu-freiberg.de/en/iec/evt/networking/gasification-technology-center [15.02.2022].

[30] Asadullah M.: *Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014, 29: 201–215.

[31] Ptasinski K.J.: *Efficiency of Biomass Energy: An Exergy Approach to Biofuels, Power, and Biorefineries*. John Wiley & Sons, New Jersey 2016.

[32] Howaniec N.: *Wybrane aspekty współzgazowania węgla i biomasy parą wodną*. Karbo 2015, 4: 139–144.

[33] Kozaczka J.: *Procesy zgazowania: inżynierskie metody obliczeń*. Wydawnictwa AGH, Kraków 1994.

[34] An H., Fang X., Liu Z., Li Y.: *Research on a soft-measurement model of gasification temperature based on recurrent neural network*. Clean Energy 2022, 6, 1: 861–868.

[35] Safarian S., Unnţórsson R., Richter C.: *A review of biomass gasification modelling*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019, 110: 378–391.

[36] Wang Y., Wang J., Luo X., Guo S., Lv J., Gao Q.: *Dynamic modelling and simulation of IGCC process with Texaco gasifier using different coal*. Systems Science & Control Engineering An Open Access Journal, January 2015, 3, 1: 198–210.

[37] Wang M., Liu G., Hui C.W.: *Optimization of IGCC gasification unit based on the novel simplified equilibrium model*. Clean Technologies and Environmental Policy 2018, 20, 2: 259–269.

[38] Ptasinski K.J., Hamelinck C., Kerkhof P.J.A.M.: *Exergy analysis of methanol from the sewage sludge process.* Energy Conversion and Management 2002, 43, 9–12: 1445–1457.

[39] Cruz P.L., Navas-Anguita Z., Iribarren D., Dufour J.: *Exergy analysis of hydrogen production via biogas dry reforming*. International Journal of Hydrogen Energy 2018, 43, 26: 11688–11695.

[40] Migliaccio R.: *Sewage Sludge Gasification in a Fluidized Bed: Experimental Investigation and Modeling*. Industrial & Engineering Chemistry Research 2021, 60, 13: 5034–5047.

[41] Jia J., Zang G., Paul M.C.: *Energy, exergy, and economic (3E) evaluation of a CCHP system with biomass gasifier, solid oxide fuel cells, micro-gas turbine, and absorption chiller*. International Journal of Energy Research 2021, 45, 10: 15182–15199.

[42] Singh R.I., Brink A., Hupa M.: *CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification*. Applied Thermal Engineering. 2013, 52: 585–614.

[43] Mularski J., Pawlak-Kruczek H., Modlinski N.: *A review of recent studies of the CFD modelling of coal gasification in entrained flow gasifiers, covering devolatilization, gas-phase reactions, surface reactions, models and kinetics*. Fuel 2020, 271.

[44] Madejski P.: *Numerical study of a large-scale pulverized coal-fired boiler operation using CFD modeling based on the probability density function method*. Applied Thermal Engineering 2018, 145: 352–363.

[45] Hasse C., Debiagi P., Wen X., Hildebrandt K., Vascellari M., Faravelli T.: *Advanced modeling approaches for CFD simulations of coal combustion and gasification*. Progress in Energy and Combustion Science 2021, 86: 100938.

[46] Mularski J., Modliński, N.: *Entrained-Flow Coal Gasification Process Simulation with the Emphasis on Empirical Char Conversion Models Optimization Procedure*. Energies 2021, 14, 6: 1729.
[47] Stabilny rozwój w niełatwym otoczeniu – raport zintegrowany 2019, Grupa Kapitałowa Lubelski Węgiel Bogdanka 2020.
[48] Acharya B.: *Cleaning of Product Gas of Gasification*. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory 2018: 373–391.

PAWEŁ MADEJSKI, prof.
SŁAWOMIR RÓŻYCKI, Ph. D., Eng
MARIAN BANAŚ, prof.
TADEUSZ PAJĄK, prof.
AGH University of Science and Technology
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland
{madejski, srozycki, mbanas, pajak}@agh.edu.pl

© 2021 Authors. This is an open access publication, which can be used, distributed and reproduced in any medium according to the Creative Commons CC-BY 4.0 License.

PAWEŁ MADEJSKI
SŁAWOMIR RÓŻYCKI
MARIAN BANAŚ
TADEUSZ PAJĄK

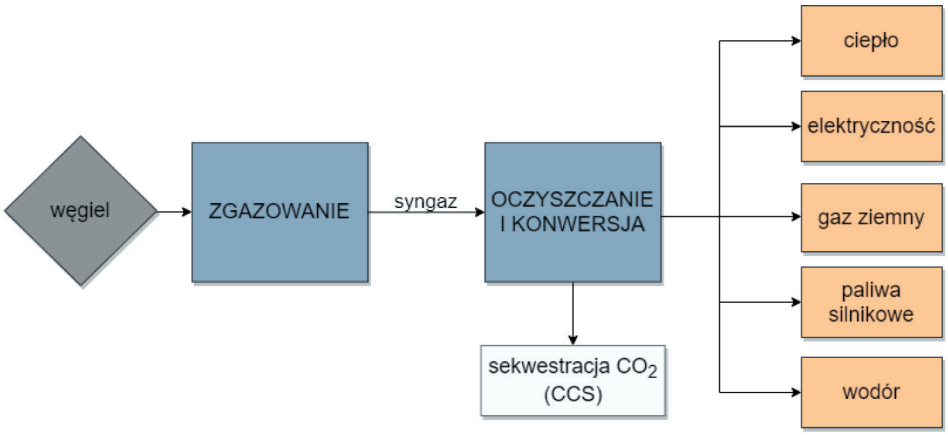
Wybrane aspekty zgazowania węgla do zastosowania w niskoemisyjnych technologiach energetycznych

Wytwarzanie energii elektrycznej z wykorzystaniem paliw stałych jest znane i stosowane od wielu lat. Spalanie paliw stałych jest procesem złożonym, wymagającym odpowiedniego przygotowania paliwa, przeprowadzenia procesu spalania, jak również pozbawienia spalin szkodliwych substancji emitowanych do środowiska w postaci pyłu oraz zanieczyszczeń gazowych (NOx, SOx, CO). Od dekad jako najszlachetniejszą postać paliwa uznaje się postać gazową. Paliwa gazowe mogą być łatwo transportowane na duże odległości, są od razu gotowe do spalania, a skład mieszanki paliwa można dowolnie regulować. Ciągłe dążenie do ograniczenia antropogenicznych emisji gazów cieplarnianych wiąże się z koniecznością stosowania niskoemisyjnych i zeroemisyjnych technologii wytwarzania energii. W przypadku węgla oznaczać to będzie konieczność odchodzenia od technologii bezpośredniego spalania na rzecz bardziej zaawansowanych układów zasilanych paliwem w postaci gazowej. W artykule przedstawiono przegląd dostępnych technik i technologii zgazowania paliw stałych ukierunkowanych na produkcję paliw gazowych, możliwych do zastosowania w niskoemisyjnych technologiach energetycznych. Przedstawione zostały także metody obliczeniowe procesu zgazowania mające umożliwić dobór najlepszej technologii oraz parametrów pracy poszczególnych reaktorów.

Słowa kluczowe: *zgazowanie, paliwo gazowe, syngaz, technologie gazowe*

1. WPROWADZENIE

Proces zgazowania paliw stałych pochodzenia kopalnego znacząco rozszerza możliwości ich stosowalności, przy jednoczesnym ograniczeniu ich negatywnego wpływu na środowisko [1]. Powstały poprzez rozkład termiczny, w niewielkiej ilości powietrza\tlenu lub pary wodnej, podstawowy produkt zgazowania, tzw. syngaz (gaz syntezowy), może zostać wykorzystany zarówno do wytwarzania energii elektrycznej w sektorze energetycznym, jak i do produkcji węglowodorów syntetycznych w sektorze petrochemicznym [2]. Tak duży zakres zastosowań jest z jednej strony szansą dla rozwoju tej technologii, a z drugiej zagrożeniem, że otrzymane produkty nie znajdą zastoso-wania tam, gdzie korzyści z ich wykorzystania będą największe. Biorąc pod uwagę obecne problemy z dotrzymaniem odpowiedniej czystości powietrza w wielu regionach świata oraz konieczność zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych [3], wciąż właściwe wydaje się zastosowanie syngazu w technologiach energetycznych (rys. 1). Spalanie paliw stałych powoduje względnie większą emisję niż spalanie paliw gazowych (emisja zanieczyszczeń zarówno stałych, jak i gazowych), zwłaszcza w przypadku kotłów małej mocy, które nie są wyposażone w systemy oczyszczania spalin, a w których warunki procesu spalania często znacząco odbiegają od optymalnych [4]. Wiele wskazuje na to, że w późniejszym okresie wykorzystania będzie można spodziewać się większego wykorzystania syngazu również w przemyśle chemicznym [5].



Rys. 1. Syngaz jako uniwersalny surowiec energetyczny

2. TECHNOLOGIE ZGAZOWANIA – PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ

Technologie zgazowania paliw stałych kategoryzowane są ze względu na rozwiązania konstrukcyjne układu wykorzystanego do procesu zgazowania (w tym samego reaktora) oraz parametry procesu: temperaturę, właściwości materiału wsadowego, czynnik zgazowujący i jego stężenie, ciśnienie. Możliwe do osiągnięcia parametry procesu determinuje wybór układu zgazowania.

Układy zgazowania wyróżnia sposób dostarczania ciepła do procesu (z ogrzewaniem bezpośrednim, z ogrzewaniem pośrednim) oraz ruch substratów w reaktorze. Do podstawowych typów zaliczamy reaktory ze złożem zwartym przesuwnym (współprądowe i przeciwprądowe), ze złożem fluidalnym (z warstwą fluidalną pęcherzykową lub cyrkulacyjną), dyspersyjne. Reaktory ze złożem zwartym przesuwnym są w literaturze i w dalszej części niniejszej pracy zamiennie określane jako reaktory ze złożem stałym. Schematy typowych reaktorów przedstawiono na rysunku 2.

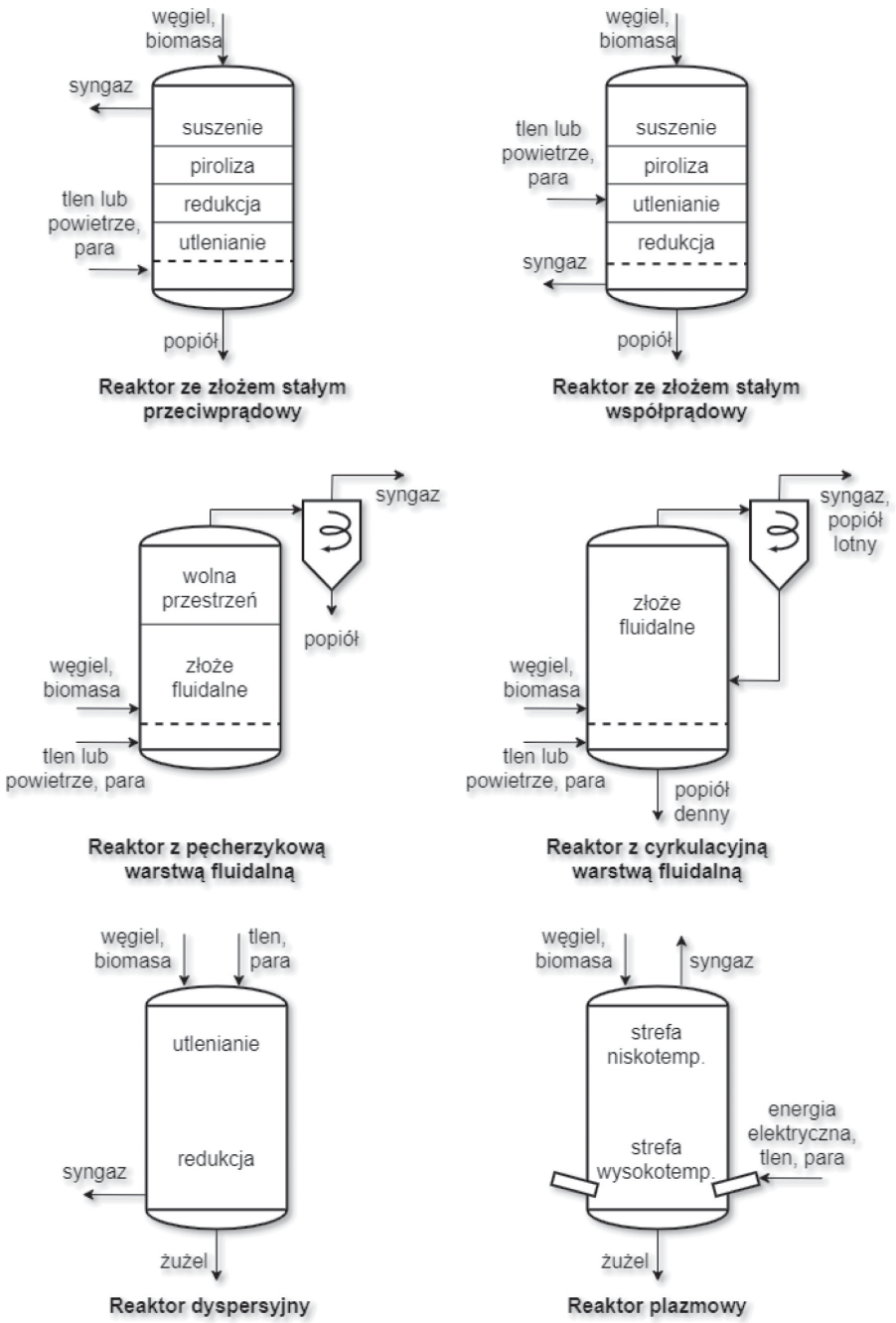
Typ reaktora determinuje zakres temperatur, w jakich prowadzony jest proces zgazowania, i wpływa na profil temperatury wzdłuż reaktora. Wzrost temperatury zwykle powoduje zwiększenie udziału wodoru i tlenku węgla w produkowanym syngazie, natomiast im wyższe ciśnienie, tym wyższy udział metanu [6]. Podstawowe różnice pomiędzy typami reaktorów zaprezentowano w tabeli 1.

W zastosowaniach komercyjnych wykorzystywane są reaktory o różnej konstrukcji, pracujące przy różnych zestawach stosowanych parametrów procesu – obecnie trudno określić jest wariant optymalny, choć można już wskazać na tendencje rozwojowe. Reaktory ze złożem stałym przeciwprądowe są odpowiednie dla surowców, w których wilgoć stanowi do 50% ich masy. Wsad z dużą zawartością części inertnych, jak np. miał węglowy, osad ściekowy czy też odpady komunalne, które nie są odpowiednie dla reaktorów ze złożem stałym, były z powodzeniem zgazowane w reaktorach z pęcherzykową warstwą fluidalną. Biomasa drzewna nie jest odpowiednia dla reaktorów strumieniowych, jeżeli wcześniej nie zostanie poddana wstępnemu przygotowaniu w procesach toryfikacji i mielenia [7]. W praktyce stosuje się zawiesiny toryfikatu z bioolejem, a także drewno lub toryfikat zdyspergowany/rozpuszczony w glicerolu, glikolu etylenowym, oleju fenolowym lub biopłynie [8]. Reaktory ze złożem stałym są obecnie coraz rzadziej wykorzystywane, reaktory fluidalne mimo wielu zalet zyskały stosunkowo niewielkie komercyjne zainteresowanie, a aktualnie najczęściej rozwijane i użytkowane są reaktory strumieniowe [9].

2.1. Węgiel

Technologie zgazowania węgla funkcjonują od początków XIX w. Popularność tego surowca jako wsadu do zgazowania jest duża ze względu na stabilność dostaw, stosunkowo stabilne parametry jakościowe i niską cenę. Węgiel komercyjnie zgazowuje się zarówno w gazyfikatorach ze złożem stałym (Lurgi [10] i British Gas Lurgi [11, 12]), jak i w fluidalnych (Great Point Energy [13], Winkler [14], TRIG [15]) oraz dyspersyjnych (GE Energy [16], Texo, Koppers-Tozek, Shell [1]).

W przeszłości gaz syntezowy otrzymywany z węgla był wykorzystywany do różnych celów. Podczas II wojny światowej dominowało przetwarzanie na paliwa transportowe w procesie syntezy Fischer-Tropsch [17], 60–70 lat temu znacząca jego ilość była przetwarzana na wodór do produkcji amoniaku [18], a od około 25 lat zaczęto go intensywnie wykorzystywać w elektrowniach zawodowych z wykorzystaniem technologii opartych na bloku gazowo-parowym ze zintegrowanym zgazowaniem paliwa (IGCC, ang. *Integrated Gasification Combined Cycle*) [19].



Rys. 2. Ogólny schemat generatorów gazu syntezowego (opracowanie własne na podstawie [3, 9, 10])

Tabela 1

Porównanie podstawowych typów reaktorów zgazowania **[6]**

Parametr	**Reaktor ze złożem stałym**	**Reaktor fluidalny**	**Reaktor strumieniowy**
Rozmiar cząstek [mm]	<51	<6	<0,15
Temperatura gazu na wyjściu [°C]	450–600	800–1000	>1260
Temperatura w strefie reakcji [°C]	1090	800–1000	1990
Zapotrzebowanie na czynnik utleniający	niskie	umiarkowane	wysokie
Charakterystyka popiołu	suchy/żużel	suchy	żużel
Wielkość	małe	średnie	duże
Problemy eksploatacyjne	smoły blokujące urządzenia i rurociągi	niski stopień konwersji węgla	chłodzenie surowego gazu
Moc zainstalowana [GW]	18,7 (42%)	0,9 (2%)	25,4 (56%)

2.2. Współzgazowanie z biomasą

Poziom emisji gazów cieplarnianych stał się jednym z wyznaczników stosowalności rozwiązań technologicznych zarówno pod względem ekologicznym, jak i ekonomicznym. Z tego powodu współcześnie rozwijane są głównie technologie zgazowania, które umożliwiają wykorzystanie biomasy, ewentualnie odpadów nienadających się do dalszego przetworzenia. Co do zasady proces zgazowania takich materiałów przebiega w sposób analogiczny jak węgla, jednak różnice w ich budowie i ich niejednorodność stanowią duże wyzwanie techniczne. Oznacza to konieczność modyfikacji konstrukcji reaktorów [20], aby zwiększyć ich elastyczność odnośnie pracy z cząstkami o większym zróżnicowaniu rozmiaru i kształtu, wilgotności, wartości opałowej i zawartości w składzie pierwiastków węgla, wodoru, tlenu, siarki i azotu, a także popiołu i pierwiastków śladowych (które mogą jednak istotnie wpływać na przebieg procesu i jakość otrzymanych produktów) [21]. Biorąc pod uwagę cechy poszczególnych typów reaktorów, do zgazowania biomasy często stosowany jest reaktor fluidalny (HoSt [22], ANDRITZ AG [23], Valmet Corporation [24], Eqtec [25]), ale i w tym przypadku stosowane mogą być inne reaktory: ze złożem stałym (Shangqiu Haiqi Machinery Equipment [26], Chanderpur Works [27], Infinite Energy [28]), dyspersyjny (Siemens AG [29]). Mimo wielu technicznych i logistycznych problemów [30], które niejednokrotnie kończyły się zaprzestaniem eksploatacji zakładów zgazowania biomasy, nadal widoczne jest duże zainteresowanie tymi technologiami [12]. Jest to związane z wyższą efektywnością egzergetyczną zgazowania w porównaniu z procesem spalania [31].

Zmniejszenie ilości problemów eksploatacyjnych typowych dla zgazowania biomasy można osiągnąć poprzez współzgazowanie z węglem [32]. Dostosowanie technologii do zgazowania tych paliw w różnych proporcjach masowych, znacznie ułatwia zarządzanie ciągłością produkcji energii. Poprawia się także efektywność procesu poprzez zapewnienie odpowiednio wysokiej wartości opałowej wsadu.

3. CHEMIZM PROCESU ZGAZOWANIA

Z chemicznego punktu widzenia podczas procesu zgazowania ma miejsce szereg reakcji redoks. W zależności od temperatury procesu, węgiel w formie czy to wstępnie rozłożonych związków organicznych, czy też w formie rodników ulega utlenieniu przez tzw. czynnik zgazowujący. Czynnikami zgazowującymi mogą być tlen, wodór, para wodna lub nawet dwutlenek węgla. W zależności od zastosowanego czynnika zgazowującego reakcje chemiczne w trakcie zgazowania można zapisać następująco:

– Zgazowanie z użyciem tlenu:

  $2C + O_2 \rightarrow 2CO \qquad \Delta H = -246$ KJ/mol

  Tlen jako czynnik zgazowujący może być w formie powietrza, jednak z uwagi na powstawanie w wysokiej temperaturze tlenków azotu, do zgazowania lepiej jest użyć czystego tlenu. Reakcja jest egzotermiczna i ze zwiększeniem objętości, a więc przesunięcie równowagi w stronę produktów uzyskuje się w wyniku chłodzenia i zmniejszenia ciśnienia, czyli odbieranie ciepła i usuwanie powstającego CO.

– Zgazowanie z użyciem wodoru:

  $C + 2H_2 \rightarrow CH_4 \qquad \Delta H = -75$ KJ/mol

  Tu reakcja jest również egzotermiczna, ale przebiega ze zmniejszeniem objętości, a więc dla przyśpieszenia procesu należy odbierać ciepło i podnieść ciśnienie.

– Zgazowanie z użyciem pary wodnej:

  $C + H_2O \rightarrow CO + H_2 \qquad \Delta H = +119$ KJ/mol

  Reakcja jest endotermiczna i przebiega ze zwiększeniem objętości.

– Zgazowanie z użyciem dwutlenku węgla:

  $C + CO_2 \rightarrow 2CO \qquad \Delta H = +172$ KJ/mol

  Reakcja również jest endotermiczna i przebiega ze zwiększeniem objętości.

Oprócz reakcji węgla z czynnikami zgazowującymi w procesie zgazowania, zachodzi szereg reakcji produktów zgazowania. Oto niektóre z nich:

$$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O \quad \Delta H = -206 \text{ KJ/mol}$$

$$CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2 \quad \Delta H = -41 \text{ KJ/mol}$$

$$2CO + O_2 \rightarrow 2CO_2 \quad \Delta H = -676 \text{ KJ/mol}$$

$$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O \quad \Delta H = +119 \text{ KJ/mol}$$

$$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2 \quad \Delta H = +206 \text{ KJ/mol}$$

W rzeczywistym procesie zgazowania zachodzi nie jedna reakcja, ale kilka naraz, dlatego sterowanie tymi procesami wymaga dużego nakładu pracy. Realizuje się poprzez kontrolowanie ciśnienia (dostarczanie lub odbieranie reagentów) oraz kontrolę temperatury.

Ponadto jeżeli proces jest prowadzony w bardzo wysokich temperaturach, to w reakcjach mogą uczestniczyć reagenty w formie rodnikowej, gdzie następuje np. rozpad cząsteczek O_2 do tlenu rodnikowego O*, rozpad cząsteczek H_2O do rodnika O* i cząsteczki wodoru H_2 lub wprost do dwu rodników wodorowych 2H*. Rodniki te są bardzo reaktywne i łatwo wchodzą w reakcje zarówno z węglem, jak i innymi związkami obecnymi w mieszaninie zgazowującej.

Zastosowanie dwutlenku węgla jako czynnika zgazowującego może być bardzo atrakcyjnym sposobem na jego zagospodarowanie – produktem takiego procesu jest gazowy tlenek węgla (CO) stanowiący nośnik energii. Najbardziej perspektywicznym wariantem zgazowania jest wykorzystanie pary wodnej jako czynnika zagazowującego – produktem jest nie tylko palny tlenek węgla, ale i gazowy wodór, który po separacji stanowi pożądany nośnik energii. Zyskuje on coraz większą popularność ze względu na możliwość jego wykorzystania zarówno w klasycznych silnikach spalinowych, turbinach gazowych, jak i ogniwach paliwowych.

4. METODY OBLICZENIOWE PROCESÓW ZGAZOWANIA

Od dokładności wyników modelowania procesów zgazowania zależy ocena efektywności technicznej, ekonomicznej i ekologicznej, która jest podstawą do podjęcia decyzji o zasadności realizacji przedsięwzięcia mogącego zwiększyć efektywność wykorzystania paliw stałych. W wyniku modelowania wyznaczane są parametry procesu: ilość poszczególnych mediów, skład gazu wynikowego [33]. Modelowanie pozwala ponadto zbadać wpływ składu materiału wsadowego, rodzaju czynnika zgazowującego, a także parametrów procesu zgazowania na otrzymane wyniki [31]. Obliczenia procesu zgazowania są pracochłonne, dlatego realizowane niemal wyłącznie programowo. Ich dalszy rozwój w zakresie dokładności wyników jest wspierany przez tzw. *machine learnig* i wykorzystanie sieci neuronowych [34].

4.1. Inżynierskie metody

Konwersja paliwa stałego w procesie zgazowania może być modelowana wyłącznie z zastosowaniem podejścia równowagowego albo tylko podejścia kinetycznego, a także z wykorzystaniem ich obu jednocześnie [35]. Korzystanie z inżynierskich metod obliczeniowych związane jest z koniecznością poczynienia wielu założeń zależnych od wybranej metody. Są one związane z rozkładem temperatur w reaktorze, wymianą ciepła z otoczeniem, szybkością przebiegu poszczególnych reakcji, nieuwzględnianiem powstawania smół, zastąpieniem paliwa węglowego czystym węglem (grafitem), pominięciem wpływu na proces obecnego w surowcu popiołu. Mimo to praktyka pokazała, że stosowanie tych metod prowadzi do wystarczającego dla potrzeb inżynierskich przybliżenia [33].

Modele równowagowe należą do najstarszych, są dobrze udokumentowane i były wielokrotnie stosowane. Wyniki otrzymywane z tych modeli cechuje wysoka zgodność zwłaszcza w analizach zgazowania przebiegającego w wysokich temperaturach (>850° C). Wang i in. wykazali, że są one bardzo przydatne zwłaszcza w modelowaniu instalacji IGCC [36]. W jednym z modelowanych przypadków otrzymali zgodność wyników modelowania składu syngazu z wynikami eksperymentu na poziomie powyżej 99% (błąd względny poniżej 1%). Opierając się na tym modelu, zademonstrowali sposób na maksymalizację CGE (ang. *cold gas efficiency*) przez optymalizację temperatury gazyfikacji, ilości dostarczanego tlenu i pary. Uzyskana poprawa CGE wyniosła 10% [37].

Modele kinetyczne pozwalają uzyskać więcej informacji o mechanizmach zgazowania przydatnych do projektowania i rozwoju procesu, ale wymagają większych nakładów obliczeniowych i częściowo oparte są na złożonych empirycznych równaniach kinetycznych [3]. Współcześnie wygodną metodą modelowania jest wykorzystanie oprogramowania Aspen Plus [38–41], w którym nie ma potrzeby określania wielu chemicznych reakcji zachodzących w trakcie zgazowania, ale należy utworzyć schemat blokowy procesu, zdefiniować związki chemiczne, które mogą być w nim obecne, i określić warunki przebiegu procesu (przepływu, temperatury, ciśnienia).

4.2. Modelowanie CFD procesu konwersji paliw stałych

W gazyfikatorze zachodzi szereg wielokierunkowych przemian między substratami i czynnikiem zgazowującym, w których udział mogą brać również produkty zgazowania. Na efekt końcowy procesu znaczący wpływ poza parametrami procesu ma kształt

i wymiary reaktora, które determinują czas i warunki, w jakich przebywają reagenty. Z tego względu inżynierskie metody, które sprawdziły się w zakresie bilansowania masy i energii procesu zgazowania, nie są wystarczające do doskonalenia konstrukcji reaktorów i minimalizacji emisji niepożądanych związków [42]. Poczyniony w ostatnich latach znaczący postęp w zakresie technik modelowania numerycznego i wydajności maszyn obliczeniowych pozwala na modelowanie zachowania się surowców i produktów w modelu przestrzennym reaktora [43, 44]. W modelu można uwzględnić dynamikę płynów, rozmiar i strukturę cząstek surowca, kinetykę reakcji chemicznych, wymianę masy i energii pomiędzy fazą stałą i gazową [45]. W tym zakresie nadal rozwijane są sposoby modelowania, które mają na celu skrócenie czasu obliczeń przy zachowaniu lub poprawie zgodności wyników. Przykładowo Mularski i Modliński wykazali znaczący wpływ przyjętych stałych szybkości reakcji na skład gazu w reaktorze oraz zaproponowali nową procedurę optymalizacji danych wejściowych [46]. Rezultatem modelowania CFD są m.in. rozkłady prędkości, temperatur nieprzereagowanego surowca oraz produktów zgazowania. Dane te pozwalają zaprojektować konkretne rozwiązania reaktorów.

5. STRATEGIE W ZAKRESIE ZGAZOWANIA WĘGLA

Energetyka jest kluczowym elementem gospodarki, gdyż od niej w dużej mierze zależy jej konkurencyjność. Z tego względu jest obecna w politykach i strategiach państw z całego świata, a te z kolei w dużym stopniu determinują możliwość i opłacalność przedsięwzięć w konkretne technologie. Zgazowanie jako możliwość konwersji surowców na użyteczne produkty (w tym paliwa i energię) jest uwzględnione w strategiach wszystkich rozwiniętych państw. Wybrane informacje, prezentujące polityczne nastawienie i odzwierciedlające stan wiedzy, przedstawione zostały w kolejnych podrozdziałach.

5.1. Unia Europejska

Europejski Zielony Ład wraz z Fit for 55 zakłada osiągnięcie redukcji emisji gazów cieplarnianych Unii Europejskiej o co najmniej 55% do 2030 roku w porównaniu z rokiem 1990. Pomocą w realizacji tego celu ma być zwiększone wykorzystanie wodoru. W strategii rozwoju produkcji wodoru wymieniane jest pozyskiwanie wodoru z paliw kopalnych z wychwytem dwutlenku węgla. Według szacunków UE, aby mógł on konkurować z wodorem z paliw kopalnych bez wychwytywania CO_2, niezbędne byłyby ceny emisji dwutlenku węgla w zakresie 55–90 euro za tonę. Poziom ten osiągnięty został już w połowie 2021 roku, a w czasie pisania tego artykułu cena przekraczała jego górną granicę.

5.2. Polska

W dokumencie rządowym „Polityka Energetyczna Polski do roku 2040” zapisano, że światowe efekty prac w ramach działalności badawczo-rozwojowej (B+R) wskazują na istnienie potencjału do niskoemisyjnego lub zeroemisyjnego wykorzystania węgla. W praktyce ma to pozwolić na częściowe dalsze korzystanie z jednostek wytwórczych węglowych. Z tego względu w polityce rekomendowane jest poszukiwanie, badanie i wdrażanie nowych metod wykorzystania i przetwarzania węgla tj. zgazowania, oksyspalania i innych czystych technologii węglowych.

Obecnie dyskutowana jest opłacalność technologii bloku gazowo-parowego ze zintegrowanym zgazowaniem paliwa IGCC w LW Bogdanka z wykorzystaniem technologii Mitsubishi Hitachi Power Systems o mocy 500 MW_e [47].

5.3. USA

Biuro ds. Paliw Kopalnych Departamentu Energii Stanów Zjednoczonych wspiera rozwój modułowych technologii zgazowania różnego typu i jakości węgla, a także mieszanek węgla z biomasą i innymi odpadami, nastawionymi na produkcję czystego gazu syntezowego nadającego się do produkcji energii elektrycznej, chemikaliów, wodoru, paliw transportowych i innych produktów w zależności od zapotrzebowania rynku wewnętrznego. W 2021 roku Departament Energii Stanów Zjednoczonych (DOE) wybrał cztery projekty, którym przyznał wsparcie w kwocie 2 milionów dolarów na prace badawczo-rozwojowe (B+R) umożliwiające dopracowanie technologii zgazowanie mieszanek węgla z biomasą i odpadami tworzyw sztucznych. Zgodnie z założeniami technologie te nastawione są na produkcję wodoru przy zapewnieniu ujemnego bilansu emisji dwutlenku węgla.

5.4. Japonia

W strategii japońskiej Agencji Energii i Zasobów Naturalnych z lipca 2018 roku („The 5th Strategic Energy Plan") zapisano m.in., że w celu dalszej redukcji emisji gazów cieplarnianych promowany będzie rozwój i praktyczne zastosowania nowej generacji wysokoefektywnych technologii produkcji energii z węgla, takich jak technologia bloku gazowo-parowego ze zintegrowanym zgazowaniem paliwa (IGCC), a także technologie wykorzystujące ogniwa paliwowe ze zintegrowanym zgazowaniem paliwa (IGFC). W efekcie w 2021 roku w Iwaki została uruchomiona największa na świecie instalacja IGCC o mocy 525 MW_e, charakteryzująca się sprawnością na poziomie 48%.

5.5. Australia

Zasobna w pokłady węgla Australia w opublikowanej strategii „First Low Emissions Technology Statement – 2020" wskazuje zgazowanie węgla połączone z sekwestracją dwutlenku węgla jako jedną z najtańszych metod produkcji czystego wodoru w perspektywie krótkoterminowej. Z tego względu rząd Australii ma przeznaczyć 50 milionów dolarów na projekty badawczo-rozwojowe (B+R), których celem jest doprowadzenie do komercjalizacji.

6. PODSUMOWANIE

Dyskusja nad celowością i efektywnością zgazowania węgla w dobie dekarbonizacji, dążenia do neutralności klimatycznej i wdrażania coraz to nowych i bardziej rygorystycznych regulacji UE w zakresie ochrony klimatu ma istotne znaczenie. Wymaga jednak opracowania i wdrożenia nadążających za tymi regulacjami zaawansowanych i wyspecjalizowanych technologii zapewniających wysokoefektywną produkcję paliw dla niskoemisyjnego wytwarzania energii.

Węgiel ma duży potencjał do innych zastosowań energochemicznych, których podstawą będą procesy jego konwersji: zgazowanie czy też uwodornienie. Środowisko naukowe stoi przed szeregiem wyzwań, których urealnienie stworzy możliwość opracowania efektywnych, przyjaznych zmianom klimatu technologii XXI wieku w zakresie pozyskiwania energii i surowców z pokładów węgla. Za zgazowaniem węgla przemawia wiele argumentów, m.in.:

- poprawa efektywności niskoemisyjnego wytwarzania energii elektrycznej z węgla kamiennego z dążeniem do wysokosprawnych zeroemisyjnych bloków węglowych zintegrowanych z wychwytem CO_2 ze spalin,
- zwiększenie niezależności surowcowej w przemyśle petrochemicznym,
- ułatwienie procesu zgazowania biomasy (współzgazowanie).

Przegląd technologii zgazowania paliw stałych wykazał, że dostępne są rozwinięte technologie, które można zastosować do wielu surowców energetycznych. Na właściwości fizykochemiczne otrzymanych produktów znaczący wpływ poza parametrami surowców ma typ reaktora. Determinuje on możliwe do realizacji warunki prowadzenia procesu oraz sposób, w jaki należy przygotować surowiec. Dobór odpowiedniego rozwiązania mocno zależy od zamierzonego sposobu dalszego wykorzystania produktów i możliwości zagospodarowania odpadów, w tym ciepła odpadowego. Właściwe skorelowanie technologii zgazowania z technologią energetycznego wykorzystania produktów jest konieczne z punktu widzenia maksymalizacji całkowitej efektywności energetycznej i przyczynia się do ograniczenia emisji dwutlenku węgla oraz zanieczyszczeń: smół, pyłów, amoniaku, siarkowodoru, chlorowodoru i in. [48]. Do tego celu można posłużyć się dostępnymi metodami modelowania, które wielokrotnie wykazały dużą zgodność z wynikami eksperymentów. Optymalizacja samej konstrukcji wybranego reaktora zgazowania jest możliwa dzięki ciągle rozwijanym, ale już pozwalającym na osiągnięcie wiarygodnych (zweryfikowanych i zwalidowanych) wyników metodom modelowania numerycznego z zastosowaniem Komputerowej Mechaniki Płynów CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

Podziękowania

Badania prowadzące do uzyskania tych wyników otrzymały częściowe dofinansowanie z Funduszy Norweskich 2014–2021 za pośrednictwem Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Artykuł powstał w ramach projektu: „Elektrownia gazowa o ujemnej emisji CO_2" – NOR/POLNORCCS/NEGATIVE-CO2-PP/0009/2019-00 współfinansowanego z programu

„Badania stosowane" w ramach Norweskich Mechanizmów Finansowania 2014–2021 POLNOR CCS 2019 – Rozwój zintegrowanych rozwiązań wychwytywania CO_2 w procesach energetycznych i przemysłowych.

Literatura

[1] Mishra A., Gautam S., Sharma T.: *Effect of operating parameters on coal gasification.* International Journal of Coal Science & Technology 2018, 5, 2: 113–125.

[2] Abdoulmoumine N., Adhikari S., Kulkarni A., Chattanathan S.: *A review on biomass gasification syngas cleanup.* Applied Energy 2015, 155: 294–307.

[3] Tennison I. et al.: *Health care's response to climate change: a carbon footprint assessment of the NHS in England.* The Lancet Planetary Health 2021, 5: 84–92.

[4] Balmes J.R.: *Household air pollution from domestic combustion of solid fuels and health*. Journal of Allergy and Clinical Immunology 2019, 143, 6: 1979–1987.

[5] Kwaśniewski K., Kopacz M., Grzesiak P., Kapłan R., Sobczyk E.J.: *Zgazowanie węgla: uwarunkowania, efektywność i perspektywy rozwoju.* Wydawnictwa AGH, Kraków 2015.

[6] Klimiuk E., Pawłowska M., Pokój T.: *Biopaliwa: Technologie dla zrównoważonego rozwoju*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.

[7] You S., Ok Y.S., Tsang D.C. W., Kwon E.E., Wang C.-H.: *Towards practical application of gasification: a critical review from syngas and biochar perspectives*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology 2018, 48, 22–24: 1165–1213.

[8] Svoboda K., Pohořelý M., Hartman M., Martinec J.: *Pretreatment and feeding of biomass for pressurized entrained flow gasification.* Fuel Processing Technology 2009, 90, 5: 629–635.

[9] Chmielniak T., Ściążko M.: *Development state and analysis of available gasification technologies used for solid fuels and wastes*. W: *Development of coal, biomass and wastes gasification technologies with particular interest in chemical sequestration of CO_2: a monograph*, red. A. Strugała. AKNET, Kraków 2012, 200–208.

[10] *Lurgi FBDB^{TM} – Fixed Bed Dry Bottom Gasification*. Air Liquide, https://www.engineering-airliquide.com/lurgi-fbdb-fixed-bed-dry-bottom-gasification [15.02.2022].

[11] *Clean Energy and Clean Air in one word: ENVIROTHERM*, 2012. https://enviro.su//assets/uploads/2018/10/Brochure_Envirotherm_Technologies.pdf [15.02.2022].

[12] Jafri Y., Waldheim L., Lundgren J.: *Emerging Gasification Technologies for Waste & Biomass.* IEA Bioenergy, 2020

[13] Swanson M., Henderson A.: *Fluid-Bed Testing of Greatpoint Energy's Direct Oxygen Injection Catalytic Gasification Process for Synthetic Natural Gas and Hydrogen Coproduction. Year 6 – Activity 1.14 – Development of a National Center for Hydrogen Technology.* Grand Forks, Energy & Environmental Research Center, University of Dakota, USA 2012.

[14] Toporov D., Abraham R.: *Gasification of low-rank coal in the High-Temperature Winkler (HTW) process*. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 2015, 115, 7.

[15] Guan X.: *Particulate control devices in Kemper County IGCC Project*. Energy Reports 2019, 5: 969–978.

[16] *Lihuayi Again Selects GE's Gasification Technology to Boost Refinery Hydrogen Producti*on. GE News, https://www.ge.com/news/press-releases/lihuayi-again-selects-ges-gasification-technology-boost-refinery-hydrogen-production [15.02.2022].

[17] Andrews A., Logan J.: *Fischer-Tropsch Fuels from Coal, Natural Gas, and Biomass: Background and Policy*. CRS Report for Congress 2008, USA.

[18] Breault R.W.: *Gasification processes old and new: A basic review of the major technologies*. Energies 2010, 3, 2: 216–240.

[19] Phillips J.N., Booras G.S., Marasigan J.: *The history of integrated gasification combined-cycle power plants*. Proceedings of the ASME Turbo Expo 2017.

[20] Thomson R., Kwong P., Ahmad E., Nigam K.D.P.: *Clean syngas from small commercial biomass gasifiers; a review of gasifier development, recent advances and performance evaluation*. International Journal of Hydrogen Energy 2020, 45, 41: 21087–21111.

[21] Dahou T., Defoort F., Khiari B., Labaki M., Dupont C., Jeguirim M.: *Role of inorganics on the biomass char gasification reactivity: A review involving reaction mechanisms and kinetics models*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2021, 135.

[22] *Fluidized Bed Gasifier Plants. Biowaste Gasification.* HoSt Bioenergy, https://www.host.nl/en/biomass-gasification [15.02.2022].

[23] *ANDRITZ Carbona Bubbling Fluidized Bed (BFB) gasifier*. https://www.andritz.com/products-en/group/pulp-and-paper/power-generation/gasification/bfb-gasifiers [15.02.2022].

[24] *Valmet Gasifier for biomass and waste*. https://www.valmet.com/energyproduction/gasification/ [15.02.2022].

[25] *Patented Gasification Technology.* EQTEC Technology, https://eqtec.com/patented-gasification-technology/ [31.01.2022].

[26] *Henan Haiqi Environmental Protection Technology Co., Ltd-biomass burner, pellet burner, sawdust burner, biomass gasifier, waste pyrolysis gasification*. http://www.haiqi-machine.com/ [15.02.2022].

[27] *Downdraft Biomass Gasifiers and Updraft Biomass Gasifiers*. https://www.chanderpur.com/biomass-gasifier.php [15.02.2022].

[28] *Biomass Gasifiers, Gasifiers Pellets Supplier, Biomass Uses, Bio Fuel*. http://www.infiniteenergyindia.com/biomass-gasifiers.html [15.02.2022].

[29] *Gasification Technology Center*. TU Bergakademie Freiberg, https://tu-freiberg.de/en/iec/evt/networking/gasification-technology-center [15.02.2022].

[30] Asadullah M.: *Barriers of commercial power generation using biomass gasification gas: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2014, 29: 201–215.

[31] Ptasinski K.J.: *Efficiency of Biomass Energy: An Exergy Approach to Biofuels, Power, and Biorefineries*. John Wiley & Sons, New Jersey 2016.

[32] Howaniec N.: *Wybrane aspekty współzgazowania węgla i biomasy parą wodną*. Karbo 2015, 4: 139–144.

[33] Kozaczka J.: *Procesy zgazowania: inżynierskie metody obliczeń*. Wydawnictwa AGH, Kraków 1994.

[34] An H., Fang X., Liu Z., Li Y.: *Research on a soft-measurement model of gasification temperature based on recurrent neural network*. Clean Energy 2022, 6, 1: 861–868.

[35] Safarian S., Unnţórsson R., Richter C.: *A review of biomass gasification modelling*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2019, 110: 378–391.

[36] Wang Y., Wang J., Luo X., Guo S., Lv J., Gao Q.: *Dynamic modelling and simulation of IGCC process with Texaco gasifier using different coal*. Systems Science & Control Engineering An Open Access Journal, January 2015, 3, 1: 198–210.

[37] Wang M, Liu G., Hui C.W.: *Optimization of IGCC gasification unit based on the novel simplified equilibrium model*. Clean Technologies and Environmental Policy 2018, 20, 2: 259–269.

[38] Ptasinski K.J., Hamelinck C., Kerkhof P.J.A.M.: *Exergy analysis of methanol from the sewage sludge process.* Energy Conversion and Management 2002, 43, 9–12: 1445–1457.

[39] Cruz P.L., Navas-Anguita Z., Iribarren D., Dufour J.: *Exergy analysis of hydrogen production via biogas dry reforming*. International Journal of Hydrogen Energy 2018, 43, 26: 11688–11695.

[40] Migliaccio R.: *Sewage Sludge Gasification in a Fluidized Bed: Experimental Investigation and Modeling*. Industrial & Engineering Chemistry Research 2021, 60, 13: 5034–5047.

[41] Jia J., Zang G., Paul M.C.: *Energy, exergy, and economic (3E) evaluation of a CCHP system with biomass gasifier, solid oxide fuel cells, micro-gas turbine, and absorption chiller*. International Journal of Energy Research 2021, 45, 10: 15182–15199.

[42] Singh R.I., Brink A., Hupa M.: *CFD modeling to study fluidized bed combustion and gasification*. Applied Thermal Engineering. 2013, 52: 585–614.

[43] Mularski J., Pawlak-Kruczek H., Modlinski N.: *A review of recent studies of the CFD modelling of coal gasification in entrained flow gasifiers, covering devolatilization, gas-phase reactions, surface reactions, models and kinetics*. Fuel 2020, 271.

[44] Madejski P.: *Numerical study of a large-scale pulverized coal-fired boiler operation using CFD modeling based on the probability density function method*. Applied Thermal Engineering 2018, 145: 352–363.

[45] Hasse C., Debiagi P., Wen X., Hildebrandt K., Vascellari M., Faravelli T.: *Advanced modeling approaches for CFD simulations of coal combustion and gasification*. Progress in Energy and Combustion Science 2021, 86: 100938.

[46] Mularski J., Modliński, N.: *Entrained-Flow Coal Gasification Process Simulation with the Emphasis on Empirical Char Conversion Models Optimization Procedure*. Energies 2021, 14, 6: 1729.

[47] Stabilny rozwój w niełatwym otoczeniu – raport zintegrowany 2019, Grupa Kapitałowa Lubelski Węgiel Bogdanka 2020.

[48] Acharya B.: *Cleaning of Product Gas of Gasification*. Biomass Gasification, Pyrolysis and Torrefaction: Practical Design and Theory 2018: 373–391.

dr hab. inż. PAWEŁ MADEJSKI, prof. AGH
dr inż. SŁAWOMIR RÓŻYCKI
dr hab. inż. MARIAN BANAŚ, prof. AGH
dr hab. inż. TADEUSZ PAJĄK, prof. AGH
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
{madejski, srozycki, mbanas, pajak}@agh.edu.pl

© 2021 Autorzy. Jest to publikacja ogólnodostępna, którą można wykorzystywać, rozpowszechniać i kopiować w dowolnej formie zgodnie z licencją Creative Commons CC-BY 4.0.