

Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce

Nauki techniczne i inżynieryjne

Część I



www.mlodzinaukowcy.com

Poznań 2019

Redakcja naukowa

dr inż. Jędrzej Nyćkowiak, UPP

dr hab. Jacek Leśny prof. UPP

Wydawca

Młodzi Naukowcy

www.mlodzinaukowcy.com

wydawnictwo@mlodzinaukowcy.com

ISBN (całość 978-83-66139-18-3)

ISBN (wydanie online 978-83-66392-05-2)

ISBN (wydanie drukowane 978-83-66392-06-9)

Ilość znaków w książce: 377 tys.

Ilość arkuszy wydawniczych: 9.4

Data wydania: kwiecień 2019

Niniejsza pozycja jest monografią naukową. Jej rozdziały zostały wydrukowane zgodnie z przesłanymi tekstami po ich zaakceptowaniu przez recenzentów. Odpowiedzialność za zgodne z prawem wykorzystanie użytych materiałów ponoszą autorzy poszczególnych rozdziałów.

Spis treści

1. Laccases of microscopic fungi origin–characteristic and cultivation conditions in liquid media	7
<i>Dominika Brychcy, Anna Pakos, Halina Maniak</i>	
2. The cultivation conditions of white-rot fungi representatives for laccase production in solid-state fermentation – a mini review	13
<i>Dominika Brychcy, Halina Maniak</i>	
3. Wpływ geometrii otworu eliptycznego na rozkład naprężeń w płycie przy jednoosiowym obciążeniu	18
<i>Mateusz Marcin Konieczny</i>	
4. Przykłady badań numerycznych wpływu nieciągłości geometrycznych na rozkład naprężeń w płycie przy różnych warunkach obciążenia	27
<i>Mateusz Marcin Konieczny</i>	
5. Odporność wielowirnikowych statków powietrznych na wyładowania atmosferyczne	36
<i>Kossowski Tomasz</i>	
6. Odnowa sieci wodociągowych i kanalizacyjnych w technologii krakingu statycznego	43
<i>Jakub Kozicki</i>	
7. Rehabilitacja kanałów sanitarnych krótkimi modułami rurowymi	49
<i>Jakub Kozicki</i>	
8. Wysoka jakość środowiska mieszkaniowego na przykładzie cohousing	55
<i>Łukasz Kamil Mazur</i>	
9. Analiza strat instalacji fotowoltaicznej na podstawie badań symulacyjnych	61
<i>Parfianowicz Kamil</i>	
10. Wpływ temperatury na parametry pracy paneli fotowoltaicznych	68
<i>Parfianowicz Kamil</i>	
11. Wpływ światła i pH na wzrost i rozwój <i>Chlorella vulgaris</i>	77
<i>Ratomski Patryk, Hawrot-Paw Małgorzata</i>	
12. Metody zagęszczania i odwadniania biomasy mikroglonów - przegląd	86
<i>Ratomski Patryk, Hawrot-Paw Małgorzata</i>	
13. Hydrauliczne układy smarowania w dzielarkach do ciasta	94
<i>Towarnicki Krzysztof</i>	
14. Hydrauliczne układy wspomagające w miesiarko – ubijarkach do ciasta	103
<i>Towarnicki Krzysztof</i>	
15. Minerality miedzionośne – występowanie i charakterystyka	113
<i>Irmina Wojciechowska, Kinga Filipowiak, Przemysław Aksamitowski, Karolina Wieszczycka</i>	

Przedmowa

Szanowni Państwo, wydawnictwo „Młodzi Naukowcy” oddaje do rąk czytelnika kolekcję monografii. Znajdują się tutaj pozycje dotyczące nauk przyrodniczych, nauk medycznych i nauk o zdrowiu, nauk technicznych i inżynierskich oraz szeroko pojętych nauk humanistycznych i społecznych.

W prezentowanych monografiach poruszany jest szeroki przekrój zagadnień, jednak każda z osobna składa się z kilkunastu rozdziałów, spójnych tematycznie, dających jednocześnie bardzo dobry przegląd tematyki naukowej jaką zajmują się studenci studiów doktoranckich lub ich najmłodszy absolwenci, którzy uzyskali już stopień doktora.

Czytelnikom życzymy wielu przemyśleń związanych z tematyką zaprezentowanych prac. Uważamy, że doktoranci i młodzi badacze z pasją i bardzo profesjonalnie podchodzą do swojej pracy, a doświadczenie jakie nabierają publikując prace w monografiach wydawnictwa „Młodzi Naukowcy”, pozwoli im udoskonalać swój warsztat pracy. Dzięki temu, z pewnością wielu autorów niniejszych prac, z czasem zacznie publikować prace naukowe w prestiżowych czasopismach. Przyczyni się to zarówno do rozwoju nauki, jak i każdego autora, budując jego potencjał naukowy i osobisty.

Redakcja

1. Laccases of microscopic fungi origin—characteristic and cultivation conditions in liquid media

Dominika Brychcy, Anna Pakos, Halina Maniak

Department of Bioprocess and Biomedical Engineering, Faculty of Chemistry, Wrocław University of Science and Technology

Dominika Brychcy: 217354@student.pwr.edu.pl

Keywords: molds, medium composition, inducing factors, copper-dependent polyphenol oxidase.

Abstract

Microscopic fungi are organisms commonly found in the natural environment as well as in this related to human activity. Their biological role is the decomposition of organic matter by using the biochemical apparatus of the catalytic protein. Effective production of industrially important enzymes by various microorganisms is now widely studied. The presented work includes the characteristics of three species of molds being phytopathogens. *Botrytis cinerea*, *Sclerotinia sclerotiorum*, and *Rhizoctonia praticola* cause serious plant diseases that bring significant losses in the area of agriculture, and horticulture. All these species are capable of producing laccase, an enzyme of great industrial importance. The cultivation conditions and biochemical characteristics of the produced laccases are crucial and specific to a particular species.

1. Introduction

The microscopic fungi (Micromycetes) are diverse in terms of, their natural physiology and biological role. In nature, they are widely distributed group of microorganism characterized by small size ranging from a few micro- to several millimeters (Senn-Irlet et al. 2013). They are used in many sectors, including medicine, agriculture and the food industry (Błaszczowski et al. 1999). The term of *microscopic fungi* primarily concerns molds that are heterotrophic organisms and feed on living or dead organic matter. Among them, different systematic groups are distinguished, for example, *Penicillium* (*Penicillium chrysogenum*, *P. digitatum*, *P. roquefortii*), *Mucor* (*Mucor brevipes*) or *Aspergillus* (*Aspergillus niger*, *A. flavus*, *A. ruber*). The fungi are aerobic organisms which mycelium develops on the surfaces of various objects. It also happens that growth occurs inside of the substrate, however, it happens much less often. Development on the surface of the substrate, containing the minimum carbon source, is usually short and the mycelium development does not require specific atmospheric conditions. The most important parameters for molds are the temperature, which is in the range of 15 to 30°C and relative humidity, which should be at least 70%. Mycelium is in the form of sheepskin, of different thickness, which can be characterized by various colors, and structure. (Błaszczowski et al. 1999)

Laccase (EC 1.10.3.2) is an enzyme belonging to the polyphenol oxidase group, which catalyzes the oxidation reactions of a wide group of compounds. The stoichiometry of the laccase-catalyzed reaction is as follows: reduction of one oxygen molecule results in the formation of two molecules of water, with simultaneous oxidation of four substrate molecules to four substrate radicals (Polak and Jarosz-Wilkolańska 2007; Shekher et al. 2011).

In the catalytic center of the enzyme there are 4 copper atoms divided into 3 types, which could be detected by UV-VIS or ERP spectroscopy. Type I copper is detectable using ERP, with an absorbance of about 610 nm, gives the protein a characteristic blue color, which is why it is colloquially called “blue oxidase”. The type I of the copper center is involved in the oxidation of the substrate. Type II copper does not give the protein its color, however, it is also detectable with ERP spectroscopy. On the other hand, type III is formed by a pair of copper atoms that are not detected by ERP but absorb to a small extent near UV radiation. Atoms II and III form a three-atom complex, which binds and reduce a molecular the oxygen to water molecules. Among the substrates utilized by

laccase, one can distinguish phenols and amines and non-phenolics substrates (Polak and Jarosz-Wilkołazka 2007).

Laccase is an enzyme that is widespread in the world of fungi and plants, but it is also found in some bacteria and insects. The natural production of laccase is intra- or extracellularly, but most of the described fungal enzymes are classified as the latter kind. The producers of extracellular laccases are mainly bracket fungi causing white rot disease of wood, and some other microscopic fungi, such as *Botrytis cinerea*, *Sclerotinia sclerotiorum*, and *Rhizoctonia praticola*. *Agaricus bisporus* is an example of fungi that produce the enzyme intracellularly. In turn, *Phanerochaete chrysosporium* and *Suillus granules* are representatives that produce laccase in two ways (Kropiwek and Szala 2015). Laccases of fungal origin are exceptional among blue proteins and distinguish from those of a bacterial origin by the occurrence of a sugar fragment in their structure, which acts as a protective element of these peptide chains against the action of proteolytic enzymes. Fungal laccase plays a role in the decomposition of the lignin complex of wood, as well as in the processes of spore formation and melanization (Polak and Jarosz-Wilkołazka 2007; Otto and Schlosser 2014; Liu et al. 2018).

Among the copper-dependent polyphenol oxidases, yellow and blue laccases could be distinguished. Both of them contain four copper atoms in the active center and catalyze the same oxidation reaction, however, the yellow laccase has an untypical spectrum of EPR and does not show a "blue" maximum in the visible absorption spectrum. Studies on the differences between the two enzymes mentioned above are still underway. It was found that "yellow" laccases are produced by *Sclerotinia sclerotiorum*, *Pleurotus ostreatus*, *Panus tigrinus* (Mayer and Staples 2002; Marbach et al. 1984). Due to a wide range of substrates, this enzyme has found a numerous application in various branches of industry, among others in the food, paper, textile, cellulose, cosmetics, medicine, as well as in the sector of water and soilbioremediation (Polak and Jarosz-Wilkołazka 2007; Shekher et al. 2018; Otto and Schlosser 2014; Liu et al. 2018; Slomczynski et al. 1995; Coman et al. 2013)

2. A literature review

2.1 Sclerotinia sclerotiorum(Lib.) de Bary

S. sclerotiorum (white mold) is a pathogen of plants belonging to saprophytes (Ascomycota), in the order of *Heliotales*. It is responsible for serious diseases of many crops, vegetables, fruits, and flowers, causing significant economic losses. In addition, it is a cosmopolitan microorganism found in all latitudes, both in cool, humid and hot and dry climates (Mot et al. 2012). The first reports of the laccase produced by *S. sclerotiorum* come from 1974 (Wong and Willetts 1974). Using the technique of polyacrylamide electrophoresis, it was shown that at various stages of development of this fungus, enzyme activity levels are variable, some are switched on and other ones are switched off. The research was carried out using white mold isolated from green string bean. The stationary and shaken cultures with Czapek-Doxmedium were supplemented with L-asparagine (2 g/L) and thiamine hydrochloride (2 mg/L). Nine catalytic proteins were tested in seven stages of mold development. The enzyme group included: 3-phosphoglyceraldehyde dehydrogenase, succinate dehydrogenase, glucose-6-phosphate dehydrogenase, arylesterase, acid phosphatase, tyrosinase, peroxidase, and laccase. Studies of developmental stages included submerged mycelium, surface mycelium, sclerotia formation, young sclerotia, maturing sclerotia, mature sclerotia, and aging sclerotia. It has been disclosed that the laccase activity throughout the development cycle is in between the moderate and very high range. The latter stage falls on the phase of sclerotia formation (Wong and Willetts 1974).

Laccase from *S. sclerotiorum* was first purified and characterized by Mot and co-workers (Mot et al. 2012). The enzyme production was carried out in liquid culture containing extract of boiled carrots or tomatoes supplemented with sucrose, yeast extract, and mineral salts. The maximum laccase activity was found on day 20 of growth, which was justified by the possible role of laccase in the creation of sclerotia. The protein was isolated and purified using ammonium sulfate precipitation and chromatographic techniques. The results showed that this was not a typical blue oxidoreductase. The spectral properties in the UV-VIS area classify it as the "yellow" laccase, although EPR spectra reveal the properties of the blue protein. It has been determined that protein is monomeric with 74 kDa. It has also been shown that it has an affinity for phenolic and non-phenolic substrates. Kinetic

parameters of K_m (μM) and k_{cat} (min^{-1}) were determined in reactions with 2,6-dimethoxyphenol, ABTS, 4-phenyldiamine, and guaiacol at 30.8, 85.6, 456, 429 μM and 59, 892, 532, 392 min^{-1} , respectively. The optimum pH and temperature were determined at pH 4 and at 70°C, but the thermostability of this enzyme was determined to be moderate at 40 and 50°C (Mot et al. 2012).

Another work presents chemical factors affecting the production of laccase by this mold (Coman et al. 2013). The influence of typical inducers was examined, of which only copper(II) sulfate(VI), isopropanol, and clay improved slightly the production of laccase. It has been determined that the ratio of carbon to nitrogen is crucial for efficient enzyme production. The best sources of carbon are sucrose and glucose. Among the organic and inorganic sources of nitrogen used, yeast extract turned out to be the most effective inducer/regulator of laccase production, while the carbon-to-nitrogen ratio had to be at low level, 3.3 to 1. It was also shown that yeast extract promotes 10-fold enzyme production, which is accompanied by inhibition of mycelium growth and sclerotia formation. Excess carbohydrates and nitrogen compounds reduced the production of active protein. The effect of celandine herb extract (*Chelidonium majus* L.) on laccase production was also tested. The herb is known as an antifungal agent containing significant amounts of alkaloids and polyphenols. At a strictly defined concentration (2%), it acted as a chemical stress factor increasing the laccase production by one order of magnitude, in comparison with the control sample. It is commonly known that the pH of the medium is the regulator of *S. sclerotiorum* virulence, and is considered as the laccase regulator. Based on the conducted research, it was found that the production of laccase is linked with the presence of oxalic acid, which indicates the participation of laccase in the process of plant pathogenesis (Coman et al. 2013).

2.2 *Botrytis cinerea* Pers. Fr. (teleomorph *Botryotinia fuckeliana* (de Bary) Whetzel)

B. cinerea is a neurotrophic fungus belonging to the Sclerotiniaceae family, it is widely distributed in nature around the world. It is the pathogen of plants, which attacks over 200 different species, causing a disease called gray mold, causing enormous economic losses and economic damage. *B. cinerea* can infect different parts of plants that are in different stages of development. Interestingly, this mold is essential in the production of certain types of wines, including Sauternes, Cecube (Williamson et al. 2007).

Marbach and co-workers (Marbach et al. 1984) investigated the various molecular forms of extracellular proteins which production was induced by using grape juice, gallic acid, *p*-coumaric acid. It turned out that the laccase induced by the *p*-coumaric acid reminds this induced by gallic acid under certain biochemical features, but both definitely are not identical. The enzyme that was induced with grape juice had a molecular weight of 38,000 and contained 80% sugar, whereas laccase, which production was excited by the presence of gallic acid, had a molecular weight of 36,000 and contained 70% sugar residues. The qualitative sugar composition of both copper-dependent proteins was similar but different quantitatively. In addition, grapefruit induced laccase showed a richer composition of basic amino acids and a poorer composition of acid types of amino acids compared to laccase enriched with gallic acid. In addition, depending on the inducer used, the difference in isoelectric points of both produced extracellular lacquers was demonstrated. The enzyme induced with grape juice has pI 5, while the second pI 2 (Marbach et al 1984). In another work (Slomczynski et al. 1995), the studies were carried out on the activity of laccase from strain *B. cinerea* isolated from onions. The cultures were grown on a substrate with potato dextrose in the presence or absence of inducers. The spore suspension was induced for 19 days at 24°C on a shaker at 250 rpm. Laccase was purified using ion exchange chromatography and affinity chromatography. The purified laccase showed an optimum at pH 3.5, while the temperature optimum was 60°C. Laccase activity was inhibited by 0.6 mM diethyldithiocarbamate (88%), 0.5 mM EDTA (73%), 0.6 mM sodium azide (29%) and 2.5 mM KCN (100%). In addition, tropolone, a tyrosinase-inhibiting compound containing copper, did not affect the tested laccase at a concentration of up to 5.0 mM (Slomczynski et al. 1995).

In another work (Taha et al. 2013) the production of laccase from *B. cinerea* was compared between two types of inducers. The culture of the fungal spore suspension was carried out for 8 days at ambient temperature on a shaker at 180 rpm. In order to increase production and enzyme activity, the culture was induced using: copper sulfate and gallic acid. The highest laccase activity was

observed in the presence of 0.1% gallic acid. Comparing the laccase activity in the presence of the inducer, it turned out that it is nearly 17-folds higher compared to the control and a reduction in the maximum production time of this enzyme by 3 days was observed. The resulting culture fluid was obtained by precipitation of the enzyme with 90% ammonium sulfate, followed by gel chromatography. Optimal conditions to obtain the highest activity of copper-dependent polyphenol oxidase were observed at low pH values in the range 3.5-4.6, while the optimal temperature was 70°C. The effective source of carbon used for the production of laccase with *B. cinerea* is medium containing 1% of glucose and 1% of malt extract (Taha et al 2013).

2.3 *Rhizoctonia praticola*

Fungi of the genus *Rhizoctonia* (root killer) are phytopathogens that occur in the soil where they infect plants of agronomy and horticulture importance. Literature also includes species isolated from forest trees. This type is characterized by the lack of fruiting bodies and the presence of sclerotia, differing in shape and size, growing in clusters in the form of hard, thick creations, with a heterogeneous internal structure. The cortex of sclerotia is very thin, membranous but durable. Thread-like wool cortex increases to form bundles from tops of sclerotia connecting several of them. *R. praticola* forms a thin, pale, greyish-white, dull mycelium. It is characterized by a higher rate of growth in comparison to other *Rhizoctonia* species (e.g. *R. solani*). In the diagnosis of infection of *Rhizoctonia* sp., the roots of plants being their main habitat are used (Saksena and Vaartaja 1961). *R. praticola* was used in the biotransformation processes of 1-naphthol intermediate of carbaryl (insecticide) decomposition and the product of naphthalene metabolism – environmentally troublesome compounds (Bollag et al. 1976). It was found that post-culture fluid, as it later turned out to contain laccase, showed the ability to transform mono- and di- hydroxyl-substituted naphthalene rings, indicating that it contains extracellular enzyme proteins. In addition, the product of conversion of 1-naphthol to a macromolecular compound (pentamer) was formed as a result of polymerization (Sjoblod and Bollag 1976). This catalytic protein was isolated later from *R. praticola* culture and originally characterized by Bollag et al (Bollag et al. 1979). The fungal cultures were carried out on a modified Czapek-dox liquid medium containing asparagine (2 g), thiamine (0.5 mg), 25.0 mg CaSO₄·2H₂O and trace elements. The culture was grown at 23°C, on a rotary shaker with 140 rpm for 14 days. The post-culture fluid was filtered, the laccase was purified by chromatographic techniques. It was determined that the protein contains copper and has a molecular mass of 78 kDa. The optimum for the purified protein against 2,6-dimethoxyphenol was determined to have a pH between 6.7 and 6.9 and temperature in 40°C.

A detailed study of the optimal conditions for the production of laccase from *R. praticola* was carried out by Janusz et al., 2006. In shaken cultures (with a small scale of 40 ml) optimal conditions for an efficient production of laccase were determined. The studies considered the substrates of the caps Dox (pH 6.8) and Lindeberg-Holm (pH 5.5), the content of glucose and L-asparagine and known inducers of production of this protein, such as copper ions, ferulic acid, veratric acid, *o*- and *p*-anisidine and 2,5-xylydine. The maximum enzyme production falls on day 8 for the Lindeberg-Holm substrate and is achieved faster compared to the Czapek-dox medium, for which the maximum activity was recorded three days later. The ratio of carbon to nitrogen turned out to be crucial in *R. praticola* cultures, C/N = 0.98, which corresponds to the concentration of glucose and L-asparagine 2 and 1.5 g/L, respectively. Increasing the carbon content in the medium significantly inhibits the production of laccase, while increasing the nitrogen content has the opposite effect. 5 µM concentration of copper ions in the medium added before inoculation significantly accelerated and increased 2.5 times the production of laccase. For other organic inducers of laccase production, it was determined that both types of acids inhibit the production of enzyme protein, while anisidine and 2,5-xylydine act as true laccase inducers. The latter at a concentration of 1.0 mM has the best effect on *R. praticola* productivity by increasing 10-fold the enzyme production. At the same time, the shift of maximal catalytic activity from the third to the seventh day of cultivation for the optimal content of C/N and copper ions was observed. The test results also showed that *Rhizoctonia praticola* is an exception among laccase-producing fungi due to the alkalization of the environment to a pH above 7.5. Optimal growth conditions determined for shaking cultures were applied to reactor scale.

Production of laccase with mechanical stirring of 300 rpm and aeration of 1 L/min, was unsatisfied and not reached 25% of productivity in comparison to the shaking culture. By changing the process parameters, it was determined that it is not possible to achieve a maximum production similar to shaking cultures. However, when the mixing and aeration intensity is changed to 200 rpm and 2 L/min respectively, and the substrate pH is kept constant at pH 8, it is possible to achieve half of the maximum production of laccase compared to shaken cultures.

The detailed biochemical characteristics of this laccase were presented by Rogalski and co-workers (Rogalski et al. 2011). They used the mentioned optimal conditions in the bioreactor cultivation. The resulting post-culture fluid was purified by chromatographic techniques and the enzyme of *R. praticola* was found to exist in three isoforms varying in molecularweight 215, 175 and 68 kDa and substrate specificity. The last isoform was probably similar to that characterized by Bollag and co-workers (Bollag et al. 1979). Optimum pH and temperature were similar for all isoforms and set at 7.4 and 60°C respectively.

3. Summary

In the present work, three microfungi producing laccases were described. The *S. sclerotiorum*, *B. cinerea*, and *R. praticola* are known plant pathogens that caused enormous economic losses in agriculture and horticulture sector. These microorganisms are known to exert laccases in different stages of mycelium development. Production of laccase from *S. sclerotiorum* was found to be connected with sclerotia formation. In the other cases, its high production required inductors added to the medium. Presented within the paper, a production of the enzyme concerns the only liquid media of varied components. Nevertheless, it has to be noticed that the common feature of high laccase production is the particular ratio of carbon-to-nitrogen, where relatively low carbon content needs to be maintained at the beginning of the cultivation. Typical carbon and nitrogen sources used for all described fungi are sucrose/glucose and L-asparagine, usually supplemented with copper ion and organic inducer. Laccases originating from *S. sclerotiorum* and *B. cinerea* have typical for fungal laccases optimum pH in acid range, whereas the enzyme originating from *R. praticola* has the optimal pH at a neutral level.

4. References

- Błaszczkowski J, Tadych M, Madej T (1999) Przewodnik do ćwiczeń z fitopatologii: 1-79.
- Bollag JM, Sjöblad RD, Czaplinski EJ, Hoepfel RE (1976) Transformation of 1-naphthol by the culture filtrate of *Rhizoctonia praticola*. *Soil Biology and Biochemistry* 8: 7-11.
- Bollag JM, Sjöblad RD, Liu SY (1979) Characterization of an enzyme from *Rhizoctonia praticola* which polymerizes phenolic compounds. *Canadian Journal of Microbiology* 25: 229-233.
- Coman C, Mot AC, Gal E, et al. (2013) Laccase is upregulated via stress pathways in the phytopathogenic fungus *Sclerotinia sclerotiorum*. *Fungal Biology* 117(7-8): 528-539.
- Kropiwniec K, Szala M (2015) *Biotechnologia w analizie, ochronie środowiska, medycynie i przemyśle*. Fundacja na rzecz promocji nauki i rozwoju TYGIEL.
- Liu Q, Luo L, Zheng L (2018) Lignins: Biosynthesis and Biological Functions in Plants. *International Journal of Molecular Sciences* 19(2): 335.
- Marbach I, Harel E, Mayer A M (1984) Molecular properties of extracellular *Botrytis cinerea* laccase. *Phytochemistry* 23(12): 2713-2717.
- Mayer AM, Staples RC (2002) Laccase: New functions for an old enzyme. *Phytochemistry* 60: 551-565.
- Mot AC, Damian G, Parvu M et al. (2012) A “yellow” laccase with “blue” spectroscopic features, from *Sclerotinia sclerotiorum*. *Process Biochemistry* 47(6): 968-975.
- Otto B, Schlosser D (2014) First laccase in green algae: purification and characterization of an extracellular phenol oxidase from *Tetracystis aerea*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg: 1-12.
- Polak J, Jarosz-Wilkolazka A (2007) Reakcje katalizowane przez lakazę – mechanizm i zastosowanie w biotechnologii. *Biotechnologia* 4(79): 82-94.

- Rogalski J, Janusz G, Legiec D, Nam-Seok CHO, Shin SJ, Ohga S (2011) Purification of extracellular laccase from *Rhizoctonia praticola*. *Journal of the Faculty of Agriculture, Kyushu University*, 56(1):1-7.
- Saksena HK, Vaartaja O (1961) Taxonomy, morphology and pathogenicity of *Rhizoctonia* species from forest nurseries. *Canadian Journal of Botany* 39(3): 627-647.
- Senn-Irlet B, Heilmann-Clausen J, Genney D et al. (2007) Guidance for Conservation of Macrofungi in Europe. Document prepared for The Directorate of Culture and Cultural and Natural Heritage Council of Europe: 1-39.
- Shekher R, Sehgal S, Kamthania M et al. (2011) Laccase: microbial sources, production, purification, and potential biotechnological applications. *Enzyme research*: 1-11.
- Sjoblad RD, RD M, Bollag JM (1976). Polymerization of 1-naphtol and related phenolic compounds by an extracellular fungal enzyme. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 6: 457-463.
- Slomczynski D, Nakas J P, Tanenbaum S W (1995) Production and Characterization of Laccase from *Botrytis cinerea* 61-34. *Applied and Environmental Microbiology*: 61(3): 907-912.
- Taha A, Shwaish I, Mohammed A et al. (2013) Production of a laccase from *Botrytis cinerea* (DSMZ 877) and application for textile phenolic dye decolorization. *Energy Procedia* 36: 862–871.
- Williamson B, Tudzynski B, Tudzynski P (2007) Pathogen profile *Botrytis cinerea*: the cause of grey mould disease. *Molecular Plant Pathology* 8 (5): 561-580.

2. The cultivation conditions of white-rot fungi representatives for laccase production in solid-state fermentation – a mini review

Dominika Brychcy, Halina Maniak

Department of Bioprocess and Biomedical Engineering, Faculty of Chemistry, Wrocław University of Science and Technology

Dominika Brychcy:217354@student.pwr.edu.pl

Keywords: bracket fungi, lignocellulose decomposition, natural support, processing parameters

Abstract

This article is a mini review concerning the most important factors affecting the production of laccase by macroscopic fungi. The work focuses on three representatives of fungi that cause a white-rot of wood: *Trametes versicolor*, *Fomes fomentarius*, and *Pycnoporus cinnabarinus*. On the basis of the available literature, the presented work is an overview of the culture conditions on a laboratory and/or reactor scale using the fermentation process on a natural or inert solid substrates.

1. Introduction

The bracket fungi belong to Basidiomycota or Ascomycota divisions. They are filamentous fungi, occurring in the form of fruiting bodies growing singly or forming clusters. There are saprophytic representatives which inhabit dead trees or parasitic that grow on living trees, but one species could act in both ways (Łakomy and Kwaśna 2008). The bracket fungi are conventionally categorized into three main classes diversified by the appearance of wood remaining after their activity (Levasseur et al. 2014). Soft-rot fungi partially decompose cellulose and hemicellulose contribute to wood softening. The second class, brown-rot fungi depolymerize mainly cellulose *via* enzymatic or non-enzymatic pathways. The latter involves enzymes causing generation of Fenton's reagent (solution of ferrous cations and hydrogen peroxide) which finally cause cellulose degradation. Lignin is slightly modified and the attacked wood is crumbly and brown. The third class, white-rot fungi are the only organisms able to lignin degradation in a process called enzymatic combustion, in which manganese peroxidase and lignin peroxidase work together with laccase. White rotten wood has a bleached and spongy appearance (Levasseur et al. 2014). Such efficient decomposition of lignin by the white-rot fungi make them attractive producers of laccase. Fungal laccases are glycoproteins and copper-containing enzymes usually of the high potential of oxidation. These oxidoreductases oxidize both phenolic and non-phenolic substrates through the free-radical mechanism using oxygen as a final acceptor of electrons. The oxidation of four phenolic substrate molecules to four radical products is accompanied by a reduction of molecular oxygen to two water molecules. The spectrum of laccase substrates is further extended by using an adroit oxidation system which employs mediators. The mediators are the low molecular weight compounds which are laccase substrates but serve as carriers of electron transfer which is handed to the large molecules for oxidation. Using this system fungal laccases are able to oxidize such a sophisticated macromolecule as lignin (Morozova et al. 2007). Therefore this oxidoreductase has already found a numerous application in various branches of industry as for instance in delignification and pulp bleaching, bioremediation of soil and water, detoxification of xenobiotics, and degradation of insecticides, fungicides or herbicides and many others (Kunamneni et al. 2007; Strong and Claus 2011). Solid-state fermentation (SSF) is an alternative type of microorganism cultivation for this performed in liquid media. SSF concerns microbial growth on the surface of a carrier. The carrier has usually limited solubility in water. It might be a material which itself provides nutrients (natural substrate) or could be an inert matrix which has property to absorb nutrients from liquid media and serve as a scaffold for mycelium development. SSF is usually applied to fungi due to a limitation to the accessibility of water (Singhania et al. 2009). A number of advantages and disadvantages of SSF has been reported in the

literature so far (Pandey et al. 2008; Rodrigez-Couto 2018). But the most promising application of SSF is the efficient production of enzymes and utilization of agricultural, food and forestry wastes.

2. A literature review

2.1 *Trametes versicolor* (L.) Lloyd

This bracket fungus commonly occurs all over the world. It is usually found on dead deciduous trees and less often on coniferous. Its fruiting bodies can be diverse and have many variants of colors. In Europe, it is considered as to be inedible but in some countries, research is underway to confirm the antitumor activity of the polysaccharide found in the fruiting bodies of that fungus (Łakomy and Kwaśna 2008).

In a study conducted by Jing and co-workers (Jing et al. 2007), *Trametes versicolor* was used for the production of laccase in SSF using wheat bran supplemented with glucose, water, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ and Tween80 in various proportions. Wheat bran was found to serve as a good solid substrate, due to the high content of carbon, nitrogen and a large area of ventilation. The small-scale cultures were carried out for 15 days, ensuring free air flow, 60% relative humidity and an initial pH of 6.5. The determined optimal proportions of components that corresponded to the highest enzymatic activity were used for production on a large scale. The optimal values of the substrate components for the best production of laccase were found as 10.8% glucose, 27.7% wheat bran, 9.0% $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, and 52.5% water. The results of the experiments have shown that Tween80 reduces the production of laccase. The negative effect of this agent was attributed to its limited dissociation in the water contained in the solid substrate (low water activity) and thus reduced diffusion of nutrients through the biological membranes. Typically, on a large scale, lower activity of laccase was obtained when compared with laboratory-scale, but still, results were satisfactory, indicating the importance of using the waste raw materials for the fungi cultures and effective production of enzymes useful industrially (Jing et al. 2007).

Another work presented the results of *T. versicolor* cultivation on rice bran or nut shells for various pH variants, incubation time, temperature and the ratio of carbon to nitrogen (Nasreen et al. 2015). All cultures were run in flasks with a capacity of 250 mL containing 5 g of a natural substrate soaked with 15 mL of distilled water. The effect of the initial pH value was tested in the range of 4.5–7.0, incubation time 12, 18, 24, 36, 42 days, temperature between 25 and 45 °C and the carbon and nitrogen content using glucose and chickpeas in a ratio of 1:1, respectively. The results of the experiments show that the higher productivity of laccase by nearly 20% was obtained for rice bran in comparison to nut husks. The enzyme production time is generally long and the maximum enzyme production was obtained on the 36th and 42nd day of cultivation. Optimal pH, temperature and additional carbon and nitrogen sources are in the range of 5.5–6.0, 37 °C and for 3% solutions of glucose and chickpeas (Nasreen et al. 2015). The production of laccase is highly dependent on the cultivation of a given strain. To increase the concentration of the enzyme, it is beneficial to introduce an inducer into the culture medium. In the case of the *Trametes versicolor* guaiacol, copper salts, ABTS, gallic acid, 2,5-xylidine, ferulic acid, and catechol have been applied successfully so far (Toca-Herrera et al. 2007).

2.2 *Fomes fomentarius* (L.) J.J. Kickx

To *Fomes* sp. belong white-rot fungi that act as parasites or saprotrophs. Their fruiting bodies grow singly or in groups, they are of a hoof-shaped, semicircle or deformed, smooth, covered with a thick resin peel, often clearly concentrically zoned and striated. During the year, there might be several increments. There is one species in Europe – *Fomes fomentarius* (L.) J.J. Kickx. The most common environment for the species are forests, rarely it is found in parks, gardens, or along roads. It grows on live and dead deciduous trees, very rare on conifers. This particular species occurs on beech and birch, less often on rakes, oak, poplar, elm, and willow. Most often it is found in trees weakened by age and disease (Łakomy and Kwaśna 2008). *Fomes fomentarius* is a basidiomycete known from traditional medicine reports which provide the information of its numerous biological properties such as antipyretic, anti-inflammatory, antioxidation, diuretic, and anticancer (Neifar et al. 2013).

Fomes fomentarius was employed for laccase production in solid-state fermentation system in laboratory scale using eightier inert supports for mycelium immobilization being stainless steel sponge or plastic material, or natural material – wheat bran support-substrate (Nefair et al. 2009). The inert carriers were immersed in culture liquid media with the proportion of 2.5 g to 15 mL, respectively. The wheat bran was moistened with sodium acetate buffer (20 mM, pH 5.0) using the same ratio of the solid to the liquid. Additionally, the particle size of wheat bran (0.2-1.0 mm and 1.0-5.0 mm) and supplementation with the copper cation (2.0 mM) was investigated. The cultures were incubated at 30°C with the 90% of humidity for 7, 13 or 20 days. Laccase was isolated by leaching with the sodium acetate buffer (20 mM, pH 5), using an excess of the extractant being 10 mL per gram of substrate. Isolation process was conducted for 60 minutes at 160 rpm at room temperature and subsequently centrifuged at 8000×g for 20 minutes. The final supernatant was analyzed directly. The results of the support used on laccase production clearly indicated the overwhelmingly positive influence of wheat bran which was reflected in 40 and 80-fold increment in enzyme production when compared to stainless steel and plastic material, respectively. The particles size was found to have a minor effect on laccase production but it could be concluded that the greater particle size, the better productivity. More remarkable influence had the addition CuSO₄ which brought at least a 3-fold increase in laccase activity. The cultivation gave a pronounced effect when it lasted at least 13 days. The optimal conditions were applied to bioreactor cultivation. The mass and volumetric proportion were one order of magnitude higher in comparison to flask scale. The bioreactor laccase productivity was about 4.5-fold lower than this optimal for flask scale but still very high. Wheat bran was found to be an attractive substrate and proper for the laccase production (Nefair et al. 2009).

In other paper, olive cakes were used for the same fungus cultivation (Neifar et al. 2013). This natural substrate is commonly occurring waste in Tunisia. It was employed in solid-state fermentation with *F. fomentarius* to improved its digestibility and nutritional value as food for ruminants. The chemical analysis showed that the olive cakes might be a suitable medium for fungi cultivation due to balanced content of carbohydrates, protein and fat as following: cellulose 14.3%, hemicellulose 14.1%, sugars 7% (including reducing ones 2.6%), phenolics 0.3%, crude protein 6.3%, and total fat 3.3%. The *F. fomentarius* cultures were conducted in 500 mL flasks containing 10 g of olive cakes with 40 mL of sodium acetate buffer (20 mM) of pH 5. The fermentation processes were at 30°C and with 60% of relative humidity and lasted for 7, 15, 22 or 30 days. Laccase, xylanase, and cellulase activities were analyzed in an extract obtained from the culture using the same procedure as reported previously (Nefair et al. 2009). The results from the 15th day of cultivation indicated the predominant, weak and very weak activity of laccase, xylanase, and cellulase, respectively. After 22 days xylanase and cellulase activities equated which is accompanied by the lose of laccase action. In this stage, the solid medium is fully colonized. Cellulase activity increased and reach maximum n 30th day. In summary, *F. fomentarius* was found an effective organism working in SSF which boosted the nutritional and digestion values of olive cakes by increasing the crude protein content and reducing fiber fractions. On the other hand, olive cakes could be considered as a good substrate for laccase production in SSF (Neifar et al. 2013).

2.3 *Pycnoporus cinnabarinus* (Jacq.) Fr.

The environment and occurrence of *P. cinnabarinus* include deciduous and mixed forests, especially the woodland containing beech species. It might be also found in parks and gardens, on dead trunks and branches of deciduous trees, for example, birch, rowan, poplar or cherry trees, it rather does not occur on conifers. In general, it is a rare species. The fruiting bodies are annuals of red-orange, brick-red colors, adnate laterally, grow singly or in a group, the shape is semicircular. Fruiting bodies usually grow on fallen branches or trunks. The attacked wood has an orange shade (Łakomy and Kwaśna 2008).

A genome of the fungus has been already sequenced and might be recognized as a white-rot basidiomycete model of an organism secreted a complex lignocellulosic degrading catalytic proteins (Levasseur et al. 2014). Among the protein involved in the ligninolytic activity, the twelve types of enzymes were identified, including five laccase isozymes. The ability of *Pycnoporus cinnabarinus* to growth on versatile carbon sources were investigated using 35 types of materials including simple

sugars, oligo-, polysaccharides, lignin, casein, and crude plant material. Five natural solid substrates such as sugarcane bagasse, banana skins, wood shavings, hemp, and micronized birchwood were also analyzed. In general, *P. cinnabarinus* cultures grow better on crude plant material which usually contains 2-4% of lignin rather than on pure substances. Lignin and cottonseed hulls containing a high content of lignin (20-25%) inhibited growth and appeared improper medium for the fungus. Better growth was found on guar gum (galactomannan) than on xylan, which could be attributed to a better degrading complex of mannan. The radial growth on pure substances (poor media) could be described as fast, but a thin layer of mycelium was observed probably due to dodge of starvation. In all media, either with pure substances or natural material, the genes of laccase isozymes were identified, which indicates that these copper-containing enzymes are widely and constitutively produced by this white-rot basidiomycete (Levasseur et al. 2014).

In the previously reported research (Meza et al. 2005), *P. cinnabarinus* was found to produce laccase in an excess when ethanol was presented as a volatile compound. The experiments were performed in the glass packed-bed bioreactors (20 × 4 cm, with 250 mL of capacity) fulfilled with sugar-cane bagasse (a carbon source) impregnated with a solution of malt (an additional carbon source), mineral salt, and the fungus mycelium. Each column was supplied with a humidified air-ethanol stream compressor and the temperature of the process was maintained at 24 °C. The various ethanol flow between 0–18 g m⁻³ was investigated and the stream was controlled at the front and back of the column or at three ports of sampling placed axially along the column. The amount of ethanol absorbed in the bagasse, laccase activity, biomass weight, and sugar content were determined in the time of experiments. The moistened solid substrate possess a high capacity to absorb ethanol which was attributed to dissolution of alcohol in water contained in the bagasse rather than to adsorption on the surface of this support material. Good results were obtained between 6 and 7th day for gaseous ethanol concentration between 3.8–10 g m⁻³ from 55–80 U/g of dry mass. When the processes were prolonged to 14 days, a higher laccase activity (90 U/g of dry mass) was observed for the mild intensity of the ethanol flow at 7.2 g. Ethanol inhibited the growth of *P. cinnabarinus* which was reflected in decreasing mass of the fungus along with the increment of the ethanol concentration. For the 18.5 g of ethanol per m³ neither growth of the fungus nor laccase activity was detected in the culture. At a moderate flow of air-alcohol through the column, ethanol plays a role as the inductor for effective laccase production on sugar-cane bagasse (Meza et al. 2005; Meza et al. 2007).

3. Summarization

In the present mini-review, the selected information concerning the production of laccase by the white-rot fungi representatives in SSF was collected. The predominant solid substrate is of natural origin and might be characterized with generally low content of lignin which could stimulate the enzyme production as for example wheat bran, rice bran, nut shells, olive cakes, crude plant material or sugar-cane bagasse. The inner supports were found improper for the process. It could be noticed that the time of cultivation for full material decomposition is rather long and lasts from several to tens of days. The temperature and pH of the culture medium are typical for fungus and correspond to natural conditions for developing fungi – moderate temperatures between 20 and 30°C and acidic pH between 4 and 6. In general, the addition of inducers with determined concentrations strongly improve laccase production as it was found for copper cations and ethanol in the gas phase. The use of natural material in solid-state fermentation is still of great interest due to a huge amount of solid wastes produced annually by food, forest, and agriculture industries.

4. References

- Ghosh P, Das A, Ghosh U (2018) Application of Fermentation Strategies for Improved Laccase Production. Arindam Kuila and Vinay Sharma (eds.) Principles and Applications of Fermentation Technology, Scrivener Publishing LLC, 117–140.
- Jing D, Li P, Stagnitti F et al. (2007) Optimization of laccase production from *Trametes versicolor* by solid fermentation. Canadian Journal of Microbiology 53: 245–251.

- Kunamneni A, Ballesteros A, Plou FJ et al. (2007) Fungal laccase – a versatile enzyme for biotechnological applications. Chapter in: *Communicating Current Research and Educational Topics and Trends in Applied Microbiology*. A. Méndez-Vilas (Ed.) Formatex, Badajoz, Spain, 233–245.
- Levasseur A, Lomascolo A, Chabrol O et al. (2014) The genome of the white-rot fungus *Pycnoporus cinnabarinus*: A basidiomycete model with a versatile arsenal for lignocellulosic biomass breakdown. *BMC Genomics* 15(486): 1–24.
- Łakomy P, Kwaśna H (2015) *Atlas hub. Poradnik Leśnika*. Multico Oficyna Wydawnicza Warszawa, pp. 65–66, 74–75, 148–150.
- Meza JC, Lomascolo A, Casalot L et al. (2005) Laccase production by *Pycnoporus cinnabarinus* grown on sugar-cane bagasse: Influence of ethanol vapours as inducer. *Process Biochemistry* 40: 3365–3371.
- Meza JC, Auria R, Lomascolo A et al. (2007) Role of ethanol on growth, laccase production and protease activity in *Pycnoporus cinnabarinus* SS3. *Enzyme and Microbial Technology* 41(1–2): 162–68.
- Morozova OV, Shumakovich GP, Gorbacheva MA et al. (2007) "Blue" Laccases. *Biochemistry (Mosc.)* 72(10): 1396–1412.
- Neifar M, Jaouani A, Ellouze-Ghorbel R et al. (2009) Effect of culturing processes and copper addition on laccase production by the white-rot fungus *Fomes fomentarius* MUCL 35117. *Letters in Applied Microbiology* 49: 73–78.
- Neifar M, Jaouani A, Ayari A et al. (2013) Improving the nutritive value of olive cake by solid state cultivation of the medicinal mushroom *Fomes fomentarius*. *Chemosphere* 91(1): 110–14.
- Pandey A, Larroche C, Soccol CR (2008) General considerations about solid-state fermentation processes. Chapter in: *Current Developments in solid-state fermentation*. Springer Asiatic Publisher, New Delhi, 13–25.
- Rodriguez-Couto S. 2018. Solid-state fermentation for laccase production and their application. Chapter 11 in: *Current Developments in Biotechnology and Bioengineering*, Elsevier, 211–34.
- Singhania RR, Patem AK, Soccol CR et al. (2009) Recent advances in solid-state fermentation. *Biochemical Engineering Journal* 44: 13–18.
- Strong, P, Claus H (2011) Laccase: A review of its past and its future in bioremediation. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 41(4): 373–434.

3. Wpływ geometrii otworu eliptycznego na rozkład naprężeń w płycie przy jednoosiowym obciążeniu

Influence of the elliptical hole geometry on stress distribution in a plate at uniaxial load

Mateusz Marcin Konieczny

Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska
Opiekun naukowy: Grzegorz Gasiak

Konieczny Mateusz: mateuszmarcinkonieczny@wp.pl

Słowa kluczowe: otwór eliptyczny, metoda elementów skończonych (MES), naprężenie redukowane, kąt nachylenia otworu, współczynnik kształtu, współczynnik koncentracji naprężeń

Streszczenie

W niniejszej pracy przedstawiono wybrane badania dotyczące numerycznej analizy wpływu geometrii otworu eliptycznego na rozkład naprężeń w płycie poddanej jednoosiowemu obciążeniu (obciążenie wzdłużne w płaszczyźnie płyty). Przeprowadzono badania dotyczące wpływu współczynnika kształtu K oraz kąta nachylenia otworu α na rozkład naprężeń w prostokątnej płycie z otworem eliptycznym. Do obliczeń wykorzystano program o nazwie Femap. Jest to program do zaawansowanych obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych (MES). Przeanalizowano zarówno charakter wpływu współczynnika kształtu K otworu eliptycznego jak i kąta nachylenia otworu α na rozkład naprężeń redukowanych w płycie ze stali S235JR. Wykazano, że w przypadku, gdy oś dłuższa otworu eliptycznego tworzy kąt $\alpha = 90^\circ$ w stosunku do osi wzdłużnej płyty (przy współczynniku kształtu otworu $K = 0,2$) to naprężenie redukowane wg hipotezy Hubera-Misesa osiąga wartość maksymalną równą $\sigma_{red\ max} = 370,9\ MPa$ (przy obciążeniu $P_z = 100\ kN$). W tym przypadku współczynnik koncentracji naprężeń k wynosi $k = 11,13$.

1. Wprowadzenie

Obecność otworów w konstrukcji powoduje, że występują w nich koncentracje naprężeń, tj. naprężenie w pobliżu otworów staje się większe o pewną wartość niż naprężenie nominalne. Naprężenie to można wyznaczyć za pomocą metod analitycznych (Robak 2018, Sharma 2011), eksperymentalnych (Toubal i inni 2005) lub innych odpowiednich metod, takich jak metoda elementów skończonych (Khechai i inni 2015). Metoda elementów skończonych (MES) umożliwia podział struktury na małe, skończone, dobrze zdefiniowane, elastyczne podstruktury - elementy (Gunwant i Singh 2013).

Z reguły wyznaczenie stanu naprężenia wokół otworu, szczeliny w obciążonym elemencie maszyny lub elemencie konstrukcji nie udaje się uzyskać za pomocą związków analitycznych i w tych przypadkach stosuje się metody numeryczne (Gasiak i Rozumek 2004).

Celem niniejszej pracy jest numeryczna analiza wpływu geometrii otworu eliptycznego na rozkład naprężeń w płycie przy jednoosiowym płaskim rozciąganiu.

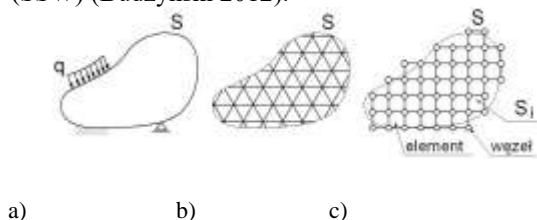
2. Przegląd literatury

2.1 Metoda elementów skończonych (MES)

Metoda elementów skończonych jest to obecnie jedna z najszerzej stosowanych metod rozwiązywania różnych problemów inżynierskich. Jej uniwersalność, polegająca na łatwości schematyzacji różnych obszarów o skomplikowanej geometrii, także niejednorodnych i anizotropowych, kwalifikuje ją jako dobre narzędzie do modelowania problemów inżynierskich (<http://zaremski.com/mes/mes.php>).

Metoda elementów skończonych jest jedną z metod dyskretyzacji układów geometrycznych ciągłych, tj. podziału kontinuum na skończoną liczbę podobszarów. Wobec powyższego, idea metody zakłada modelowanie nawet bardzo złożonych konstrukcji (części i zespołów) poprzez ich reprezentację za pomocą możliwie prostych geometrycznie elementów składowych, nawet

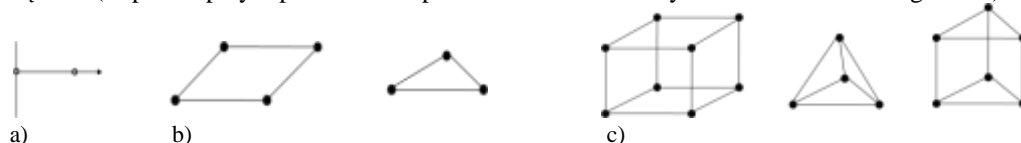
z uwzględnieniem nieciągłości i wielofazowości materiałowych. Główne założenie metody elementów skończonych (MES) to podział modelu geometrycznego ciągłego (Rys. 1) na elementy skończone, łączące się w tzw. węzłach, czego efektem jest utworzenie modelu geometrycznego dyskretnego. Efektem dyskretyzacji jest transformacja układu o nieskończonej liczbie stopni swobody (zdolności do zmiany wartości określonej współrzędnej) do postaci układu o skończonej liczbie stopni swobody (SSW) (Budzyński 2012).



Rys. 1 Dyskretyzacja modelu ciągłego – transformacja w zbiór (siatkę) elementów skończonych: a) model geometryczny ciągły; b) model dyskretny idealny; c) model dyskretny obliczeniowy.

Podczas obliczeń z zastosowaniem metody elementów skończonych (MES) dyskretyzacji ulegają również wszelkie inne wielkości fizyczne, reprezentowane w układzie za pomocą funkcji ciągłych (np. obciążenia, utwierdzenia, przemieszczenia, naprężenia). Podczas dyskretyzacji określonej wielkości fizycznej dąży się do maksymalnego zbliżenia jej postaci dyskretnej i ciągłej z zastosowaniem metod aproksymujących.

Element skończony jest prostą figurą geometryczną (płaską lub przestrzenną), dla której określone zostały wyróżnione punkty zwane węzłami, oraz pewne funkcje interpolacyjne służące do opisu rozkładu analizowanej wielkości w jego wnętrzu i na jego bokach. Funkcje te nazywa się funkcjami węzłowymi, bądź funkcjami kształtu. Węzły znajdują się w wierzchołkach elementu skończonego, ale mogą być również umieszczone na jego bokach i w jego wnętrzu. Jeżeli węzły znajdują się tylko w wierzchołkach, to element skończony jest nazywany elementem liniowym (ponieważ funkcje interpolacyjne są wtedy liniowe). W pozostałych przypadkach mamy do czynienia z elementami wyższych rzędów. Rząd elementu jest zawsze równy rzędowi funkcji interpolacyjnych (funkcji kształtu). Liczba funkcji kształtu w pojedynczym elemencie skończonym jest równa liczbie jego węzłów (<http://docplayer.pl/793864-Wprowadzenie-do-metody-elementu-skonczonego.html>).



Rys. 2 Przykłady elementów skończonych w przestrzeniach: a) 1D - jednowymiarowych; b) 2D - dwuwymiarowych; c) 3D – trójwymiarowych.

Z inżynierskiego punktu widzenia, metoda elementów skończonych rozumiana jest jako pewien sposób postępowania podczas rozwiązywania zadań fizyki. Jest to więc określony ciąg operacji wykonywanych przez inżyniera projektanta i komputer, w trakcie poszukiwania rozwiązania, począwszy od sformułowania zadania, a skończywszy na graficznej interpretacji wyników obliczeń. Ten punkt widzenia wynika między innymi z faktu, że sposób postępowania przy zastosowaniu metody elementów skończonych (MES) jest niemal identyczny dla wszystkich rozwiązywanych zagadnień.

Obecnie programy inżynierskie wykorzystujące metodę elementów skończonych (MES) do obliczeń numerycznych są złożone głównie z trzech zależnych od siebie modułów. Modułami tymi są: preprocesor, którego zadaniem jest import lub wdrożenie geometrii, wybór wariantu elementów skończonych, podziału kontinuum oraz ustawienia warunków brzegowych; solver, to moduł budujący i obliczający układ równań, dzięki czemu otrzymujemy wielkości fizyczne których szukamy; postprocesor, który odpowiada za przedstawianie i interpretację otrzymanych wyników. W badaniach inżynierskich do analizy stanu naprężenia, odkształcenia oraz ugięcia najczęściej wykorzystuje się

programy numeryczne takie jak: Franc 2dl, Femap, ANSYS czy Nastran/Patran. Są to programy do zaawansowanych obliczeń metodą elementów skończonych (MES). Programy te wykorzystują szereg zaawansowanych i uniwersalnych technologii, umożliwiających szybkie, wydajne oraz proste przygotowanie modelu obliczeniowego kompatybilnego z dowolnymi środowiskami obliczeniowymi, stosowanymi przez inżynierów ([http://docplayer.pl/793864 Wprowadzenie-do-metody-elementu-skonczonego.html](http://docplayer.pl/793864-Wprowadzenie-do-metody-elementu-skonczonego.html)).

2.2 Przykłady badań dotyczących płyty z centralnym otworem eliptycznym

Prostokątna elastyczna płyta izotropowa z centralnie umieszczonym eliptycznym otworem poddana rozciąganiu znalazła szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach inżynierii, takich jak lotnictwo, żegluga, motoryzacja i mechanika. Do projektowania płyt z otworem wymagana jest dokładna znajomość stref spiętrzenia naprężeń, wartości ugięć oraz współczynnika koncentracji naprężeń. Koncentracja naprężeń powstaje w wyniku nagłej zmiany geometrii płyty poddanej obciążeniu. W rezultacie rozkład naprężeń nie jest jednolity w całym przekroju. W miejscach koncentracji naprężeń powstają pęknięcia zmęczeniowe oraz odkształcenia plastyczne.

Autorzy prac (Gunwant i Singh 2013) oraz (Babulal i inni 2015) przeprowadzili analizę stanu naprężenia w płycie z centralnym otworem eliptycznym poddanej jednoosiowemu rozciąganiu wzdłuż osi z . Autorzy analizowali wpływ współczynnika kształtu K otworu eliptycznego na rozkład naprężeń w izotropowej płycie. W pierwszym przypadku do analizy przyjęto płytę o wymiarach: długość $L = 400 \text{ mm}$, szerokość $B = 100 \text{ mm}$, grubość $g = 10 \text{ mm}$, współczynnik kształtu otworu eliptycznego K wynosi $K = 0,2; K = 0,4; K = 0,6; K = 0,8; K = 1,0$. Płytę wykonano ze stali, gdzie moduł Younga wynosi $E = 210 \text{ GPa}$, a liczba Poissona $\nu = 0,3$. Płytę poddano jednoosiowemu rozciąganiu naprężeniem o wartości $\sigma = 10 \text{ MPa}$. W drugim przypadku do analizy przyjęto płytę o wymiarach: długość $L = 500 \text{ mm}$, szerokość $B = 300 \text{ mm}$, grubość $g = 25 \text{ mm}$, współczynnik kształtu K otworu eliptycznego (1) wynosi $K = 0,2; K = 0,4; K = 0,6$. Płytę wykonano ze stali AISI 4340 gdzie moduł Younga wynosi $E = 200 \text{ GPa}$, a liczba Poissona $\nu = 0,3$. Płytę poddano jednoosiowemu rozciąganiu naprężeniem o wartości $\sigma = 50 \text{ MPa}$. W obu przypadkach badaną próbkę zamocowano na boku CD , bok EF obciążono, a boki DE i FC były swobodne. Obliczenia numeryczne realizowano za pomocą programu ANSYS. Do obliczeń numerycznych zastosowano element skończony sześciokątny o ośmiu węzłach w narożach. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych uzyskano wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych $\sigma_{red \ max}$ oraz współczynnika koncentracji naprężenia zredukowanego k .

Współczynnik kształtu K dla eliptycznego otworu w prostokątnej płycie jest określony przez następujący związek (Gunwant i Singh 2013):

$$K = \frac{e}{f}, \quad (1)$$

gdzie: K - współczynnik kształtu; f - dłuższy promień otworu eliptycznego; e - krótszy promień otworu eliptycznego

Wielkość koncentracji naprężeń spowodowana występowaniem nieciągłości geometrycznej w tym przypadku tj. otworu eliptycznego w każdym kierunku mierzona jest przez współczynnik koncentracji naprężeń k , który jest określany i podawany przez uogólnioną zależność (Konish i Whitney 1975):

$$k = \frac{\sigma_{red \ max}}{\sigma_{red \ nom}}, \quad (2)$$

gdzie: k - współczynnik koncentracji naprężeń [-]; $\sigma_{red \ nom}$ - maksymalne naprężenie zredukowane [MPa]; $\sigma_{red \ max}$ - naprężenie zredukowane nominalne występujące w płycie bez otworu [MPa].

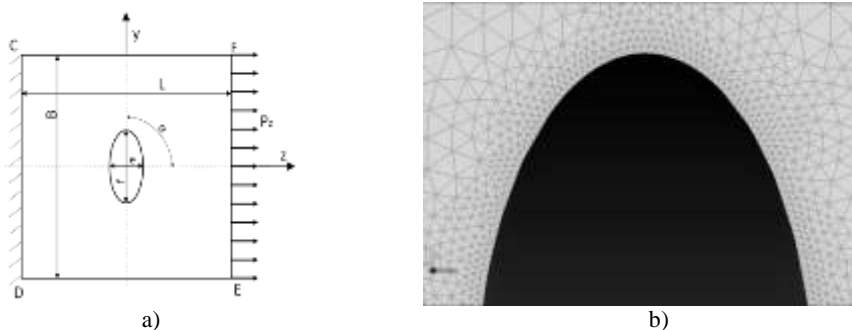
W propozycjach (Rani i Sireesha 2014) oraz (Patle i Bhope 2012) autorzy przeprowadzili analizę stanu naprężenia w płycie z centralnym otworem eliptycznym poddanej jednoosiowemu obciążeniu. Autorzy rozważali wpływ kąta nachylenia α otworu eliptycznego na rozkład naprężeń w płycie. W pierwszym przypadku do analizy przyjęto płytę wykonaną z termoplastycznego

kompozytowego materiału o wymiarach: długość L , szerokość B , grubość g , dłuższy promień otworu eliptycznego f , krótszy promień otworu eliptycznego e . Otwór eliptyczny obracano od 0° do 90° o 15° w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara. Płytę swobodnie podparto na bokach CD , DE , Ef , FC i obciążono ciśnieniem q na całej powierzchni płyty tj. $q = 5,5 \text{ N/mm}^2$, $q = 6,0 \text{ N/mm}^2$, $q = 6,5 \text{ N/mm}^2$. W drugim przypadku do analizy przyjęto płytę o wymiarach: długość $L = 254 \text{ mm}$, szerokość $B = 97 \text{ mm}$, grubość $g = 5 \text{ mm}$, dłuższy promień otworu eliptycznego $f = 40 \text{ mm}$, krótszy promień otworu eliptycznego $e = 20 \text{ mm}$. Otwór eliptyczny umieszczono centralnie pod kątem α : $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 50^\circ$, $\alpha = 65^\circ$, $\alpha = 75,5^\circ$ do osi z . Płytę wykonano ze stali, gdzie moduł Younga wynosi $E = 200 \text{ GPa}$, a liczba Poissona $\nu = 0,3$. Płytę poddano jednoosiowemu rozciąganiu siłą P_z o wartości $P_z = 323,6 \text{ N}$. W opisywanym przypadku badaną próbkę zamocowano na boku CD EF obciążono, a boki DE i FC były swobodne. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych uzyskano wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych $\sigma_{red\ max}$ oraz współczynnika koncentracji naprężenia zredukowanego k , który wyznaczono ze związku (2).

3. Stan naprężenia w płycie z otworem eliptycznym przy jednoosiowym obciążeniu

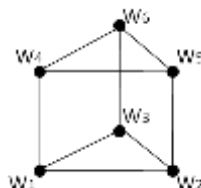
3.1 Model numeryczny płyty

Do obliczeń numerycznych stanu naprężenia przyjęto płytę z centralnie położonym otworem eliptycznym nachylonym pod kątem α do osi z : $\alpha = 0^\circ$; $\alpha = 15^\circ$; $\alpha = 30^\circ$; $\alpha = 45^\circ$; $\alpha = 60^\circ$; $\alpha = 75^\circ$; $\alpha = 90^\circ$ o następujących wymiarach (Rys. 3a): długość $L = 300 \text{ mm}$; szerokość $B = 300 \text{ mm}$; grubość $g = 10 \text{ mm}$; współczynnik kształtu otworu eliptycznego K_1 $K_1 = 0,2$; $K_2 = 0,4$; $K_3 = 0,5$; $K_4 = 0,6$; $K_5 = 0,8$; $K_6 = 1,0$. Płytę wykonano ze stali S235JR wg [PN - EN 1027-1], gdzie moduł Younga wynosi $E = 200 \text{ GPa}$ a liczba Poissona $\nu = 0,3$. Założono, że w płycie występuje płaski stan naprężenia. Przyjęto następujące warunki brzegowe płyty (Rys. 3a): bok CD zamocowano przegubowo, bok EF obciążono, a boki DE i FC były swobodne. Badaną płytę poddano jednoosiowemu rozciąganiu siłą P_z o wartości $P_z = 100 \text{ kN}$.



Rys. 3. a) Geometria oraz warunki brzegowe płyty z eliptycznym otworem; b) Podział na elementy skończone płyty z eliptycznym otworem.

Obliczenia realizowano za pomocą programu o nazwie Femap. Jest to program do zaawansowanych obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych (MES). Zastosowano element skończony przestrzenny pięciostanowy o sześciu węzłach w narożach, tj. Q6 (Rys. 3b i 4).



Rys. 4. Element skończony przestrzenny pięciostanowy o sześciu węzłach w narożach, tj. W1 - W2.

W płycie poddanej jednoosiowemu obciążeniu naprężenie redukowane nominalne $\sigma_{red\ nom}$ można wyznaczyć ze związku (Dhanjal i Arora 2015):

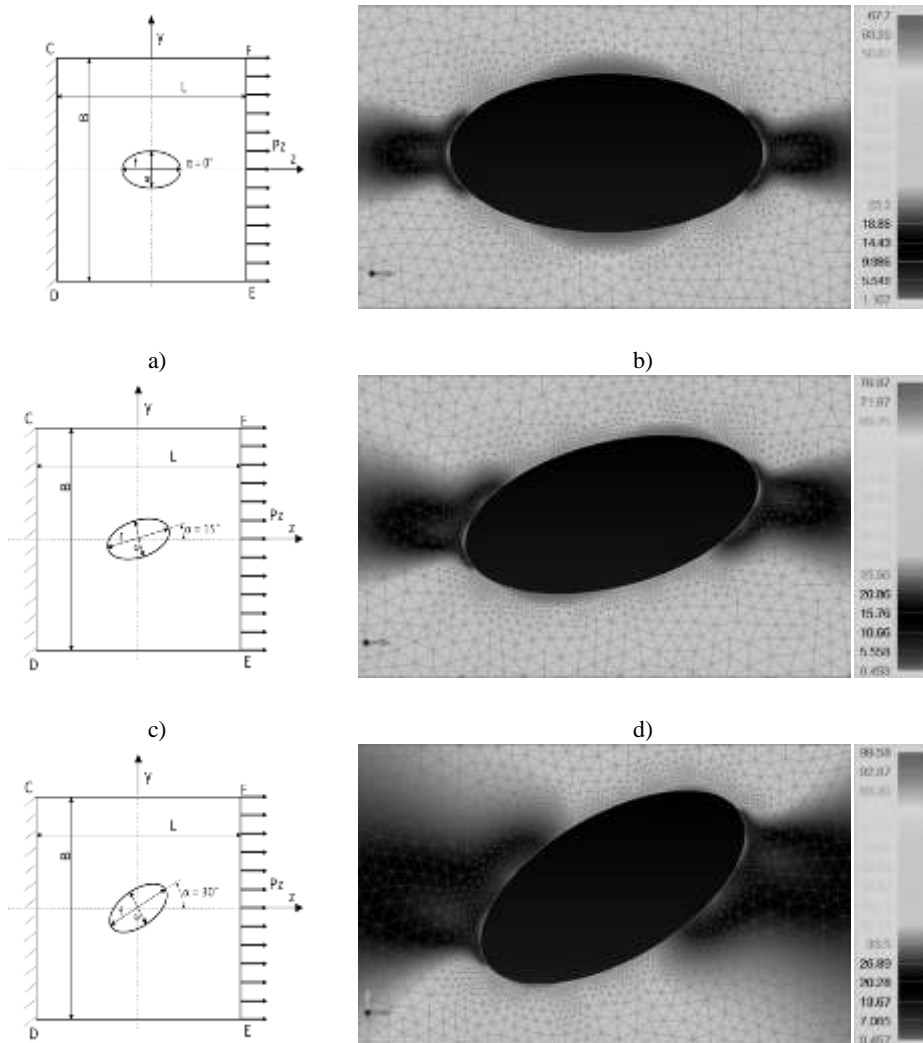
$$\sigma_{red\ nom} = \frac{P_z}{A}, \quad (5)$$

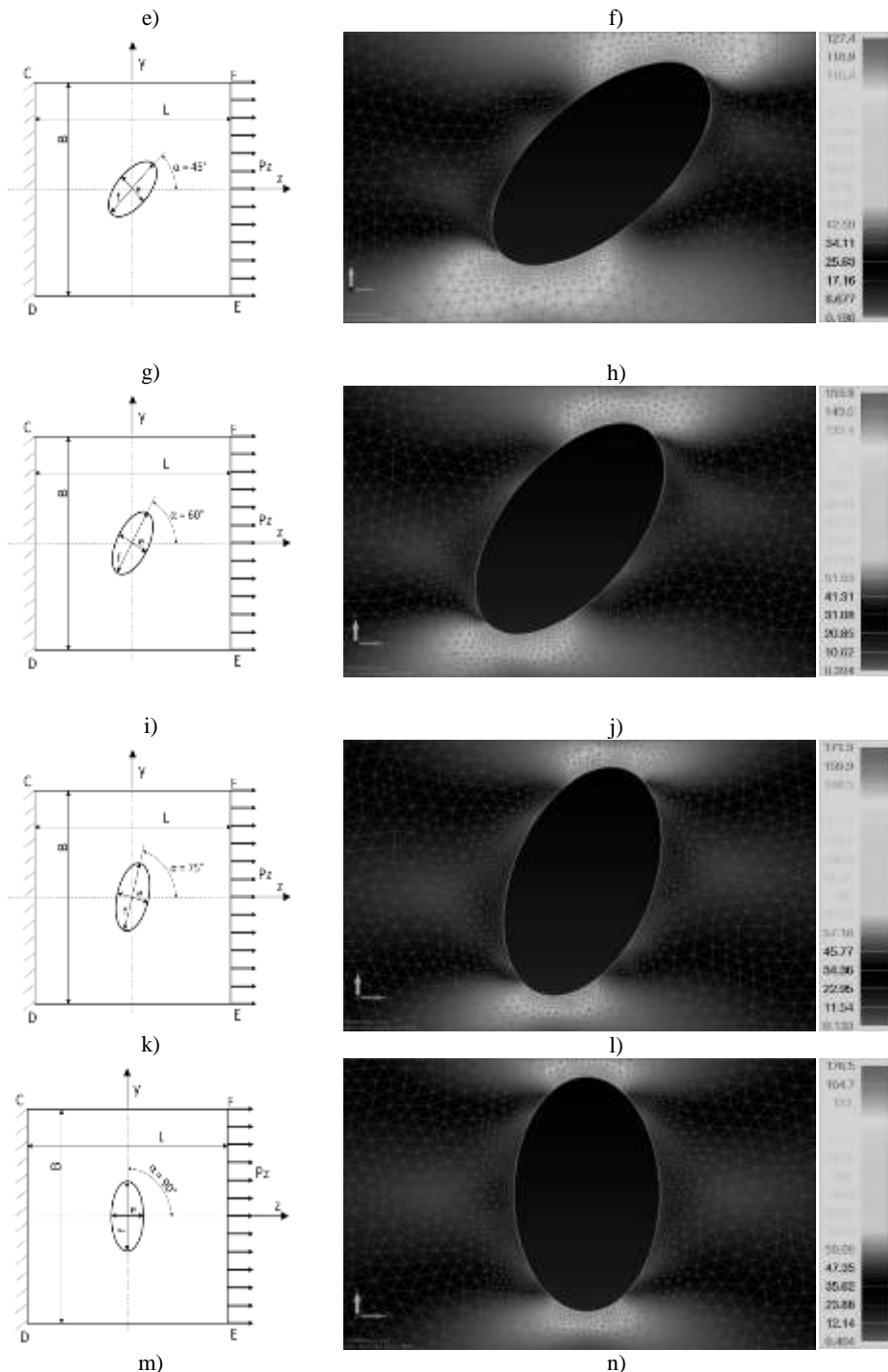
gdzie: $\sigma_{red\ nom}$ - naprężenie redukowane nominalne występujące w płycie bez otworu [MPa]; P_z - obciążenie przyłożone do płyty [N]; A - powierzchnia płyty, do której przyłożone jest obciążenie [mm²].

W tym przypadku w obciążonej płycie naprężenie redukowane nominalne $\sigma_{red\ nom}$ dla jednoosiowego rozciągania siłą P_z o wartości $P_z = 100\ kN$ wynosi $\sigma_{red\ nom} = 33,3\ MPa$.

4. Wyniki i dyskusja

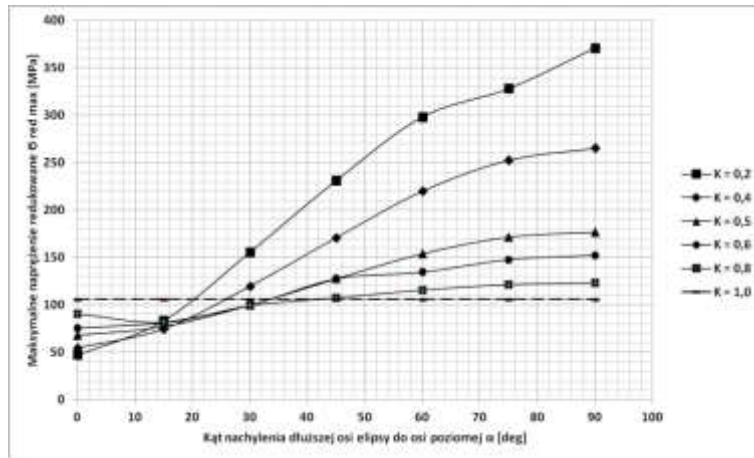
Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych (MES) uzyskano rozkład naprężeń redukowanych σ_{red} wg hipotezy Hubera-Misesa podanych w MPa oraz wyznaczono również współczynnik koncentracji naprężeń k na podstawie związku (2). Na rysunku 5a - 5g przedstawiono przykładowe rozkłady naprężeń opisanych powyżej dla kąta nachylenia osi dłuższej otworu eliptycznego α : $\alpha = 0^\circ$; $\alpha = 15^\circ$; $\alpha = 30^\circ$; $\alpha = 45^\circ$; $\alpha = 60^\circ$; $\alpha = 75^\circ$; $\alpha = 90^\circ$ do osi z i współczynnika kształtu otworu eliptycznego $K_5 = 0,8$.



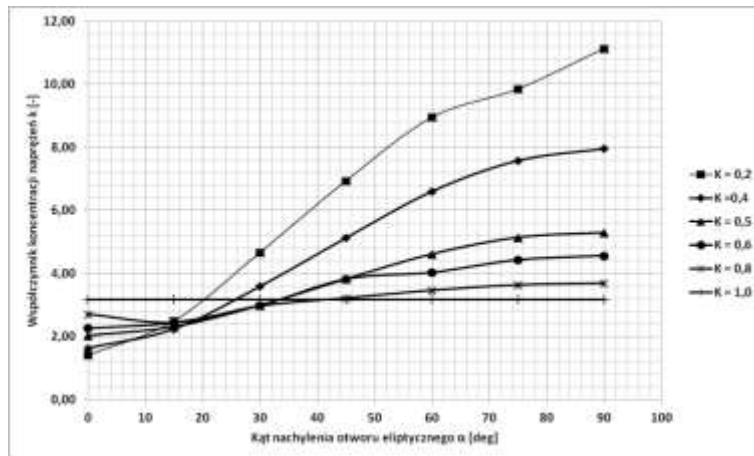


Rys. 5. Sposób obciążenia oraz rozkład naprężeń redukowanych σ_{red} w płycie z otworem eliptycznym dla współczynnika kształtu $K = 0,8$ i obciążenia $P_z = 100\ kN$: a) dla $\alpha = 0^\circ$; b) dla $\alpha = 0^\circ$; $\sigma_{red\ max} = 67,70\ MPa$; c) dla $\alpha = 15^\circ$; d) dla $\alpha = 15^\circ$; $\sigma_{red\ max} = 7697,70$ e) dla $\alpha = 30^\circ$; f) dla $\alpha = 30^\circ$; $\sigma_{red\ max} = 99,58\ MPa$; g) $\alpha = 45^\circ$; h) dla $\alpha = 45^\circ$; $\sigma_{red\ max} = 127,40\ MPa$; i) dla $\alpha = 60^\circ$; j) dla $\alpha = 60^\circ$; $\sigma_{red\ max} = 153,80\ MPa$; k) dla $\alpha = 75^\circ$; l) dla $\alpha = 75^\circ$; $\sigma_{red\ max} = 171,30\ MPa$; m) dla $\alpha = 90^\circ$; n) dla $\alpha = 90^\circ$; $\sigma_{red\ max} = 176,50\ MPa$;

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono przebieg zmian naprężeń redukowanych σ_{red} wg hipotezy Hubera-Misesa oraz współczynnik koncentracji naprężeń k w zależności od współczynnika kształtu otworu eliptycznego K , jak i kąta nachylenia osi dłuższej otworu eliptycznego α .



Rys. 6. Przebieg zmian maksymalnego naprężenia redukowanego σ_{red} wg hipotezy Hubera-Misesa dla płyty z otworem eliptycznym przy jednoosiowym rozciąganiu siłą $P_z = 100$ kN.



Rys. 7. Przebieg zmian współczynnika koncentracji naprężeń k dla płyty z otworem eliptycznym przy jednoosiowym rozciąganiu siłą $P_z = 100$ kN.

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych (MES) można stwierdzić, że największa wartość maksymalnego naprężenia redukowanego $\sigma_{red\ max}$ wg hipotezy Hubera-Misesa wynosi $\sigma_{red\ max} = 176,5$ MPa (Rys. 5n i 6), a współczynnik koncentracji naprężeń k w tym przypadku wynosi $k = 11,13$ (Rys. 7), gdy oś dłuższa otworu eliptycznego jest nachylona pod kątem $\alpha = 90^\circ$ do osi z i współczynnik kształtu wynosi $K = 0,2$. Natomiast najmniejsza wartość maksymalnego naprężenia redukowanego $\sigma_{red\ max}$ wg hipotezy Hubera-Misesa wynosi $\sigma_{red\ max} = 67,70$ MPa (Rys. 5b i 6), a współczynnik koncentracji naprężeń k w tym przypadku wynosi $k = 1,44$ (Rys. 7), gdy oś dłuższa otworu eliptycznego jest nachylona pod kątem $\alpha = 0^\circ$ do osi z i współczynnik kształtu wynosi $K = 0,2$.

Geometria nieciągłości geometrycznej (otworu eliptycznego), współczynnik kształtu otworu K , jak i kąt nachylenia otworu mają istotny wpływ na rozkład naprężeń w płycie poddanej rozciąganiu. Znaczne wartości naprężenia redukowanego σ_{red} oraz współczynnika koncentracji

naprężeń k są z reguły przyczyną tworzenia się mikropęknięcia w strefie wierzchołka otworu eliptycznego. W przypadku obciążeń zmiennych (zmęczeniowych) mikropęknięcia zaczynają się rozwijać i w konsekwencji mogą doprowadzić do zniszczenia elementu maszyny lub elementu konstrukcji. W związku z powyższym, bardzo istotnym staje się wyznaczenie wartości i miejsca występowania koncentracji naprężenia w elementach maszyn zawierających przyczyny ich występowania.

5. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych obliczeń numerycznych dotyczących wpływu geometrii otworu eliptycznego na rozkład naprężeń w płycie przy jednoosiowym obciążeniu można sformułować następujące wnioski:

- Program numeryczny (MES) taki jak Femap umożliwia wyznaczenie naprężeń wywołanych w elemencie maszyny lub dowolnym miejscu w konstrukcji;
- Na stan naprężenia w płycie z otworem eliptycznym istotny wpływ ma zarówno sposób obciążenia płyty, jak i kąt nachylenia otworu oraz geometria otworu;
- Wartość maksymalnego naprężenia zredukowanego $\sigma_{red\ max}$ wg hipotezy Hubera-Misesa była równa $\sigma_{red\ max} = 176,5$ MPa przy obciążeniu $P_z = 100$ kN. Współczynnik koncentracji naprężeń k w tym przypadku wyniósł $k = 11,13$, oś dłuższa otworu eliptycznego była nachylona pod kątem $\alpha = 90^\circ$ do osi z , a współczynnik kształtu był równy $K_t = 0,2$;
- W przypadku płyty z otworem eliptycznym koncentracja naprężenia we wszystkich przypadkach powstaje w wierzchołku eliptycznego otworu;
- Zastosowanie do obliczeń numerycznych metody elementów skończonych umożliwiło dokładne zlokalizowanie stref spiętrzenia naprężeń w płycie z otworem eliptycznym przy różnym obciążeniu oraz pozwoliło wyznaczyć wartości naprężeń wokół otworu.

6. Literatura

- Babulal K. S., Vimalkannan I (2015) SCF on Isotropic Rectangular Plate with Central Circular Hole Using Finite Element Analysis, International Journal of Mechanical and Production Engineering, Vol 3 Issue 5, pp. 114-117.
- Budzyński A (2012) Krótki wstęp do zastosowania Metody Elementów Skończonych do numerycznych obliczeń inżynierskich, Warszawa, PWN.
- Gasiak G., Rozumek D (2004) ΔJ - integral range estimation for fatigue crack growth rate description. International Journal of Fatigue, Vol. 26, pp. 135-140.
- Gunwant D., Singh J. P (2013) Stress and Displacement Analysis of a Rectangular Plate with Central Elliptical Hole, International Journal of Engineering and Innovative Technology (IJEIT) Vol. 3, Issue 3, September, pp. 387-392.
- Rani S. A., Sireesha S. C (2014) Effect of orientation angle of elliptical hole in thermoplastic composite plate at different loads, International Journal of Computational Engineering Research (IJCER) Vol. 4 Issue 10, October, pp. 16-20.
- Robak G (2018) Analiza wpływu zmienności promienia fikcyjnego na trwałość zmęczeniową elementów z karbem, Opole, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie z. 481, s. 20.
- Tiwari A., Alyadwar K (2016) Stress Analysis of Plate with Elliptical Hole International Journal for Innovative Research in Science and Technology (IJIRST) Vol. 3 Issue 1, June, pp. 183-190.
- Patle B. C., Bhope D. V (2012) Evaluation of Stress Concentration Factors in Plate with Oblique Hole, Journal of Mechanical and Civil Engineering, Vol. 2 Issue 2, pp. 28-32.
- Sharma D. S (2011) Stress Concentration around Circular/Elliptical/Triangular Cutouts in Infinite Composite Plate, Proceedings of the World Congress on Engineering, Vol. 3
- Khechai A., Belarbi M. O., Tati A (2015) Finite Element Analysis of Stress Concentrations in Isotropic and Composite Plates with Elliptical Holes, Conference Paper in Lecture Notes in Control and Information Sciences, pp. 427-436.

Toubal L., Karama M., Lorrian B (2005) Stress Concentration in a Circular Hole in Composite Plate, Composite Structures, Vol. 8, pp. 31-36.

Konish H. J., Whitney J. M (1975) Approximate Stresses in an Orthotropic Plate Containing a Circular Hole, Journal of Composite Materials, Vol. 9, pp. 157-166.

Dhanjal S., Arora R (2015) Stress Analysis of a Rectangular Plate with Circular Hole Using Three Dimensional Finite Element Model, International Journal Engineering Business and Enterprise Applications, Vol. 1 Issue 12, pp. 77-80.

<http://www.mssoftware.com/page/msc-nastran-student-edition>.

<https://www.mesco.com.pl/index.php?lang=pl>.

<http://zarembski.com/mes/mes.php>.

<http://www.gmsystem.pl/femap/>.

<http://docplayer.pl/793864-Wprowadzenie-do-metody-elementu-skonczonego.html>.

4. Przykłady badań numerycznych wpływu nieciągłości geometrycznych na rozkład naprężeń w płycie przy różnych warunkach obciążenia

Examples of numerical research of the influence of the geometric discontinuities on stress distribution in a plate with a various load conditions

Mateusz Marcin Konieczny

Katedra Mechaniki i Podstaw Konstrukcji Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Opolska
Opiekun naukowy: Grzegorz Gasiak

Konieczny Mateusz: mateuszmarcinkonieczny@wp.pl

Słowa kluczowe: otwór, metoda elementów skończonych (MES), naprężenie, współczynnik kształtu, współczynnik koncentracji naprężeń

Streszczenie

W pracy przedstawiono wybrane badania dotyczące numerycznej analizy wpływu koncentratorów naprężeń w postaci nieciągłości geometrycznej tj. otworu kołowego, eliptycznego, kwadratowego, prostokątnego oraz szczeliny płaskiej na rozkład naprężeń w płycie poddanej różnym wariantom obciążenia (obciążenie wzdłużne oraz obciążenie w płaszczyźnie płyty). W pracach przedstawiono rozwiązania dotyczące wpływu współczynnika kształtu otworu, powierzchni otworu oraz kąta nachylenia otworu na rozkład naprężeń w prostokątnej izotropowej płycie. Do obliczeń wykorzystano między innymi takie programy jak Franc 2dl, Femap i ANSYS. Są to programy do zaawansowanych obliczeń numerycznych metodą elementów skończonych (MES). Programy te wykorzystują szereg zaawansowanych i uniwersalnych technologii umożliwiających szybkie, wydajne oraz proste przygotowanie modelu obliczeniowego kompatybilnego z dowolnymi środowiskami obliczeniowymi, stosowanymi przez inżynierów.

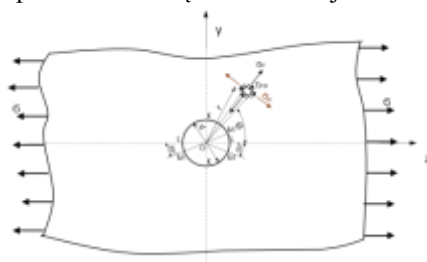
1. Wstęp i opis zagadnienia

Umiejętność analizy stanu naprężenia i odkształcenia w danej konstrukcji, jej elementu lub określonego w tym elemencie punktu, odgrywa podstawową rolę w analizie wytrzymałościowej. Rozwój technologii i polepszenie niezawodności maszyn i konstrukcji, zmusiła konstruktorów do dokładniejszego analizowania zjawisk, jakie mają miejsce w punktach newralgicznych dla maszyn oraz konstrukcji, a które mogą mieć bezpośredni wpływ na ich trwałość. O ile, w niektórych przypadkach elementarne metody wytrzymałości materiałów wystarczają do określenia tych zjawisk, o tyle, gdy w grę wchodzi bardziej dokładne analizy stanu naprężenia wokół obszarów spiętrzenia naprężeń i mechaniki pękania, metody te nie są wystarczające. Wpływ na trwałość zmęczeniową mają między innymi takie czynniki jak geometria elementów, rodzaj materiału, typ obciążenia (stan naprężenia i odkształcenia) oraz wiele innych (Surma 2007). Przewidywanie czasu pracy elementów konstrukcyjnych poddanych obciążeniom zmiennym pozwala na uniknięcie poważnych skutków awarii zarówno w aspekcie ekonomicznym, jak i bezpieczeństwa użytkowników. Jednym z najważniejszych czynników wpływającym na trwałość jest występowanie w elemencie konstrukcyjnym koncentratorów naprężenia, tzn. korbów zarówno strukturalnych wynikających z niejednorodności materiału, jak i geometrycznych związanych ze zmianą kształtu (geometrii) elementu (Robak 2018).

Prezentowany artykuł ma na celu przedstawienie kilku wybranych zagadnień dotyczących numerycznej analizy wpływu nieciągłości geometrycznej na rozkład naprężeń w płycie poddanej różnym wariantom obciążenia.

2. Przegląd literatury

Powszechnie przyjęto, że jako pierwszy analizę stanu naprężenia wokół koncentratora naprężeń w postaci otworu dokonał Kirsch w 1898. Autor przyjął szeroką tarczę znajdującą się w warunkach jednoosiowego rozciągania. Stan naprężenia tarczy jest stanem jednorodnym. Jeżeli w tarczy istnieje otwór, którego średnica jest stosunkowo mała w porównaniu z szerokością tarczy (Rys. 1), istnienie czynnika spiętrzającego (otworu) wpływa istotnie na charakter stanu naprężenia tarczy. Stan ten staje się niejednorodny i przestaje być jednoosiowy. Naprężenia w pobliżu otworu nie mogą być określone przy pomocy zwykłych metod wytrzymałości materiałów. Zagadnienie to badacz rozwiązał przy pomocy teorii sprężystości przy założeniu, że długość i szerokość tarczy są nieograniczenie wielkie, a otwór posiada średnicę o skończonej wielkości d .



Rys. 1 Szeroka tarcza z otworem kołowym w przypadku rozciągania.

Na ściankach elementu tarczy naprężenia obwodowe σ_θ , promieniowe σ_r oraz styczne $\tau_{r\theta}$ mogą być obliczone w zależności od współrzędnych biegunowych r i θ elementu przy pomocy równań (Timoshenko i Goodier 1951):

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} \sigma \left[1 + \frac{d^2}{4r^2} - \left(1 + \frac{3d^4}{16r^4} \right) \cos 2\theta \right]; \quad (1)$$

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \sigma \left(1 - \frac{d^2}{4r^2} \right) \left[1 + \left(1 - \frac{3d^2}{4r^2} \right) \cos 2\theta \right]; \quad (2)$$

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2} \sigma \left(1 - \frac{d^2}{4r^2} \right) \left(1 + \frac{3d^2}{4r^2} \right) \sin 2\theta; \quad (3)$$

przy czym σ - naprężenie rozciągające na krawędziach tarczy; σ_θ - naprężenie obwodowe; σ_r - naprężenie promieniowe; $\tau_{r\theta}$ - naprężenie styczne; d - promień otworu; r - odległość elementarnego wycinka tarczy od otworu.

Do rozwiązywania problemów związanych z płytami, w których występują koncentratory naprężeń, stosuje się najczęściej nowe podejście za pomocą metod numerycznych przy wykorzystaniu metod elementów skończonych (MES). Programy numeryczne umożliwiają rozwiązywanie skomplikowanych zadań z dużą dokładnością. Programy te wykorzystują szereg zaawansowanych i uniwersalnych technologii, umożliwiających szybkie, wydajne oraz proste przygotowanie modelu obliczeniowego kompatybilnego z dowolnymi środowiskami obliczeniowymi, stosowanymi przez inżynierów (<http://www.gmsystem.pl/femap/>).

2.1 Opis stanu naprężenia w płycie z otworem kołowym i eliptycznym przy jednoosiowym obciążeniu

W literaturze najczęściej podejmowane jest zagadnienie związane z analizą stanu naprężenia w płytach, w których występują koncentratory naprężeń w postaci otworów kołowych, kwadratowych, prostokątnych oraz eliptycznych poddanych jednoosiowemu obciążeniu.

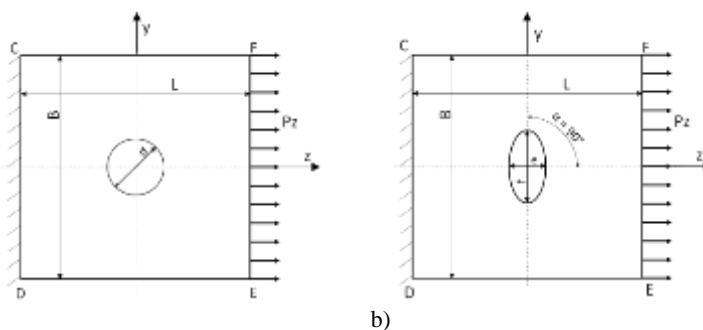
Autorzy pracy (Handa i Dondapati 2017) przeprowadzili analizę stanu naprężenia w płycie z centralnym otworem kołowym oraz otworem eliptycznym poddanej jednoosiowemu rozciąganiu wzdłuż osi z . Do analizy przyjęto płytę o wymiarach: długość $L = 100$ mm, szerokość $B = 50$ mm, grubość $g = 5$ mm, średnica otworu kołowego $d = 5$ mm, $d = 10$ mm, $d = 15$ mm, $d = 20$ mm, $d = 25$ mm, dłuższa oś otworu eliptycznego $f = 5$ mm, $f = 10$ mm, $f = 15$ mm, $f = 20$ mm, $f = 25$ mm. Płytę wykonano ze stali konstrukcyjnej, gdzie moduł Younga wynosi $E = 200$ GPa, a liczba Poissona $\nu =$

0,3. Płytę poddano jednoosiowemu rozciąganiu siłą $P_z = 1000$ N. W obu przypadkach badaną próbkę zamocowano na boku CD , bok EF obciążono, a boki DE i FC były swobodne (Rys. 2). Obliczenia realizowano za pomocą programu numerycznego ANSYS. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń uzyskano wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych $\sigma_{red\ max}$ oraz współczynnika koncentracji naprężeń zredukowanego k (Rys. 7a).

Wielkość koncentracji naprężeń spowodowana występowaniem nieciągłości geometrycznej w każdym ciele mierzona jest przez współczynnik koncentracji naprężeń k , który jest określany i podawany przez uogólnioną zależność (Konish i inni 1975):

$$k = \frac{\sigma_{red\ max}}{\sigma_{red\ nom}}, \quad (4)$$

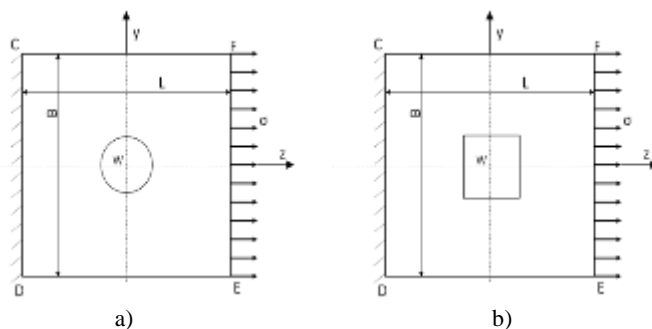
gdzie: k - współczynnik koncentracji naprężeń [-]; $\sigma_{red\ max}$ - maksymalne naprężenie zredukowane [MPa]; $\sigma_{red\ nom}$ - naprężenie zredukowane nominalne występujące w tarczy bez otworu [MPa].



Rys. 2 Geometria oraz warunki brzegowe: a) płyty z centralnym otworem kołowym; b) płyty z centralnym otworem eliptycznym przy jednoosiowym rozciąganiu siłą $P_z = 100$ kN.

2.2 Opis stanu naprężenia w płycie z otworem kołowym i kwadratowym przy jednoosiowym obciążeniu

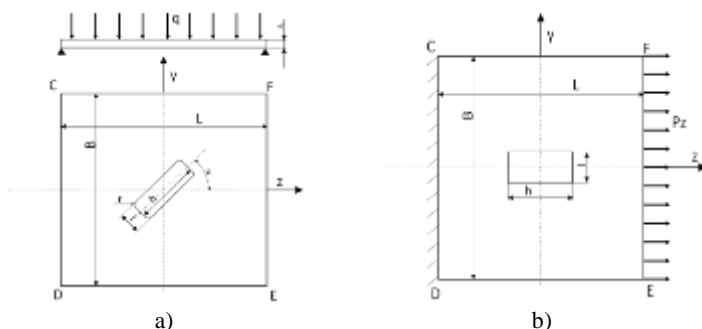
Autorzy pracy (Gokul i Kuriakose 2017) przeprowadzili analizę stanu naprężenia w płycie z centralnym otworem kołowym oraz otworem kwadratowym poddanej jednoosiowemu rozciąganiu wzdłuż osi z. Do analizy przyjęto płytę o wymiarach: długość $L = 400$ mm, szerokość $B = 100$ mm, grubość $g = 10$ mm, powierzchnia otworu kołowego oraz kwadratowego $W = 78,53$ mm², $W = 314,15$ mm², $W = 706,85$ mm², $W = 1256,63$ mm², $W = 1963,49$ mm². Płytę wykonano ze stali konstrukcyjnej, gdzie moduł Younga wynosi $G = 200$ GPa, a liczba Poissona $\nu = 0,3$. Płytę poddano jednoosiowemu rozciąganiu naprężeniem o wartości $\sigma = 10$ MPa (Rys. 4). W obu przypadkach badaną próbkę zamocowano na boku CD , bok EF obciążono, a boki DE i FC były swobodne (Rys. 3). Obliczenia realizowano za pomocą programu numerycznego ANSYS. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń uzyskano wartości maksymalnych naprężeń zredukowanych $\sigma_{red\ max}$ oraz współczynnika koncentracji naprężenia zredukowanego k , który wyznaczono ze związku (4) (Rys.7b).



Rys. 3 Geometria oraz warunki brzegowe: a) płyty z centralnym otworem kołowym; b) płyty z centralnym otworem kwadratowym przy jednoosiowym rozciąganiu naprężeniem $\sigma = 10$ MPa.

2.3 Opis stanu naprężenia w płycie z otworem prostokątnym przy jednoosiowym obciążeniu

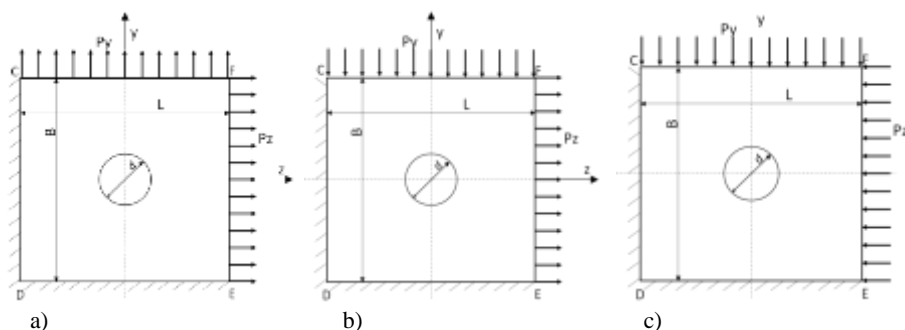
W pracy (Nikolić i inni 2011) autorzy przeprowadzili analizę stanu naprężenia w płycie z centralnym otworem prostokątnym poddanej jednoosiowemu obciążeniu. W tym przypadku analizowano wpływ kąta nachylenia nieciągłości geometrycznej α : $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 30^\circ$, $\alpha = 60^\circ$, $\alpha = 90^\circ$ do osi z na rozkład naprężeń w płycie. Do analizy przyjęto płytę o wymiarach: długość $L = 2000$ mm, szerokość $B = 5000$ mm, grubość $g = 100$ mm, długość otworu $l = 100$ mm, szerokość otworu $b = 20$ mm, promień zaokrąglenia kątów otworu $r = 6$ mm. Płytę wykonano ze stali, gdzie moduł Younga wynosi $E = 210$ GPa, a liczba Poissona $\nu = 0,33$. Płytę poddano obciążeniu ciśnieniem na całej powierzchni o wartości $q = 1$ MPa. Badaną próbkę swobodnie podparto na bokach CD , DE , EF oraz FC (Rys. 4a). W drugiej pracy (Watsar i Bharule 2014) analizowano wpływ współczynnika kształtu l/h otworu prostokątnego: $l/h = 3$, $l/h = 4$, $l/h = 5$ na rozkład naprężeń w płycie. Do analizy przyjęto płytę o wymiarach: długość $L = 200$ mm, szerokość $B = 100$ mm, grubość $g = 5$ mm. Płytę wykonano z żywicy epoksydowej, gdzie moduł Younga wynosi $E = 27$ GPa, a liczba Poissona $\nu = 0,33$. Płytę poddano jednoosiowemu rozciąganiu siłą o wartości $P_z = 981$ N. Badaną próbkę zamocowano na boku CD , bok EF obciążono, a boki DE i FC były swobodne (Rys. 4b). W obu pracach obliczenia realizowano za pomocą programu numerycznego ANSYS. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń uzyskano wartości maksymalnych naprężeń redukowanych $\sigma_{red\ max}$ oraz współczynnika koncentracji naprężeń k , który wyznaczono ze związku (4) (Rys. 7c i 7d).



Rys. 4 Geometria oraz warunki brzegowe płyty z centralnym otworem prostokątnym poddanej obciążeniu: a) ciśnieniem $q = 1$ MPa na całej powierzchni płyty; b) siłą rozciągającą $P_z = 981$ N.

2.4 Opis stanu naprężenia w płycie z otworem kołowym przy dwuosiowym obciążeniu

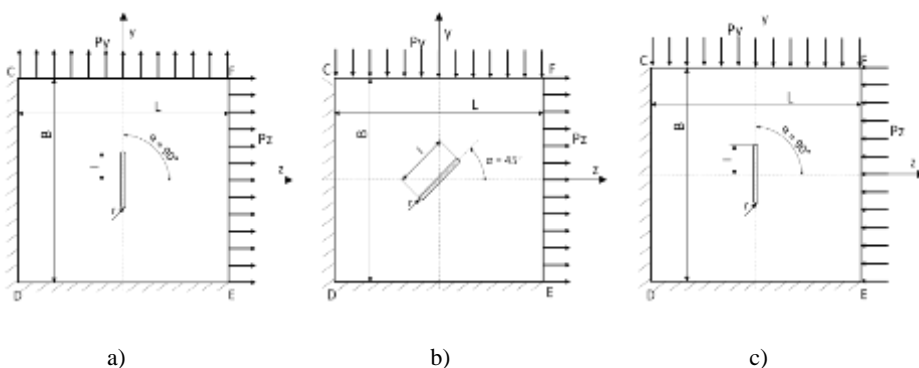
Podejście numeryczne do analizy płyt z nieciągłością geometryczną zaproponował również autor pracy (Konieczny 2018) przeprowadzając analizę stanu naprężenia w płycie z centralnym otworem kołowym poddanej dwuosiowemu obciążeniu wzdłuż osi z i y . Do analizy przyjęto płytę o wymiarach: długość $L = 300$ mm, szerokość $B = 300$ mm, grubość $g = 10$ mm, średnica otworu $d = 50$ mm. Płytę wykonano ze stali S235JR, gdzie moduł Younga wynosi $E = 200$ GPa, a liczba Poissona $\nu = 0,3$ (Rys. 5). Płytę poddano dwuosiowemu rozciąganiu siłą o wartości $P_z = 600$ kN i $P_y = 600$ kN (Rys. 5a); rozciąganiu i ścisnaniu (przypadek czystego ścinania) siłą o wartości $P_z = 600$ kN i $P_y = -600$ kN (Rys. 5b) oraz dwuosiowemu ścisnaniu siłą o wartości $P_z = -600$ kN i $P_y = -600$ kN (Rys. 5c). W tym przypadku badaną próbkę zamocowano na bokach CD i DE . Obliczenia realizowano za pomocą programu numerycznego Franc 2dI. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń uzyskano wartości maksymalnych naprężeń redukowanych $\sigma_{red\ max}$ oraz współczynnika koncentracji naprężenia redukowanego k , który wyznaczono z zależności (4) (Rys. 7e).



Rys. 5 Geometria oraz warunki brzegowe płyty z centralnym otworem kołowym przy dwuosiowym obciążeniu: a) dwuosiowe rozciąganie siłą $P_z = 600$ kN, $P_y = 600$ kN; b) czyste ścinanie siłą $P_z = 600$ kN, $P_y = -600$ kN; c) dwuosiowe ściskanie siłą $P_z = -600$ kN, $P_y = -600$ kN.

2.5 Opis stanu naprężenia w płycie ze szczeliną płaską przy dwuosiowym obciążeniu

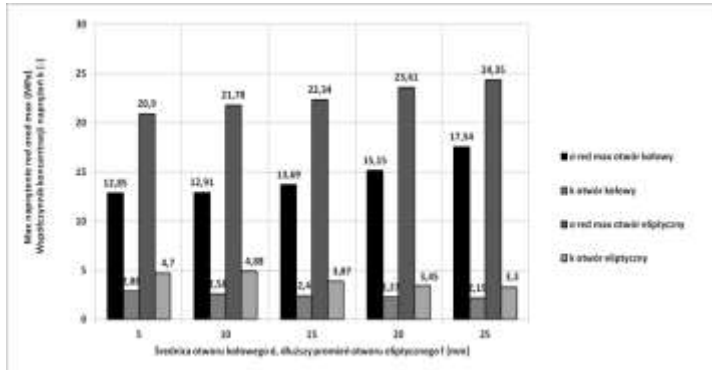
Prezentowane wcześniej opisy stanu naprężenia umożliwiły wyznaczenie wartości maksymalnego naprężenia redukowanego $\sigma_{red\ max}$ wg hipotezy Hubera - Misesa oraz wartości współczynnika koncentracji naprężeń k najczęściej w płytach z otworami kołowymi, kwadratowymi, prostokątnymi oraz eliptycznymi przy jednoosiowym obciążeniu. W pracy (Konieczny i Gasiak 2018) autorzy przeprowadzili analizę wpływu geometrii szczeliny płaskiej nachylonej pod kątem $\alpha = 90^\circ$ do osi z oraz pod kątem $\alpha = 45^\circ$ do osi z na rozkład naprężeń w płycie poddanej dwuosiowemu obciążeniu. Do obliczeń numerycznych przyjęto płytę wykonaną ze stali S235JR, gdzie moduł Younga wynosi $E = 200$ GPa oraz liczba Poissona wynosi $\nu = 0,3$. Przyjęto następujące wymiary płyty ze szczeliną płaską: długość $L = 300$ mm, szerokość $B = 300$ mm, grubość $g = 10$ mm, długość szczeliny $l = 40$ mm, promień wierzchołka szczeliny $r = 1$ mm, szerokość szczeliny $c = 2$ mm. Przyjęto następujące warunki brzegowe: płytę zamocowano przegubowo na bokach CD i DE (Rys. 6). Płytę ze szczeliną płaską poddano obciążeniu dwuosiowemu w postaci: dwuosiowego rozciągania wzdłuż osi z i y siłą $P_z = 300$ kN i $P_y = 300$ kN (Rys. 6a); rozciąganiu i ściskaniu wzdłuż osi z i y siłą $P_z = 300$ kN i $P_y = -300$ kN (Rys. 6b); dwuosiowemu ściskaniu wzdłuż osi z i y siłą $P_z = -300$ kN i $P_y = -300$ kN (Rys. 6c). Obliczenia realizowano za pomocą programu numerycznego Femap. W pracy zastosowano element skończony przestrzenny sześciokątny o ośmiu węzłach w narożach. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń uzyskano wartości maksymalnych naprężeń redukowanych $\sigma_{red\ max}$ oraz współczynnika koncentracji naprężenia redukowanego k , który wyznaczono ze związku (4) (Rys.7f).



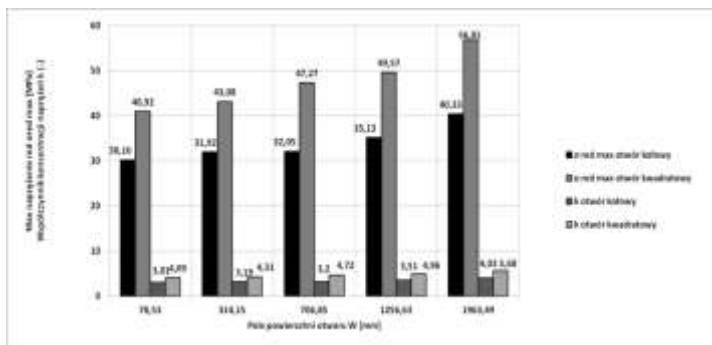
Rys. 6 Geometria oraz warunki brzegowe płyty ze szczeliną płaską przy dwuosiowym obciążeniu: a) dwuosiowe rozciąganie siłą $P_z = 300$ kN, $P_y = 300$ kN; b) czyste ścinanie siłą $P_z = 300$ kN, $P_y = -300$ kN; c) dwuosiowe ściskanie siłą $P_z = -300$ kN, $P_y = -300$ kN.

3. Wyniki i dyskusja

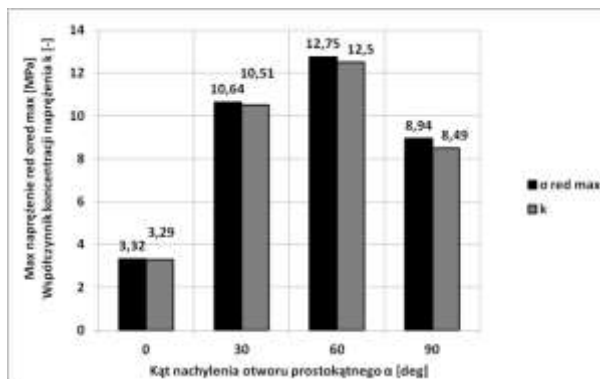
Na rysunku 7 przedstawiono przebieg zmian maksymalnego naprężenia redukowanego $\sigma_{red\ max}$ wg hipotezy Hubera -Misesa oraz współczynnika koncentracji naprężeń k dla płyt z otworem kołowym, eliptycznym, kwadratowym, prostokątnym oraz ze szczeliną płaską przy jednoosiowym oraz dwuosiowym obciążeniu.



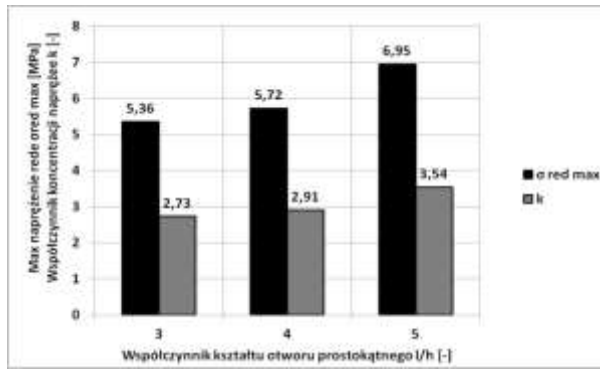
a)



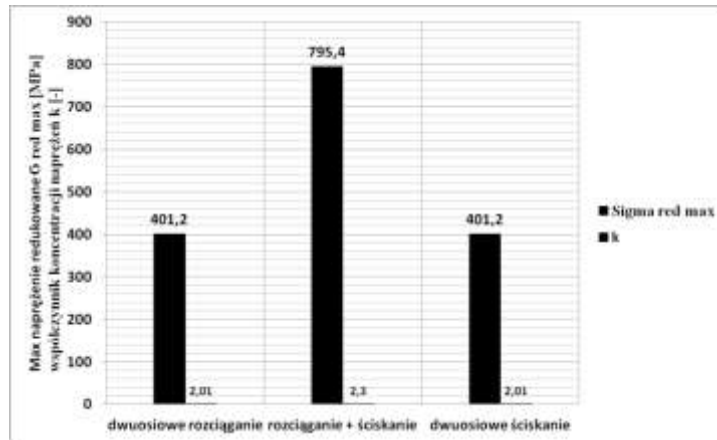
b)



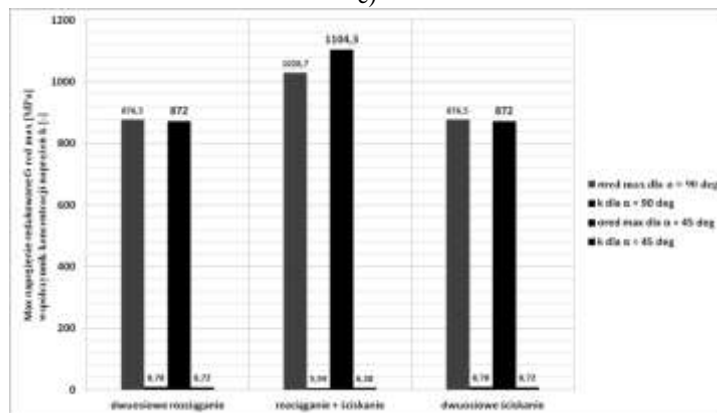
c)



d)



e)



f)

Rys. 7 Przebieg zmian maksymalnego naprężenia zredukowanego $\sigma_{red\ max}$ oraz współczynnika koncentracji naprężeń k : a) dla płyty z otworem kołowym oraz eliptycznym przy jednoosiowym rozciąganiu siłą $P_z = 100\ kN$; b) dla płyty z otworem kołowym oraz kwadratowym przy jednoosiowym rozciąganiu naprężeniem $\sigma = 10\ MPa$; c) dla płyty z otworem prostokątnym obciążonej ciśnieniem $q = 1\ MPa$ na całej powierzchni płyty; d) dla płyty z otworem prostokątnym przy jednoosiowym rozciąganiu siłą $P_z = 981\ N$; e) dla płyty z otworem kołowym poddanej dwuosiowemu rozciąganiu siłą $P_z = 600\ kN$, $P_y = 600\ kN$, dwuosiowemu ściskaniu siłą $P_z = -600\ kN$, $P_y = -600\ kN$ oraz czystemu ścinaniu siłą $P_z = 600\ kN$, $P_y = -600\ kN$; f) dla płyty ze szczeliną płaską poddanej dwuosiowemu rozciąganiu siłą $P_z = 600\ kN$, $P_y = 600\ kN$, dwuosiowemu ściskaniu siłą $P_z = -600\ kN$, $P_y = -600\ kN$ oraz czystemu ścinaniu siłą $P_z = 600\ kN$, $P_y = -600\ kN$.

Opis stanu naprężenia dotyczy płyt, w których występują nieciągłości geometryczne w postaci otworów kołowych, eliptycznych, kwadratowych, prostokątnych oraz szczelin. Na stan naprężenia w płycie z nieciągłością geometryczną istotny wpływ ma zwłaszcza kształt nieciągłości geometrycznej, ale również sposób obciążenia płyty, jak i kąt nachylenia osi nieciągłości w stosunku do obciążenia. Gdy w płycie występuje nieciągłość geometryczna w postaci otworu kołowego oraz eliptycznego (Handa i Dondapati 2017), maksymalne naprężenie zredukowane $\sigma_{red\ max}$ wynosi $\sigma_{red\ max} = 26,35$ MPa przy obciążeniu $P_z = 100$ kN, gdy płyta jest osłabiona otworem eliptycznym, gdzie oś dłuższa elipsy wynosi $f = 25$ mm, a współczynnik koncentracji naprężeń k wynosi $k = 3,30$. W przypadku, gdy w płycie występuje otwór kołowy i kwadratowy (Gokul i Kuriakose 2017), maksymalne naprężenie zredukowane $\sigma_{red\ max}$ wynosi $\sigma_{red\ max} = 56,81$ MPa przy obciążeniu $\sigma = 10$ MPa, gdy w płycie występuje otwór kwadratowy o polu powierzchni $W = 1963,49$ mm². Natomiast współczynnik koncentracji naprężeń k wynosi $k = 5,68$. W kolejnym analizowanym przypadku, gdy w płycie występuje otwór prostokątny (Nikolić i inni 2011) stwierdzono, że wartość maksymalnego naprężenia zredukowanego $\sigma_{red\ max}$ wynosi $\sigma_{red\ max} = 12,75$ MPa przy obciążeniu $q = 1$ MPa, gdy nieciągłość geometryczna jest nachylona pod kątem $\alpha = 60^\circ$ do osi z , a współczynnik koncentracji naprężeń k wynosi $k = 12,50$. Natomiast w opisie stanu naprężenia w płycie z otworem prostokątnym zaproponowanym przez autorów pracy (Watsar i Bharule 2014) stwierdzono, że wartość maksymalnego naprężenia zredukowanego $\sigma_{red\ max}$ wynosi $\sigma_{red\ max} = 6,95$ MPa przy obciążeniu $P_z = 981$ N, gdy współczynnik kształtu nieciągłości geometrycznej l/h wynosi $l/h = 5$, a współczynnik koncentracji naprężeń k wynosi $k = 3,54$. W sytuacji, gdy w płycie znajduje się otwór kołowy (Konieczny 2018) lub szczelina płaska (Konieczny i Gasiak 2018), a płyta jest poddana dwuosłowemu obciążeniu największa koncentracja naprężenia zredukowanego występuje w przypadku rozciągania i ściskania (czyste ścinanie). Dla płyty z otworem kołowym maksymalne naprężenie zredukowane $\sigma_{red\ max}$ wyznaczone wg hipotezy Hubera-Misesa wynosi $\sigma_{red\ max} = 795,4$ MPa, gdy płyta jest poddana rozciąganiu i ściskaniu siłą $P_z = 600$ kN i $P_y = -600$ kN, a współczynnik koncentracji naprężeń k wynosi $k = 2,30$ ($d = 50$ mm). Natomiast dla płyty ze szczeliną płaską maksymalne naprężenie zredukowane $\sigma_{red\ max}$ wynosi $\sigma_{red\ max} = 1104,3$ MPa, gdy szczelina płaska nachylona jest pod kątem $\alpha = 45^\circ$ do osi z , a płyta poddana jest rozciąganiu i ściskaniu siłą $P_z = 300$ kN i $P_y = -300$ kN, a współczynnik koncentracji naprężeń k dla tego przypadku jest równy $k = 6,38$. Zrozumienie zjawiska powstawania i rozwoju pęknięć zmęczeniowych umożliwia optymalny dobór geometrii części maszyn bądź elementów konstrukcyjnych, w których konieczność technologiczna lub konstrukcyjna wymusiła powstanie określonych nieciągłości geometrycznych w materiale, w wyniku których podczas eksploatacji następować będzie koncentracja naprężeń. Zastosowanie do obliczeń programów numerycznych takich jak np. Franc 2dl, ANSYS czy Femap umożliwia określenie stref spiętrzenia naprężeń wywołanych w elemencie maszyny lub dowolnym miejscu w konstrukcji.

4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonej analizy wybranych badań numerycznych dotyczących wpływu nieciągłości geometrycznej na rozkład naprężeń w płycie przy różnych wariantach obciążenia można sformułować następujące wnioski:

- a) Zrozumienie zjawiska powstawania i rozwoju pęknięć zmęczeniowych umożliwia optymalny dobór geometrii części maszyn bądź elementów konstrukcyjnych, w których konieczność technologiczna lub konstrukcyjna wymusiła powstanie określonych nieciągłości geometrycznych w materiale, w wyniku których podczas eksploatacji następować będzie koncentracja naprężeń;
- b) Odpowiednia optymalizacja kształtu otworów, przejść pomiędzy zmieniającymi się przekrojami materiału przy zmieniających się warunkach obciążenia umożliwia uniknięcie uszkodzeń oraz zniszczeń części maszyny bądź elementu konstrukcji podczas eksploatacji;
- c) Programy numeryczne takie jak np. Franc 2dl, ANSYS czy Femap umożliwiają określenie stref spiętrzenia naprężeń wywołanych w elemencie maszyny lub dowolnym miejscu w konstrukcji;

- d) Na stan naprężenia w płycie z nieciągłością geometryczną istotny wpływ ma zwłaszcza kształt nieciągłości geometrycznej, ale również sposób obciążenia płyty, jak i kąt nachylenia osi nieciągłości w stosunku do obciążenia;
- e) Zastosowanie do obliczeń numerycznych metody elementów skończonych (MES) umożliwia dokładne zlokalizowanie stref spiętrzenia naprężeń w płycie z nieciągłością geometryczną w postaci otworu kołowego, eliptycznego, prostokątnego oraz szczeliny płaskiej przy różnych wariantach obciążenia oraz pozwala wyznaczyć wartości naprężeń wokół tych nieciągłości.

5. Literatura

- Kirsche E (1898) Die theorie der elastizitat und die bedurfnisse der festigkeitslehre, Zeitschrift des Vereines Deuccher Ingenieure, pp. 797-807.
- Timoshenko S.P., Goodier J.N (1951) Theory of elasticity. McGraw-Hill, New York: 575.
- Gasiak G., Rozumek D (2004) ΔJ - integral range estimation for fatigue crack growth rate description. International Journal of Fatigue, Vol. 26, pp. 135-140.
- Konieczny M (2018) Analiza wpływu otworu na rozkład naprężeń w szerokiej tarczy przy dwuosiowym obciążeniu, Badania i Rozwój Młodych Naukowców w Polsce, Materiały Konferencyjne, Wrocław, s. 50.
- Watsar S. D., Bharule A (2015) Stress Analysis of Finite Plate with Special Shaped Cutout, International Journal of Scientific Engineering and Research Vol. 3 Issue 4 20, pp. 145-150.
- Nikolić V., Dolicanin Ć., Radojković M (2011) Application of Finite Element Analysis of Thin Steel Plate with Holes, Technical Gazette Vol. 18 Issue 1, pp. 57-62.
- Handa D., Dondapati R. S (2017) Invesigation on the Stress Concentration in Metallic Flat Plates Due to Holes witch Different Configurations, International Journal of Mechanical Engineering and Technology Vol 8 Issue 7, pp. 1718-1725.
- Robak G (2018) Analiza wpływu zmienności promienia fikcyjnego na trwałość zmęczeniową elementów z karbem, Opole, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Studia i Monografie z. 481, s. 20.
- Gokul P. V., Kuriakose B (2017) Numerical Analysis of Thin Plates with Holes, Applied Mechanics and Materials Vol. 857, pp. 154-158.
- Konieczny M., Gasiak G (2018) Stan naprężenia w płycie ze szczeliną przy dwuosiowym obciążeniu, XXVII Sympozjum Zmęczenie i Mechanika Pękania, Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, ss. 35-36.
- Surma M (2007) Analiza numeryczna stanu naprężenia wokół otworu w płycie poddanej dwuosiowemu obciążeniu, Praca dyplomowa, Politechnika Opolska.
- Konish H. J., Whitney J. M (1975) Approximate Stresses in an Orthotropic Plate Containing a Circular Hole, Journal of Composite Materials, Vol. 9, pp. 157-166.
- <http://www.gmsystem.pl/femap/>.

5. Odporność wielowirnikowych statków powietrznych na wyładowania atmosferyczne

Resistance of multi-rotor aircraft on lightning

Kossowski Tomasz

Katedra Elektrotechniki i Podstaw Informatyki, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Rzeszowska

Kossowski Tomasz: t.kossowski@gmail.com

Słowa Kluczowe: awionika, dron, wyładowania, przepięcia

Streszczenie

Przedmiotem badań była analiza wpływu bezpośrednich oraz pośrednich wyładowań atmosferycznych na wielowirnikowe statki powietrzne nazywane potocznie dronami. Rosnąca popularność w różnych aspektach życia, od zastosowań militarnych, naukowych do rozrywki i zadań w przemyśle sprawiła, że pracują one w różnych warunkach atmosferycznych (Divya 2017). Pojawiła się więc konieczność przeprowadzenia badań związanych z odpornością wielowirnikowych statków powietrznych na zakłócenia powstające podczas wyładowań atmosferycznych. Istotą było przebadanie różnych modeli zarówno jako całych maszyn jak i ich poszczególnych podzespołów. Celem było uzyskanie odpowiedzi na pytanie na ile bezpieczne są takie urządzenia podczas lotu w sąsiedztwie przebiegającego frontu burzowego. Badania przeprowadzono w laboratorium Politechniki Rzeszowskiej zajmującym się badaniem awioniki pod kątem odporności na zakłócenia elektromagnetyczne powstające podczas wyładowań piorunowych.

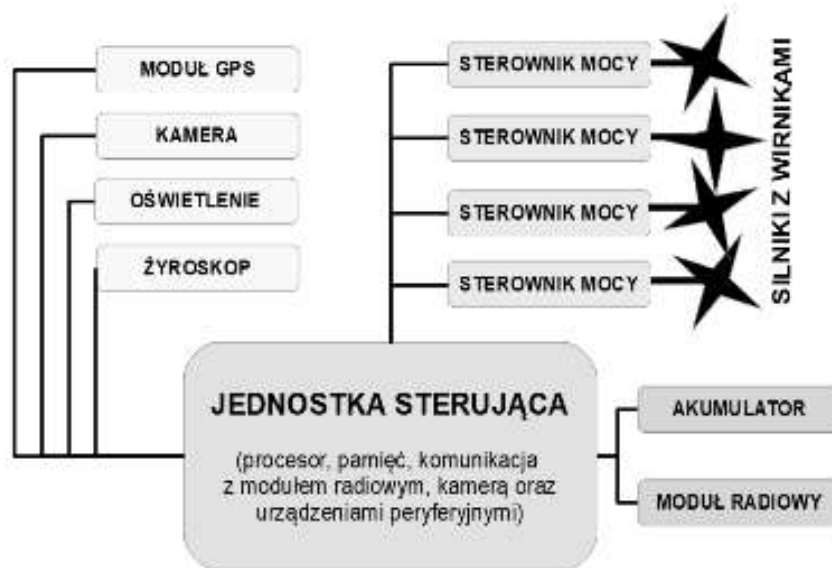
1. Wstęp

Bezzałogowe statki powietrzne rozwinęły się znacząco na przestrzeni ostatnich lat. Od bardzo prostych maszyn zdalnie sterowanych urosły do rangi maszyn całkowicie bezobsługowych, potrafiących samodzielnie pokonywać duże odległości na bardzo zróżnicowanych pułapach. Ich wyposażenie również stało się bardzo bogate, od kamer wizyjnych, poprzez detektory podczerwieni, lasery pomiarowe, systemy przekaźnikowe, moduły GPS oraz wiele innych, zależnych od zastosowań konkretnej maszyny (Divya 2017). Tak duża złożoność oraz możliwość pracy w różnych dziedzinach życia sprawiła, że mogą zdarzyć się sytuacje, w których drony poruszają się podczas burzy lub jej pobliżu. Wiąże się to z oczywistym pytaniem, czy ich konstrukcja pozwala im na bezpieczne wykonywanie takich przelotów. Jak dokładnie zbudowane są te maszyny i czy posiadają zabezpieczenia przez zakłóceniami mogącymi indukować się w ich obwodach? Czy są narażone na działanie wyładowań atmosferycznych i co stanie się zarówno podczas bezpośredniego uderzenia w maszynę jak i podczas wyładowania w jej pobliżu? Nie znaleziono bezpośrednich badań związanych z ochroną przepięciową awioniki bezzałogowych statków powietrznych, poza bezpośrednimi wyładowaniami z generatora wysokich napięć. Wiadome jest już, że bezpośrednie narażenie tak niewielkiej konstrukcji na napięcie rzędu kilkuset tysięcy volt sprawia, że dron zostaje całkowicie zniszczony (Bartlett 2017). Nie wiadomo jednak jak prezentują się przebiegi czasowe prądów oraz napięć w podczas takiego wyładowania oraz czy niebezpośrednie wyładowanie będzie skutkowało podobnymi wynikami eksperymentu. Na te pytania starano się odpowiedzieć w ramach niniejszego artykułu. Osobnym aspektem są symulacje komputerowe (Shai 2017), jednakże nic nie zastąpi pomiarów rzeczywistego modelu.

2. Materiał i Metody

Budowa wielowirnikowych statków powietrznych jest zasadniczo zbliżona do siebie. Należy jednak podkreślić, że chodzi tu o podobieństwo związane z budową podstawowych elementów składowych. Przykład najpopularniejszej konstrukcji przedstawiono na rysunku 1. Poszczególne

modele mogą znacząco różnić się budową jednostki centralnej, zarządzającej całą maszyną, a w szczególności ilością oraz rodzajem podzespołów peryferyjnych takich jak kamery, detektory, urządzenia pomiarowe, systemy komunikacji. Nie zmienia to jednak faktu, że cechą charakterystyczną jest budowa oparta o płytę centralną oraz gwieżdziste połączenie różnych peryferiów. Taka topologia oznacza, że każde zakłócenie wyindukowane w obwodach najprawdopodobniej będzie przechodzić przez elektronikę sterującą.

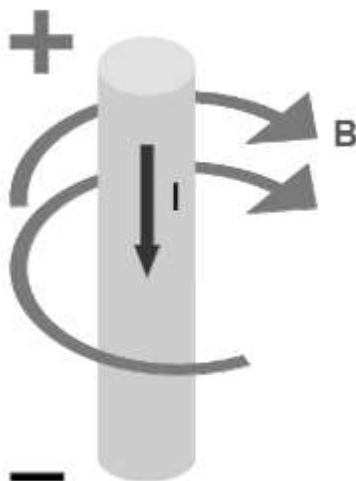


Rys. 1. Schemat blokowy budowy wielowirnikowego statku powietrznego.

Zakłóceniami jakie mogą się generować w obwodach dronów są przepięcia wywołane silnym polem elektromagnetycznym pochodzącym od wyładowań atmosferycznych. Powstają one podczas przepływu bardzo dużego (liczonego w dziesiątkach lub setkach kiloamper) udaru prądowego w postaci wirowego pola magnetycznego. Ideę pokazano na rysunku 2. Odporność na tego typu zakłócenia posiadają obiekty ekranowane (Rusek 1997). Ze względu na jak najmniejszą masę konstrukcji drona, w jego budowie nie uwzględniono ekranów a sama obudowa wykonana z tworzywa sztucznego, które również nie stanowi bariery dla zakłóceń elektromagnetycznych. Brak metalowego poszycia sprawia również, że potencjalne wyładowanie atmosferyczne bezpośrednio w maszynę przepłynie przez wiązki elektryczne narażając je na całkowite zniszczenie. Omawiana topologia gwieżdzista oznacza, że prąd popłynie przez elektronikę sterującą, która odporna jest na napięcia maksymalnie kilku woltów. Tego typu budowa jest charakterystyczna dla najpopularniejszych maszyn dostępnych na rynku. Widać wyraźnie, że producenci nie przewidują odporności na pracę w trudnych warunkach pogodowych, co jest całkowicie uzasadnione. Tak małe konstrukcje nie nadają się do odbywania lotów podczas deszczu czy silnego wiatru. Może jednak zdarzyć się sytuacja, że wyładowanie atmosferyczne znacząco wyprzedzi front burzowy i uderzy nawet w odległości kilkunastu kilometrów, gdzie nie pada deszcz i nie wieje wiatr.

Do wykonania badań wykorzystano trzy wielowirnikowe statki powietrzne różniące się budową oraz wyposażeniem. Przebadano jednostki cztero oraz sześciowirnikowe, o różnych wielkościach rozstawu śmigieł. Każdy z dronów pracował na innym zakresie częstotliwości i posiadał nieznacznie różniące się peryferia (kamera lub jej brak, system GPS itp.). Do przeprowadzenia badań wykorzystano generatory impulsów stosowane do badania przepięć w systemach awioniki. Urządzenia te wytwarzają w wiązce zakłócenia takie, jakie obserwowane są podczas wyładowań atmosferycznych, co sprawia, że nie trzeba korzystać z generatorów wysokich napięć. Dodatkowym atutem jest kontrola wszystkich parametrów wstrzykiwanego przebiegu pod kątem jego charakterystyki czasowej oraz napięcia. Największą zaletą jest jednak powtarzalność generowanych

impulsów, co pozwala na porównanie wyników podczas wielu różnych badań eksperymentalnych w różnych założonych miejscach pomiarów dla wielu maszyn. Zdjęcie stanowiska pomiarowego przedstawiono na rysunku 3. Widać na nim omawiany generator oraz separator napięcia do zasilenia drona w trakcie badań. Maszyny w czasie pomiarów znajdowały się na polu masy, czyli dużej uziemionej płaszczyźnie chroniącej przez impulsami powracającymi do generatora poprzez kable pod stołem pomiarowym.



Rys. 2. Schemat powstawania pola magnetycznego podczas wyładowania atmosferycznego.

Do obserwacji sygnałów indukowanych w elektronice drona wykorzystano sondy napięciowe oraz prądowe wraz z dzielnikami w celu obniżenia napięcia pomiarowego do maksymalnego zakresu obsługiwanego przez oscyloskop. Obserwację wykonywano czterokanałowym oscyloskopem RIGOL ze względu na możliwość jednoczesnej detekcji kilku sygnałów. Pozwalało to zaobserwować jakie sygnały propagują się w tym samym czasie w różnych miejscach badanego obiektu. Rejestracja była synchronizowana z wyładowaniem. Impulsem generowanym był sygnał o charakterystyce czasu narastania $6,4 \mu\text{s}$ oraz opadania wynoszącym $70 \mu\text{s}$. W badaniach ochrony przepięciowej wykorzystuje się różne znormalizowane przebiegi czasowe od $0,25 \mu\text{s}$ do $10 \mu\text{s}$ czasu narastania (Ziemia 2017). Zdecydowano się na jeden kształt impulsu, żeby skupić się na aspektach związanych z różnymi miejscami pomiaru oraz wartościami napięcia zakłócającego.

W badaniach analizowano sytuację, w której dodano dodatkową wiązkę kabla ułożoną bezpośrednio nad dronem. Indukowano w niej zakłócenia z maksymalnymi parametrami dla generatora (Assis 2015). W kolejnym kroku impuls wstrzykiwany był bezpośrednio w wiązki maszyny, w różnej konfiguracji, ponieważ nawet w krótkim obwodzie rozpatrywanym jako układ RLC może wyindukować się zakłócenie (Bogucki i in. 2007, Horowitz i in. 2003). Celem takiego badania było odzwierciedlenie rzeczywistej sytuacji, w której wyładowanie atmosferyczne ma bezpośredni wpływ na badane urządzenie. Zasadne było zweryfikowanie różnych punktów początku oraz końca przebiegu wyładowania w obwodach maszyny, ponieważ podczas bezpośredniego uderzenia pioruna każdy wariant biegu udaru prądowego jest możliwy (Rusek 1997). Podobne założenia przyjmuje się również podczas badań symulacyjnych. Odpowiednie modelowanie umożliwi analizę rozkładu ładunku wokół maszyny oraz przeprowadzenie symulacji wyładowania atmosferycznego (Shai 2017). Wybrane wyniki poszczególnych wariantów eksperymentów przedstawiono w dalszej części artykułu.

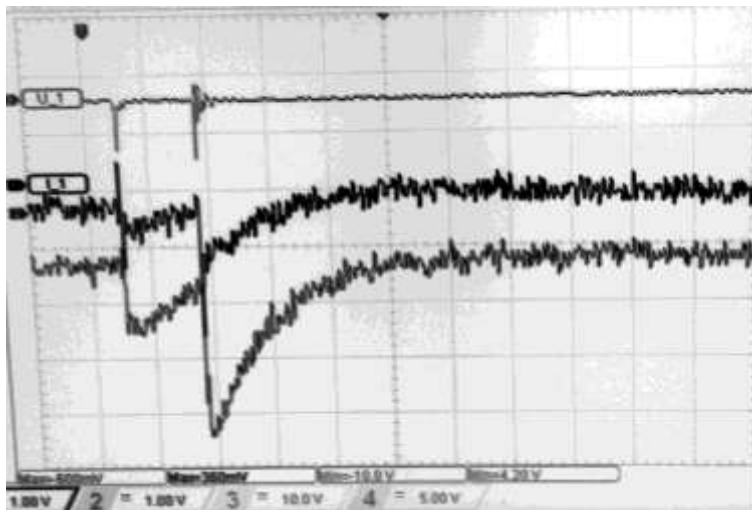


Rys.3. Fotografia stanowiska pomiarowego wraz z badanym obiektem.

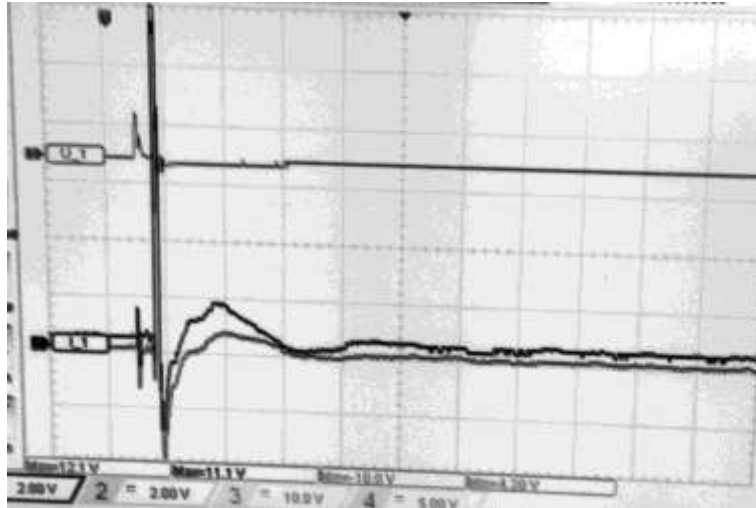
3. Wyniki i Dyskusja

Przebadano kilkanaście różnych wariantów indukowania zakłóceń wpływających na pracę wielowirnikowych statków powietrznych przy pomocy generatora przeznaczonego do analizy ochrony przepięciowej awioniki. Nie zdecydowano się na badania z generatorem wysokich napięć, ze względu na wzmianki literaturowe o całkowitym zniszczeniu maszyn przez bezpośrednie wyładowanie napięciem kilkuset tysięcy volt. Z pośród wielu badań, zaprezentowano kilka wyników eksperymentów pokazując sygnały zaobserwowane w obwodach drona.

Pierwszym przykładem jest wstrzyknięcie impulsu pomiędzy dwoma przeciwległymi silnikami. Oznacza to, że impuls przebiegał przez płytę sterującą (co wynika z budowy drona). Miejscami pomiarowymi była wiązka silnika niezwiązanego z przebiegiem impulsu oraz zaciski akumulatora. Napięcie wejściowe 2000 V. Prąd jaki przepłynął podczas pomiaru posiadał wartość szczytową 25 A. Wynik eksperymentu przedstawiono na rysunku 4. Zaobserwować można wyraźne zakłócenia na poziomie miliwoltów, które nie mają znaczącego wpływu na prace urządzenia. Dron działa poprawnie.



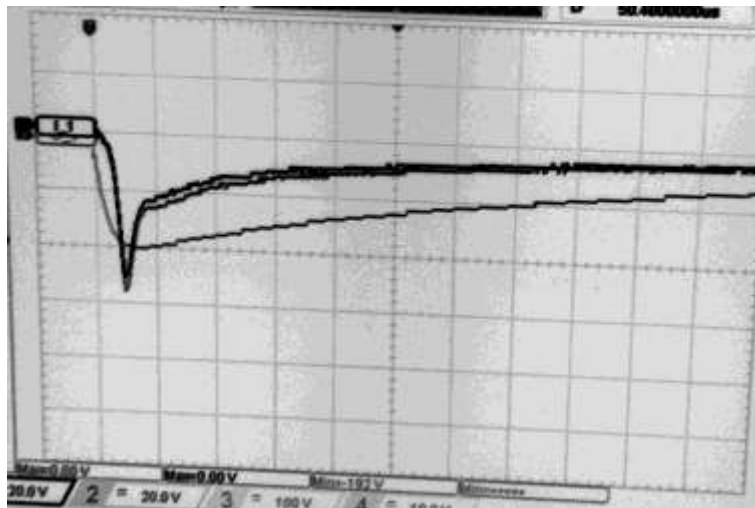
Rys.4. Wyniki eksperymentu dla napięcia 2000V oraz przebiegu impulsu pomiędzy silnikami



Rys.5. Wyniki eksperymentu dla napięcia 3000V oraz przebiegu impulsu pomiędzy silnikami.

Kolejnym krokiem było zwiększenie napięcia do 3000V. Wygenerowało to impuls o prądzie 360A. Miejsca podłączenia generatora oraz sond pomiarowych nie uległy zmianie. Na rysunku 5 można zaobserwować wyraźne przebicie i bardzo silny impuls prądowy zarówno na silniku jak i akumulatorze. Zakłócenie to całkowicie uszkodziło płytę sterującą drona, jednakże wszystkie silniki oraz akumulator pracują poprawnie. Na stałe pracuje jeden z silników a maszyna nie odpowiada na polecenia z terminala sterującego.

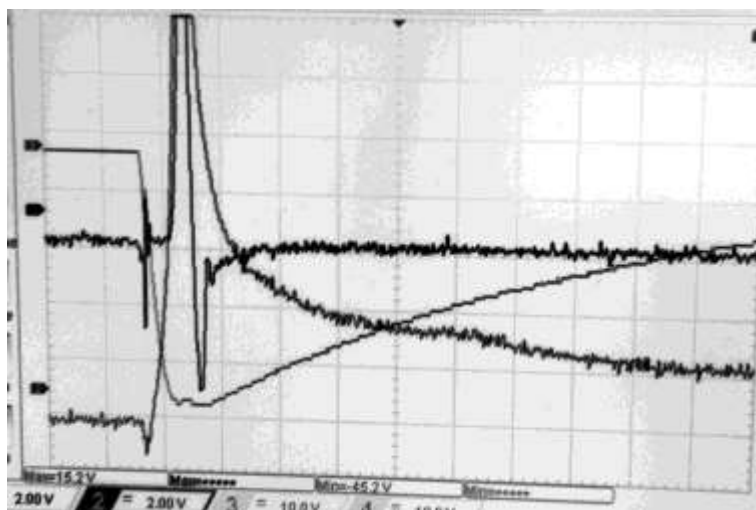
Innym przykładem jest zmiana biegu sygnału z generatora na połączenie pomiędzy silnikiem a akumulatorem. Pomiar w tych samych miejscach dla impulsu 2000V zaprezentowano na rysunku 6. Prąd udaru wyniósł 278 A. Dron zniszczony.



Rys.6. Wyniki eksperymentu dla napięcia 2000V oraz przebiegu impulsu pomiędzy silnikiem a akumulatorem.

Ostatnim z przykładów jest przepływ impulsu pomiędzy dwoma panelami LED, co również wiązało się z bezpośrednim narażeniem płyty sterującej. Postanowiono obniżyć napięcie do 500V, jednakże okazało się, iż było to niewystarczające. W obwodzie popłynął prąd 81A a wyraźne przebicie można zaobserwować na rysunku 7. Miejscami pomiaru był jak w poprzednich przypadkach, silnik oraz akumulator. Podczas tego badania dron był już uszkodzony wcześniejszym

wyładowaniem, stąd nie ma pewności czy uległby zniszczeniu. Jednakże analiza wyników świadczy o bardzo dużym prawdopodobieństwie.



Rys.7. Wyniki eksperymentu dla napięcia 500V oraz przebiegu impulsu pomiędzy panelami LED.

4. Wnioski

Z przedstawionych wyników eksperymentów wyraźnie widać, że małe wielowirnikowe statki powietrzne nie są odporne na bezpośredni wpływ wyładowań atmosferycznych. Sygnały wstrzykiwane w obwody drona są na tyle duże, a konstrukcja tak zwarta, że nie można wyróżnić żadnego bezpiecznego dla maszyny wariantu przebiegu udaru zakłócającego. Bezpośrednie połączenie wszystkich elementów składowych do płytki centralnej sprawia, że przy topologii gwiazdистой każdy impuls przekraczający kilka woltów na obwodach półprzewodnikowych jest źródłem trwałego ich uszkodzenia. Jedynymi elementami trwale odpornymi na serię badań i wielokrotne narażenie na duże wartości prądu oraz napięcia okazały się silniki. Znaczną odpornością wykazał się również akumulator, ponieważ jego obudowa wykonana jest z aluminium, co stanowi dla niego klatkę Faraday'a chroniącą go przed zakłóceniami. W każdym z opisanych wariantów, maszyna uległa zniszczeniu i nie nadawała się do lotu. Oznacza to, że uderzenie bezpośrednie oraz pośrednie wyładowanie atmosferyczne w bardzo bliskiej odległości może uszkodzić lecącego drona. Natomiast udary prądowe dalekie, które indukują silne pole elektromagnetyczne mogą być zagrożeniem, ale jedynie w przypadku nieznacznej odległości pozwalającej na wygenerowanie się w obwodach maszyny napięć przekraczających kilka wolt. Innym aspektem jest możliwość chwilowego zakłócenia transmisji radiowej z operatorem, jednak nie ma to wpływu na możliwość lotu oraz odporność na tego typu zakłócenia samej maszyny. Należy jednak pamiętać, że tak małe konstrukcje nie są przystosowane do lotu w trudnych warunkach atmosferycznych, stąd ich odporność na uderzenia pioruna nie została przewidziana na etapie konstrukcyjnym.

5. Informacje uzupełniające

Praca finansowana ze środków przyznanych przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego na działalność statutową polegającą na prowadzeniu badań naukowych lub prac rozwojowych oraz zadań z nimi związanych, służących rozwojowi młodych naukowców oraz uczestników studiów doktoranckich w roku 2018 w ramach zadania pn. „DS/M.ET.18.002”.

6. Literatura

Assis AK, Chaib JP (2015) Amperes Electrodynamics, Aperion, Montreal, 221-226

- Bartlett E (2017) Drone vs lightning, The University of Manchester,
<http://www.mub.eps.manchester.ac.uk/science-engineering/2017/04/10/drone-vs-lightning/>
- Bogucki J, Chudziński A, Połujan J (2007) Emisja elektromagnetyczna urządzeń w praktyce,
Telekomunikacja i Techniki Informacyjne 1-2/2007, 85-95
- Divya J(2017) Exploring the latest drone technology for commercial, industrial and military drone
uses, <https://www.businessinsider.com/drone-technology-uses-2017-7?IR=T>
- Horowitz P, Hill W (2003) Sztuka elektroniki, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa
- Rusek M, Pasierbiński J (1997) Elementy i układy elektroniczne w pytaniach i odpowiedziach,
Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa
- Shai S.A, Vladimir V, Hen L et all. (2017) Lighting strike analysis for drones, 2017 IEEE
International Conference on Microwaves, Antennas, Communications and Electronic Systems
(COMCAS), Tel-Aviv
- Ziemia R, Masłowski G, Kossowski T (2018) Analysis of the overvoltages caused by nearby
lightning stroke, Przegląd Elektrotechniczny, 2/2018, 41-44

6. Odnowa sieci wodociągowych i kanalizacyjnych w technologii krakingu statycznego

Renovation of water supply and sewage networks in static cracking technology

Jakub Kozicki

Katedra Technologii i Systemów Inżynierii Środowiska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka

Jakub Kozicki: jkozicki@wobi.pl

Słowa Kluczowe: kanalizacja sanitarna, technologie bezwykopowe, media sanitarne

Streszczenie

W doborze technologii odnowy sieci wodociągowych i kanalizacyjnych najważniejszym aspektem jest ocena stanu technicznego a także parametrów hydraulicznych.

Przy zastosowaniu metody krakingu statycznego liner który jest wbudowywany w miejsce istniejącego rurociągu osiąga pełną nośność i przenosi wszystkie obciążenia statyczne niezależnie od stanu rehabilitowanego rurociągu.

Przy instalacji rurociągów w tej metodzie nie zmniejszamy średnicy nominalnej odnawianej sieci, a jeżeli zachodzi taka potrzeba możemy zainstalować liner do dwóch dymensji większy niż średnica nominalna rurociągu (Kuliczkowski i in. 2010).

W technologii krakingu statycznego zostają zminimalizowane wykopki ziemne a także rozbiórka i odtworzenie nawierzchni do komór startowych i odbiorczych.

Istnieją także urządzenia za pomocą których możemy wykonać kraking statyczny ze studni rewizyjnych i w tym przypadku nie ma potrzeby wykonania komór startowych i odbiorczych.

Rury krakingowe mogą być wykonane z kamionki, żeliwa sferoidalnego, polipropylenu, polichlorku winylu oraz bazaltu.

Technologia zyskująca coraz większe uznanie inwestorów i firm wykonawczych.

1. Wstęp

Metoda krakingu statycznego jest coraz częściej stosowana w rehabilitacji sieci wodociągowych i kanalizacyjnych. Przede wszystkim jednym z istotniejszych aspektów technicznych w tej technologii jest stosowany materiał do odnowy rurociągów. W kontekście opracowanych strategii odnowy często pomija się bezpieczeństwo konstrukcyjne przewodów co w konsekwencji może prowadzić do krótszej żywotności rurociągów (Kuliczkowski 2017). Co do zasady rury stosowane w technologii krakingu muszą spełniać warunek przenoszenia wszystkich obciążeń zmiennych pionowych oraz poziomych a w rurociągach ciśnieniowych dodatkowo od ciśnienia transportowanego medium (Kuliczkowski 2004).

2. Materiały stosowane w technologii krakingu statycznego

Spośród wielu stosowanych materiałów w technologii krakingu statycznego najbardziej popularnymi są rury z PP, PEHD, PVC, PP, żeliwa sferoidalnego czy kamionki nowej generacji:

Rury polipropylenowe- rury o średniej sztywności i średnie udarność. Zakres modułu sprężystości dla rur PP mieści się pomiędzy 1100-1300 MPa. Zakres stosowania temperatury czynnika przepływającego od -20°C do +90°C. W ostatnich latach zaobserwowany duży progres wzrostowy stosowania tego materiału do odnowy sieci wodociągowych i kanalizacyjnych (Zwierzchowska 2009).

Rury polietylenowe – rury z tworzywa sztucznego, termoplastycznego o niskim module sprężystości w zakresie od 800 do 1000 MPa i temperatury -30°C do +90°C.

Rury z polichlorku winylu – rury tworzywowe stosowane do krakingu statycznego przy rehabilitacji sieci kanalizacji sanitarnej. Bardzo wysoki moduł sprężystości w granicach od 3000mdo

3600 MPa przy zakresie temperaturowego zastosowania od 0°C do +70°C (Kuliczkowski 2001; Królikowski i in. 2015).

Rury kamionkowe – rury budowane z materiału pozyskiwanego z naturalnego wietrzenia skał. Posiadają bardzo dobre właściwości nośne a także wysoka odporność chemiczną i korozyjną (Madyras i in. 2010; Bolt i in. 2012).

Rury z żeliwa sferoidalnego – rury z grafitem kulkowym, którego postać jest wynikiem procesu sferoidyzacji polegającego na wprowadzeniu do ciekłego metalu niewielkiej ilości jonów magnezu Mg albo Ce. Rury mogą być produkowane w technologii odlewania odśrodkowego, odlewania grawitacyjnego lub odlewania półciągnego (Kuliczkowski 2008; Saint-Gobain 2015).



Rys. 1. Rury stosowane w odnowie sieci kanalizacyjnych w technologii krakingu statycznego.

3. Technologia krakingu statycznego

Obecnie stosowane technologie rehabilitacyjne po względem typowych urządzeń możemy podzielić rodzaju komór startowych i odbiorczych, czyli na studniarskie i komorowe.

Ze względu na aspekty ekonomiczne najlepszą metoda jest zastosowanie maszyny studniarskiej oraz krótkich modułów rurowych z PVC, PP lub PEHD (Rys. 2 i 4).

Jest to przede wszystkim metoda dedykowana dla wykonywania odnowy kanałów sanitarnych i deszczowych do nominalnej średnicy DN400 mm. Zastosowane krótkie żerdzia z bardzo mocnymi połączeniami eliminują problemy zerwania się głowicy kruszącej podczas procesu instalacji (Rys. 3)

W przypadku odnowy sieci wodociągowej należy wykonać komorę startową jak ilustruje to rys 5 i 6. Ponadto w takiej konfiguracji można zastosować maszynę o nieporównywalnie większej sile ucięcia co w rezultacie daje możliwość instalacji większych średnic.



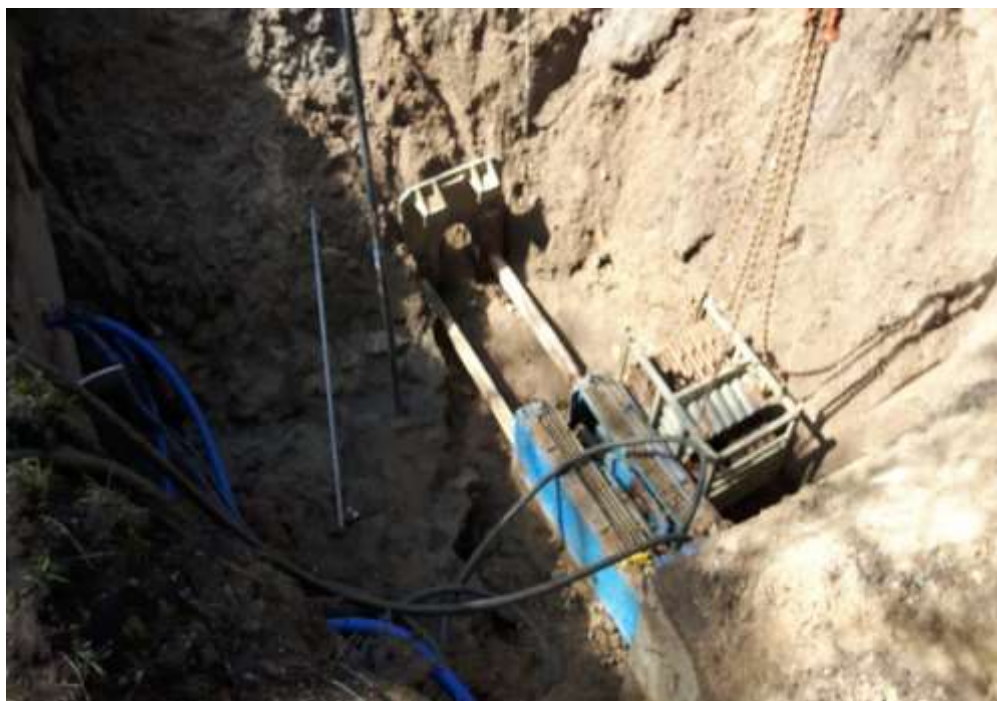
Rys. 2. Maszyna do odnowy sieci kanalizacyjnych w technologii krakingu statycznego (studniarska).



Rys. 3. Głowica krusząca źródło: własne autora.



Rys. 4. Maszyna do odnowy sieci kanalizacyjnych w technologii krakingu statycznego (studniarska).



Rys. 5. Maszyna do odnowy sieci kanalizacyjnych i wodociągowych w technologii krakingu statycznego (komorowa).



Rys. 6. Maszyna do odnowy sieci kanalizacyjnych i wodociągowych w technologii krakingu statycznego (komorowa).

4. Wybrane realizacje przeprowadzone w Białymstoku

W ostatnie dekadzie w Białymstoku przeprowadzono wiele realizacji w technologii krakingu statycznego zarówno w rehabilitując sieci wodociągowe jak i kanalizacyjne (tab. 1)

Tab. 1. Wybrane inwestycje zrealizowane w Białymstoku.

Rodzaj i średnica rurociągu odnawianego	Lokalizacja inwestycji (ulica)	Rodzaj sieci	Zastosowany liner	Długość instalacji [mb]	Rok
Żeliwo DN300	Warszawska	wodociągowa	Żeliwo sferoidalne	340	2012
Kamionka DN250	Handlowa	kanalizacja	PEHD TS	240	2017
Kamionka DN300	Dolna	kanalizacja	PEHD TS	112	2010
Żeliwo DN100	SUW Jurowce	wodociągowa	PEHD RC/PP	178	2017
Kamionka DN150	SUW Jurowce	kanalizacja	PEHD RC	115	2018
Kamionka DN250	Hurtowa	kanalizacja	PEHD TS	190	2017
Żeliwo DN100	Kolejowa	wodociągowa	PEHD RC	120	2016
Kamionka DN200	Końcowa	kanalizacja	PEHD TS	115	2010
Kamionka DN250	Końcowa	kanalizacja	PEHD TS	98	2010

5. Wnioski

- a) Stosowanie technik bezwykopowych przy użyci technologii krakingu statycznego jest korzystne pod względem ekonomicznym (Sosiński 2014)
- b) Biorąc pod uwagę miejsca posadowienia sieci wodociągowych takich jak dworce kolejowe, strefy ochrony zabytków, duże węzły komunikacyjne techniki bezwykopowe mogą być jedyną alternatywą na poprawę niezawodności systemów wodociągowych i kanalizacyjnych

- c) Wspieranie odnowy sieci wodociągowych w technikach bezwykopowych jest bez wątpienia krokiem idącym naprzeciw wszystkim firm, instytucjom czy osobom prywatnym zlokalizowanym wokół prowadzonych przedsięwzięć inwestycyjnych.
- d) W kontekście częstych nasadzeń zieleni i drzew technologie bezwykopowe są jedynymi możliwymi metodami do poprawy stanu sieci wodociągowych kanalizacji sanitarnej.
- e) Minimalizacja w zakresie przepompowywania ścieków na czas inwestycji to znaczący plus tak pod względem technologicznym jak i pod względem ekonomicznym na korzyść technologii bezwykopowych.
- f) Ewentualne roszczenia a także sprawy sądowe w kontakcie zastosowania technik bezwykopowych sprowadzają się praktycznie do minimum
- g) Wodociągi Białostockie Sp. z o.o. jako zamawiający korzystający ze środków publicznych jest zobligowany do bilansowania kosztów i podejmując decyzje zawsze musi się kierować interesem publicznym. Przytoczone w artykule realizacje inwestycyjne są tego konsekwencją.
- h) Wobec rozwijającej się infrastruktury miasta Białystok wykorzystanie bezwykopowych technik jest niezbędne do utrzymania niezawodności systemów wodociągowych i kanalizacyjnych

6. Literatura

- Beger M, Ways M (2014) Poszukiwania przecieków sieci wodociągowych, Seidel- Przywecki Sp. z o.o., Warszawa. s.14
- Bolt A, Burszta-Adamiak E, Gudelis-Taraszkiewicz K, Suligowski Z, Tuszyńska A (2012) Kanalizacja, projektowanie, wykonanie, eksploatacja, Seidel- Przywecki Sp. z o.o., Warszawa : 314
- Guzik A, Guzik J (2014) Wodociągi i kanalizacja zewnętrzna, KaBe Krosno:
- Królikowski A, Królikowska J, Żaba T (2015) Kanalizacja – Podstawy projektowania, wykonawstwa i eksploatacji, Politechnika Krakowska, s.273
- Kuliczkowski A, Kuliczkowaka E, Kuliczkowski i In. (2010) Technologie bezwykopowe w inżynierii środowiska, Seidel- Przywecki Sp. z o.o., Warszawa: s. 467
- Kuliczkowski A (2004) Rury kanalizacyjne, projektowanie konstrukcji, Politechnika Świętokrzyska, Kielce : s. 399
- Kuliczkowski A (2001) Rury Kanalizacyjne – Własności materiałowe, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce: s. 10-17
- Kuliczkowski A (2008) Rury Kanalizacyjne – o konstrukcji sztywnej i sprężystej Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce: s. 364
- Kuliczkowski A (2017) Jak ocenić bezpieczeństwo konstrukcyjne przewodów wodociągowych, INSTAL 11/2017: s.59
- Kuliczkowska E (2008) Kryteria planowania bezwykopowej odnowy nieprzelazowych przewodów kanalizacyjnych, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce : s. 108
- Sosiński P (2014) Bezwykopowa renowacja sieci podziemnych, KaBe Krosno: s. 69
- Madyras C, Kolonko A, Wysocki L, (2002), Konstrukcje przewodów kanalizacyjnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław: s. 41
- Madyras C, Kolonko A, Wysocki L (2010) Badania i ocena stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych, Wrocław : s 14
- Saint-Gobain Construction Products Polska (2015) Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, Wrzesień-Październik : s. 28-29
- Zwierzchowska A (2009) Technologie Bezwykopowe budowy sieci gazowych, wodociągowych i kanalizacyjnych, Kielce: s. 80

7. Rehabilitacja kanałów sanitarnych krótkimi modułami rurowymi

Rehabilitation of sanitary sewage system with short tubular modules

Jakub Kozicki

Katedra Technologii i Systemów Inżynierii Środowiska, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Białostocka

Jakub Kozicki: jkozicki@wobi.pl

Słowa kluczowe: kanalizacja, rehabilitacja, moduły rurowe

Streszczenie

W związku z coraz większym spadkiem zapotrzebowania na wodę a także rozdziałem kanalizacji ogólnospławnej na kanalizację deszczową i sanitarną pojawił się problem ze zdolnością samooczyszczania kanałów sanitarnych.

W celu minimalizacji kosztów związanych z przebudową problematycznych kanałów coraz częściej stosuje się metodę rehabilitacyjną za pomocą krótkich modułów rurowych. Technologia oparta na instalacji rur wewnątrz istniejących kanałów i wypełnienie specjalnym insektem pustki międzyrurowej.

Z punktu widzenia formalno-prawnego metoda bardzo korzystna pod względem uzyskiwania różnego rodzaju decyzji administracyjnych. W obecnym stanie prawnym nie ma konieczności uzyskania decyzji pozwolenia na budowę, co w rezultacie skraca realizację o kilka miesięcy.

1. Wstęp

Metoda krótkiego reliningu która potocznie jest określeniem „rura w rurę” może być stosowana do wszystkich średnic o różnych kształtach (Kuliczowska 2008)(Sosiński 2014). Średnica nowej rury jest mniejsza niż macierzysta, ale zazwyczaj posiada mniejszy współczynnik chropowatości co w rezultacie nie skutkuje pogorszeniem wartości hydraulicznych przewodu (Kuliczowski i in. 2010). Atutem tej technologii jest minimalizacja czasu instalacji. Najczęściej stosowanymi materiałami w renowacji krótkimi modułami rurowymi są: GRP, PP oraz PVC (Bolt 2012)(Madyras 2002). W zależności od potrzeb, podczas prac renowacyjnych mogą być wykorzystywane kształtki systemowe. Ich montaż musi być wykonywany w wykopie punktowym.

2. Przebieg procesu technologiczne instalacji KMR

Nowe przewody są instalowane od 0,60 m do 3,00 m długości. W zależności od zastosowanego materiału oraz wymiaru stosuje się różne metody instalacji (Guzik 2011). Najczęściej stosowana metodą jest wciąganie za pomocą wciągarki linowej lub wózka transportowego. W przypadku bardzo dużych średnic stosuje się siłowniki hydrauliczne. Kluczowym elementem co do powodzenia realizacji jest sprawdzenie wymiaru wewnętrznego odnawianego kanału gdzie za pomocą kalibratora. Jeżeli nie zostanie od zablokowany to z dużą dozą prawdopodobieństwa realizacja dochodzi do skutku.

Zanim zostanie przeprowadzona instalacja należy wykonać czyszczenia wysokociśnieniowego w celu usunięcia zalegających osadów, a jeżeli zajdzie taka potrzeba to frezowanie wrastających się w rurociąg korzeni. Po tak przygotowanym kanale przeprowadza się inspekcję CCTV w celu określenia stanu technicznego kanału poddawanego rehabilitacji (Kuliczowski 2001)(Madyras 2010). Po określeniu stanu technicznego dobiera się odpowiedni materiał renowacyjny (Kuliczowski 2004). W zależności od średnicy poszczególne elementy wprowadza się do wnętrza kanału ręcznie lub za pomocą urządzeń dźwigowych przez studnie lub komory startowe. Przy większych średnicach w celu minimalizacji tarcia stosuje się poślizgowe.

Przy zastosowaniu większych średnic wielkość wykopu montażowego zależna jest od długości stosowanych odcinków rur, średnicy odnawianego kanału oraz tego, czy prace prowadzone

są na czynnym kanale, czy na opróżnionym. Minimalne wymiary wykopu zestawiono w tabeli poniżej (Tab. 1).

Tab. 1. Przykładowe wykopy montażowe.

Stan odnawianego kanału	Stosowane rury X-Stream		
	Średnica	Długość 3 m	Długość 6 m
Opróżniony (pusty)	DN 600	5,0 m × 3,0 m	8,0 m × 3,0 m
	DN 800	5,0 m × 3,3 m	8,0 m × 3,3 m
	DN 1000	5,0 m × 3,6 m	8,0 m × 3,6 m
Czynny	DN 600	6,0 m × 3,0 m	9,0 m × 3,0 m
	DN 800	6,0 m × 3,3 m	9,0 m × 3,3 m
	DN 1000	6,0 m × 3,6 m	9,0 m × 3,6 m

Zródło: KMRsystem



Rys. 1. Wciągarka linowa.

3. Materiały stosowane w KMR

Najpopularniejszymi materiałami stosowanymi w technologii renowacyjnej krótkimi modułami rurowymi są GFK, PE, PP lub PVC (Królikowski 2015)(Rys 4,5,6). Przy doborze materiału należy stwierdzić o jakich parametrach chemicznych i wytrzymałościowych będzie transportowane medium przez układ rurowy po renowacji. Poza materiałami instalacyjnymi bardzo ważnym jest zastosowanie odpowiedniego iniektu wypełniającego przestrzeń między rurową.



Rys. 2. Agregat prądowórczy do wciągarki linowej.



Rys. 3. Zestaw hydrauliczny do wciągarki linowej.



Rys. 4 Rura GRP do technologii KMR



Rys. 5 Rura PVC do technologii KMR.



Rys. 5 Rura GRP do technologii KMR o nietypowym kształcie..

4. Ekonomiczne i formalno-prawne aspekty technologii KMR

W kontekście wymagań Prawa Budowlanego odnowa kanałów sanitarnych w metodzie krótkich modułów rurowych nie ma przesłanek ustawowych do uzyskania pozwolenia na budowę czy też zgłoszenia z projektem budowlanym. Roboty renowacyjne zgodnie z art. 29 Prawa Budowlanego zaliczamy do grupy klasycznego remontu. Kolejnym atutem jest brak konieczności zgłaszania rozpoczęcia robót a także ich zakończenia do odpowiedniego nadzoru budowlanego.

Analiza porównawcza metody KMR i wykopu otwartego wskazuje na dużą przewagę pod względem ekonomicznym inwestycji na renowacje bezwykopową. Czynniki cenotwórczymi które wpływają na wartość inwestycji to: wykopy, pompowanie wód gruntowych, rozbiórka i odtworzenie nawierzchni oraz zajęcie pasa drogowego.

5. Realizacje wykonane w Białymstoku

W ostatniej dekadzie Wodociągi Białostockie zrealizowały sporo inwestycji polegających na rehabilitacji kanałów sanitarnych krótkimi modułami rurowymi. W celu minimalizacji kosztów podjęto decyzje o realizacji tego typu instalacji „własnymi siłami”. Obecnie wyspecjalizowana grupa pracowników Wydziału Sieci Kanalizacyjnej realizuje ponad 2 km rehabilitacji kanalizacji sanitarnej rocznie. Poniżej w tabeli autor przedstawił wybrane inwestycje zrealizowane na terenie miasta Białystok (Tab. 2).

6. Wnioski

- a) Stosowanie technik bezwykopowych przy użyciu technologii KMR minimalizuje koszty inwestycji
- b) Technologia KMR eliminuje konieczność wycinki drzew i krzewów na trasie prowadzonej rehabilitacji rurociągu
- c) Minimalizacja w zakresie przepompowywania ścieków na czas inwestycji to znaczący plus tak pod względem technologicznym jak i pod względem ekonomicznym na korzyść technologii KMR.

- d) Renowacja przewodów kanalizacyjnych metodą shortliningu w systemie KMR może być prowadzona na czynnym kanale. Upraszcza to organizację robót i obniża koszt realizacji zadania.
- e) Renowacji mogą być poddawane odcinki proste, choć dopuszczalne są niewielkie, kilkustopniowe odchylenia. Z wykopu montażowego prace mogą być prowadzone w obu kierunkach.
- f) Stosowanie metody renowacji w systemie krótkich modułów rurowych wpływa pozytywnie na niezawodność systemu kanalizacji sanitarnej

Tab. 2. Wybrane inwestycje zrealizowane w Białymstoku.

Rodzaj i średnica rurociągu odnawianego	Lokalizacja inwestycji (ulica)	Średnica linera	Zastosowany liner	Długość instalacji
Kamionka DN 250mm	Matejki	Ø200mm	PVC	251mb
Kamionka DN 250mm	Klonowa	Ø200mm	PVC	100mb
Kamionka DN 250mm	Rybnika	Ø200mm	PVC	145mb
Kamionka DN 250mm	Rybnika	Ø225mm	PVC	127mb
Beton DN 300mm	Reymonta	Ø250mm	PVC	230mb
Beton DN 300mm	Ślusarska	Ø250mm	PVC	178mb
Beton DN 600mm	Dojlidy	Ø560mm	PVC	241mb
Beton DN 500mm	Dojlidy	Ø455mm	PVC	263mb

7. Literatura

- Bolt A, Burszta-Adamiak E, Gudelis-Taraszkiewicz K, Suligowski Z, Tuszyńska A, (2012) Kanalizacja, projektowanie, wykonanie, eksploatacja, Seidel- Przywecki Sp. z o.o., Warszawa: s. 330
- Guzik A., Guzik J, (2014), Wodociągi i kanalizacja zewnętrzna, KaBe Krosno: s. 175
- Królikowski A, Królikowska J, Żaba T, Kanalizacja – Podstawy projektowania, wykonawstwa i eksploatacji, Politechnika Krakowska: s. 285
- Kuliczkowski A, Kuliczkowaka E, Kuliczkowski i In., (2010) Technologie bezwykopowe w inżynierii środowiska, Seidel- Przywecki Sp. z o.o., Warszawa: s. 494
- Kuliczkowski A, (2004) Rury kanalizacyjne, projektowanie konstrukcji, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2004: s. 393
- Kuliczkowski A, (2001), Rury Kanalizacyjne – Własności materiałowe, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce: s. 141
- Kuliczkowska E, (2008), Kryteria planowania bezwykopowej odnowy nieprzelazowych przewodów kanalizacyjnych, Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2008: s. 162
- Sosiński P., 2014, Bezwykopowa renowacja sieci podziemnych, KaBe Krosno: s. 30
- Madyras C, Kolonko A, Wysocki L, (2002), Konstrukcje przewodów kanalizacyjnych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław: s. 254
- Madyras C, Kolonko A, Wysocki L, (2010), Badania i ocena stanu technicznego przewodów kanalizacyjnych, Wrocław : s 162

8. Wysoka jakość środowiska mieszkaniowego na przykładzie cohousing

High quality residential environment on the example of cohousing

Łukasz Kamil Mazur

Katedra Architektury Mieszkaniowej, Przemysłowej, Wnętrz, Ruralistyki, Krajobrazu i Sztuk Wizualnych – Wydział Architektury, Politechnika Wrocławska.

Opiekun naukowy: Zbigniew Bać

Łukasz Kamil Mazur: lukasz.mazur@pwr.edu.pl

Słowa kluczowe: architektura, architektura mieszkaniowa, cohousing, jakość życia, architektura zrównoważona

Streszczenie

Współczesne środowiska mieszkaniowe narażone są na oddziaływanie negatywnych czynników spowodowanych narastającym poziomem urbanizacji. Ludzie w miastach zamieszkują coraz bardziej zatłoczoną przestrzeń, w której mieszkańcy żyją w anonimowości, często bez poznania sąsiadów w obrębie własnej klatki. Sytuacja niesie ze sobą wiele negatywnych czynników społecznych. Jednym z sposobów na przeciwdziałanie takiej sytuacji jest życie ludzi w kolektywach. Artykuł przedstawia formułę cohousingu czyli modelu życia w kolektywie jako przykład wysokiej jakości życia w środowisku zurbanizowanym. W pracy zostanie przedstawiony podział i charakterystyka grup cohousingowych oraz sposób kształtowania architektury mieszkaniowej.

1. Wstęp

Od zarania dziejów ludzie jednoczą się aby wspólnie realizować cele, zrzeszają się, aby razem podejmować trudy życia. Początek takich działań datowany jest na okres prehistoryczny, kiedy to człowiek pierwotny rozpoczął okres polowań i życia w gromadzie. Wspólne życie przynosiło więcej korzyści niż w pojedynkę np. w zdobywaniu pożywienia czy obronie przed zwierzętami. Człowiek Homo erectus zainicjował osiadły tryb życia, pozostawił tymczasowe koczowiska na rzecz budowy solidniejszego i trwalszego schroniska, gdzie planował pozostać na dłużej (Zeuli i Cropp 2004: 1). Etap ten jest jednym z najbardziej przełomowych dla ludzkości a zarazem początkiem myślenia o mieszkalnictwie w kolektywie.

Świadoma idea kolektywu mieszkaniowego czyli życia we wspólnocie, była rozpowszechniana w starożytności przez greckiego filozofa Platona. Opisywał on idealne społeczeństwo gdzie wszystko było zorganizowane w demokratycznym kolektywie. Wspólna organizacja przestrzeni życia była chętnie podejmowana przez socjalistów utopijnych w XIX wieku. W 1840 roku Robert Owen przedstawił idee społeczno- architektoniczną „Parallelogram”, była to wizja idealnej gminy składającej się z 2 000 równych społecznie mieszkańców. Projekt zakłada wspólną jadalnię, szkołę, przedszkole, bibliotekę oraz tereny sportu. Robert Owen próbował wcielić w życie zapisy idealnego społeczeństwa realizując osadę New Harmony w Ameryki Północnej, jednak idea utopijna nie przetrwała paru lat (Vestbro 2008: 1). Kolejną utopijną wizją jest idea Charlesa Fouriera, który przedstawił projekt wspólnoty równych i wolnych ludzi zarządzających swoim miastem. Projekt nazwany flanstrem zakładał budowę zespołu budynków służących dla 1 620 mieszkańców. Idea zakładała po równo kobiet i mężczyzn, wspólne przestrzenie w tym jadalnia, pomieszczenie do nauki i pracy, operę i kościół (Cembrzyńska 2008: 114).

Historyczne i utopijne projekty były wzorami dla pierwszych prekursorów cohousingu. Autorzy czerpali idee z architektury dostosowane do życia we wspólnocie, ale przede wszystkim dążyli do wykreowania życia opartego na równouprawnieniu wszystkich jego mieszkańców. W przedstawionej pracy autor omówi koncepcję cohousingu, jako środowiska mieszkaniowego odznaczającego się wysoką jakością zarówno architektury jak i zadowolenia.

2. Opis zagadnienia

We współczesnych miastach żyje się coraz trudniej, dlatego mieszkańcy oddolnie poszukują alternatywy na przeludnione, niezdrowe i anonimowe środowiska mieszkaniowe. Jednym z rozwiązań jest zamieszkanie w kolektynie, do najpopularniejszych należą m.in. kooperatywy mieszkaniowe, coliving oraz cohousing.

W definicji **cohousing** jest to grupa osób które dobrowolnie zrzeszają się w celu zapewnienia sobie oraz swoim rodziną warunków mieszkaniowych oraz domu (przestrzeni) wspólnego. Cohousing to przede wszystkim sposób na życie, z nastawieniem na wspólne stworzenie przyjaznego środowiska mieszkaniowego. Elementem kluczowym dla formuły cohousingu jest wspólna przestrzeń najczęściej w postaci domu wspólnoty, ponieważ jest to miejsce zapewniające aktywność społeczną, sprzyja nawiązywaniu kontaktów oraz pogłębianiu ich (ScottHanson i ScottHanson 2005: XI). Wspólnoty w formule cohousingu mogą: przybierać różne wielkości w zależności od mieszkańców, znajdować się w różnej lokalizacji na całym świecie oraz różnić się projektem architektonicznym dostosowanym do potrzeb grupy. Jednak wszystkie grupy cohousingowe charakteryzują się następującymi cechami:

a) Członkowie grupy cohousingu wykładają dużo pracy w **procesie partycypacyjnym**, w którym przyszli mieszkańcy organizują się i uczestniczą w procesie projektowania ich wspólnego miejsca zamieszkania. Proces ten jest czasochłonny, wymaga porozumienia się i podejmowania wspólnie decyzji przez wszystkich inwestorów. Zamknięcie etapu projektowego i zaakceptowanie jego wyników przez przyszłych mieszkańców może potrwać od roku do pięciu lat (Meltzer 2005: 4), (ScottHanson i ScottHanson 2005: 3).

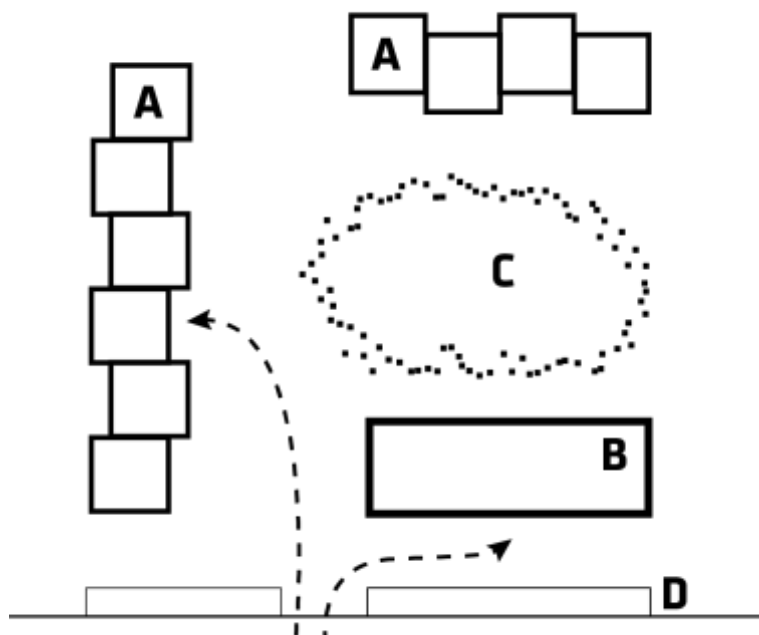
b) Projektowana architektura i zagospodarowanie terenu wspólnej działki mają wpływać i zachęcać do częstszej integracji pomiędzy mieszkańcami i tworzyć **przyjazne sąsiedztwo** (Rys. 1). Układ budynków może przyjąć różne konfiguracje w zależności od wizji mieszkańców, jednak do typowych rozwiązań należy układ budynków mieszkalnych w których wejścia znajdują się od środka działki. Tak aby zapewnić wysoką jakość przestrzeni wspólnej, np. na której mogą bezpiecznie bawić się dzieci. Miejsca postojowe dla samochodów osobowych zazwyczaj zaprojektowane są na krawężniach działki (Meltzer 2005: 4), (ScottHanson i ScottHanson 2005: 3).

c) Jednym z ważniejszych elementów tworzących grupę są **przestrzenie wspólnotowe** które pomimo uwarunkowań zewnętrznych pozwalają na utrzymywanie kontaktów mieszkańcom. Pomieszczenia te przeznaczone są do codziennego użytku tworzą integralną część społeczności oraz uzupełniają prywatne mieszkania. Wspólne przestrzenie skoncentrowane w domu wspólnoty, składają się z kuchni oraz jadalni mogących zorganizować i pomieścić na wspólnym posiłku wszystkich mieszkańców cohousingu. Dodatkowymi pomieszczeniami w większości domów wspólnoty są: pralnia, pomieszczenie wielofunkcyjne, pomieszczenie zabaw dla dzieci, pracownia czy pomieszczenie dla gości (Meltzer 2005: 5), (ScottHanson i ScottHanson 2005: 4).

d) Mieszkańcy po wybudowaniu wszystkich obiektów biorą pełną odpowiedzialność za zarządzanie i utrzymaniem w dobrej kondycji całego wspólnego terenu cohousingu. Członkowie społeczności podejmują wspólnie decyzję i **samoorganizują** się w celu wykonania podjętych decyzji, związanych z pracami niezbędnymi w utrzymaniu nieruchomości. Każda społeczność na regularnych spotkaniach np. przy posiłkach, dyskutuje na temat problemów społeczności i opracowuje demokratyczne zasady postępowania (Meltzer 2005: 5), (ScottHanson i ScottHanson 2005: 4).

e) Struktura cohousingu tworzy **płaską hierarchie** w grupie, w której każdy głos mieszkańca jest tak samo ważny. W większości grup występują osoby bardziej zaangażowane w życie cohousingu i naturalnie przyjmują rolę przywódców, jednak decyzje podejmowane są na zasadzie konsensusu. W przypadku braku możliwości zapewnienia jednomyślnej decyzji grupy następuje demokratyczne głosowanie (Meltzer 2005: 5), (ScottHanson i ScottHanson 2005: 4).

f) Społeczność cohousingu **nie jest źródłem dochodu** ich członków. Czasami wspólnota może zlecić odpłatnie konkretne zadanie dla mieszkańca ale jest to marginalne zadania, jednak zazwyczaj czynności takie traktowane są jako wkład na rzecz dobra wspólnoty (Meltzer 2005: 5), (ScottHanson i ScottHanson 2005: 4).



Rys. 1. Przykładowe zagospodarowanie działki pod grupę cohousingu. A – domu prywatne; B – dom wspólnoty; C – przestrzeń ogólnodostępna; D – strefa parkingów.

Grupy cohousingowe można podzielić w zależności od tego, na jakich zasadach ich członkowie się zrzeszyli. W zależności od intencji mieszkańców oraz wyznawanych przez nich wartości, grupy cohousingu możemy podzielić na:

- Grupy **intentional neighbourhood**, należą do nich osoby którym zależy wyłącznie na wspólnym mieszkaniu, w przyjaznym środowisku. Do takich grup można łatwo dołączyć ponieważ są otwarte na każdego chętnego, kto chce zamieszkać we wspólnej przestrzeni (Szurmańska 2015: 39).
- Grupa **intentional community** należą do nich osoby którym zależy na wspólnym mieszkaniu z osobami wyznającymi podobne wartości. Do takich grup trudniej przynależć nowym mieszkańcom, ponieważ nowe osoby muszą wyznawać te same wartości, które kluczowe są dla danej grupy. U podstaw tej grupy znajdują się „idee i ideologie”, dlatego np. jeżeli spoiwem w grupie jest ekologiczny tryb życia to nowi mieszkańcy muszą poza chęcią wspólnego zamieszkania cechować się poszanowaniem ekologicznych wartości (Szurmańska 2015: 39).

Osoby mieszkające w grupach cohousingowych, dostrzegają wiele zalet takiego życia, do najważniejszej zalety należy poczucie wspólnoty – bezpieczne środowisko i sąsiedzi, na których można polegać. Grupy są pełne życia społecznego dostępnego na wyciągnięcie ręki do których należą m.in. wspólne posiłki w których to przypada kolejność każdego członka na gotowanie, a w pozostałe dni przychodzi się tylko jako gość. Mieszkańcy mogą również razem dzielić się pasjami i zainteresowaniami, oglądać filmy czy uprawiać sporty. Osoby mieszkające w społeczności należą do różnych grup wiekowych, w których mieszkańcy wzajemnie sobie pomagają. Wspólne przestrzenie pozwalają zaoszczędzić miejsca w domu prywatnym mieszkańców, na rzecz pralni, suszarni, rowerowni czy warsztatu. Grupa może posiadać w swoim zarządzaniu przedmioty, które są używane przez mieszkańców jednak mogą być drogie lub nieopłacalne dla zakupu jednej rodziny. Do zalet życia w kolektywach należy również zrównoważone podejście do zamieszkania jak również stosowanie zrównoważonych źródeł energii (Wolska i Cieślak 2014: 23).



Rys. 2. Przykład przestrzeni wspólnej grupy cohousingowej (Autor zdjęcia: United Diversity).



Rys. 3. Wspólny posiłek grupy cohousingowej z Seattel (Autor zdjęcia: Tim Pierce).



Rys. 4. Cohousing w miejscowości Nanterre, projekt pracowni MaO architectes + Tectône w 2015 roku..

Architektura mieszkaniowa grup cohousingowych odznacza się zrównoważonym podejściem do projektowaniem a w szczególności poszanowaniem terenu. Mieszkańcy mają do dyspozycji mieszkania lub domy prywatne, wyłącznie do ich dyspozycji, jednak najważniejszym budynkiem jest dom wspólnoty. Przestrzeń wspólna zorganizowana w domu wspólnoty pozwala mieszkańcom na integrowanie się, poznawanie i pielęgnowanie kontaktów między ludzkich, wszystko po to aby stworzyć przyjazne środowisko mieszkaniowe. Współczesne badania potwierdzają tezę, iż życie z rozwiniętymi więzami społecznymi nie tylko poprawia jakość życia (poprzez zadowolenie z niego) ale zmniejsza uczucie samotności co wpływa na jego długość. W budynku wspólnoty, znajduje się duża kuchnia, jadalnia, oraz pokój dzienny. Wszystkie pomieszczenia dostosowane są do liczby mieszkańców np. kuchnia i jadalnia pozwala na wykonanie i spożywanie jednocześnie posiłku przez wszystkich mieszkańców grupy oraz ewentualnych gości. W takim domu znajdować się mogą również pokoje gościnne, pralnia, pomieszczenia zabaw dla dzieci, pomieszczenia pracy czy warsztaty – wszystko w zależności od potrzeb grupy.

Architektura w formule cohousingu w opinia autora jest elementem drugoplanowym, który umożliwi mieszkańcom stworzenie grupy. Ważniejsze są chęci mieszkańców aby stworzyć trwałe relacje i pozytywne środowisko mieszkaniowe. Jeżeli mieszkańcy nie będą chcieli się wspólnie spotykać a jedynie żyć obok siebie to żadna architektura tego nie zmieni. Architektka Kim Grace, która żyje w cohousingu oraz miała okazję go projektować, opowiadając o swoich doświadczeniach i obserwacjach z innych amerykańskich cohousingów, uważa że kluczową rolę odgrywają wspólne posiłki i integrowaniu się w tym momencie. Badaczka zauważył że w grupach w których członkowie spożywają częściej ze sobą wspólny posiłek występuje wyższy poziom zadowolenia z grupy i integracja (Kim 2017), (Stratmann i in. 2013).

3. Przegląd literatury

W polskiej literaturze temat cohousingu przedstawiony jest w pracy doktorskiej Dawida Cieślaka pt. „Cohosing w świetle wykorzystania elementów zrównoważonego rozwoju”. Autor pogłębia temat w autorskiej pracowni projektowej gdzie zajmuje się opracowywaniem projektów cohousingu. Zagadnienia cohousingu przedstawiane są również przez socjologą Annę Wolską, która jest również inicjatorką grupy cohousingowej w Krakowie (np. Wolska i Cieślak 2014). Wśród grupy osób badających i poszerzających wiedzę na temat cohousingu, liczną grupę zajmują architekci, którzy zamieszkują a często projektują taki grupy. Przykładem może być Amerykańska architekt Grace Kim,

która projektowała cohousing w Seattle gdzie aktualnie życie (Kim G 2017) oraz profesor architektury Dick Urban Vestbro żyjący w cohousingu w Sztokholmie (Vestbro 2010). Znacząca ilość publikacji dotyczących cohousingu należy do inicjatorów takich grup, w których opisywane jest podstawowa wiedza dotyczące sposobu organizacji grupy jak i szczegółowe informacje w jaki sposób założyć taką grupę (ScottHanson i ScottHanson 2005), (Vestbro 2010), (Holtzman 2010). W dobie poszerzającego się kryzysu mieszkaniowego w miastach, formuła cohousingu rozpowszechniana jest jako alternatywne rozwiązanie oraz sposób poradzenia sobie z problemem braku mieszkań oraz niskiej jakości architektury mieszkaniowej (Fu 2007), (Tummers 2017), (Hill 2016).

4. Podsumowanie

W świetle współczesnego kryzysu mieszkaniowego a w szczególności mieszkań dostępnych dla osób potrzebujących, formuła zamieszkania w kolektywie typu cohousing jest jedną w możliwość stworzenia wysokiej jakości architektury mieszkaniowej i jakości życia. Tezy te potwierdzane są przez samych mieszkańców, którzy przedstawiają zalety życia w kolektywie oraz popularyzują formułę życia w cohousingu. W opinii autora najtrudniejszym powodem dlaczego formuła cohousingu nie należy do częstych rozwiązań jest wkład pracy ludzi nad stworzeniem grupy. Etap początkowy należy do najbardziej wyczerpujących, na który należy poświęcić odpowiednią ilość czasu na częste dyskusje i spotkania przyszłych mieszkańców. W literaturze etap ten trwa od jednego do pięciu lat, a w spotkania poza mieszkańcami powinni uczestniczyć architekci oraz psychologowie. Fundamentem powodzenia każdej realizacji cohousingu jest silna grupa ludzi dążąca wspólnymi siłami do określonego celu.

5. Literatura

- Cembrzyńska P (2008) Co to jest falanster?, *Sztuka i Filozofia* 32: 107-123.
- Fu M (2007) The role of housing co-operatives in the housing affordability crisis, Bachelor of Planning Undergraduate Thesis.
- Hill S (2016) Cohousing: Shared Futures, Economic & Social Research Council.
- Holtzman G (2010) Introduction to Cohousing & the Australian Context, Cre8 Design Studios.
- Kim G (2017) How cohousing can make us happier, <https://www.youtube.com/watch?v=mguvTfAw4wk> [08.06.2018].
- Margolis D, Entin D (2011) Report on Survey of Cohousing Communities, the Cohousing Association of United States.
- Meltzer G (2005) Sustainable Community. Learning from the cohousing model, Trafford. 4-6
- ScottHanson Ch, ScottHanson K (2005) The Cohousing handbook, Building a place for community, New Society Publishers.
- Stratmann J, Ferreiro LW, Narayan R (2013) Towards Sustainability, Analysis of Collaborative Behaviour in Urban Cohousing, School of Engineering Blekinge Institute of Technology Karlskrona.
- Szurmańska K (2015) Mieszkań i budować w grupie czyli cohousing po Polsku, *Magazyn Wytwórcy* 02: 34-47.
- Tummers L (2017) Learning from co-housing initiatives: Between Passivhaus engineers and active, Delft University of Technology.
- Vestbro DU (2008) History of cohousing – internationally and in Sweden, the Royal Institute of Technology Stockholm.
- Vestbro DU (2010) Living together – Cohousing Ideas and Realities Around the World, Division of Urban and Regional Studies, Royal Institute of Technology.
- Wolska A, Cieślak D (2014) cohousing – współczesny sposób na budowanie i mieszkanie w grupie, *Habitat StartUp KIT*: 11-46.
- Zeuli KA, Cropp R (2004) Cooperatives: Principles and practices in the 21st century, UW Extension.

9. Analiza strat instalacji fotowoltaicznej na podstawie badań symulacyjnych

Analysis of photovoltaic installation losses based on simulation

Parfianowicz Kamil

Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Rzeszowska

Opiekun naukowy: Kazimierz Buczek

Parfianowicz Kamil: kparfianowicz@prz.edu.pl

Słowa Kluczowe: odnawialne źródła energii, fotowoltaika, sprawność, PVsyst

Streszczenie

Praca zawiera opis strat z jakimi mamy do czynienia w przypadku użytkowania instalacji fotowoltaicznej. Badania wykonane zostały w programie PVsyst. W programie został zaprojektowany budynek (dom jednorodzinny), dla którego została dobrana instalacja fotowoltaiczna o mocy 5 kWp. Następnie poddano analizie czynniki wpływające na wartość uzyskanej energii końcowej oraz opisano na podstawie wykresu z jakimi stratami mamy do czynienia użytkując tego typu instalację.

1. Wprowadzenie

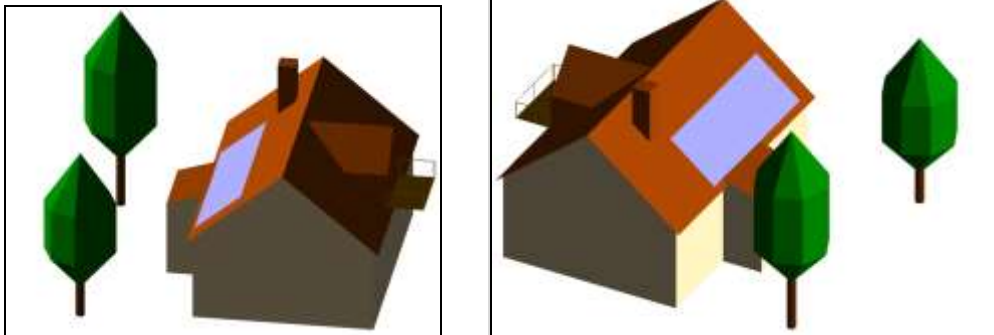
Temat wyczerpujących się źródeł energii konwencjonalnych oraz zależność energetyczna poruszane są coraz częściej zarówno w publikacjach naukowych jak i na seminariach oraz konferencjach. Chcąc uniknąć problemów energetycznych w przyszłości już teraz należy zadbać o to, aby przejście z paliw kopalnych na źródła odnawialne było jak najszybsze i najkorzystniejsze dla systemu elektroenergetycznego. Jedną z dziedzin odnawialnych źródeł energii zapoczątkowaną w połowie XIX w., a prężnie rozwijaną od ponad już pięćdziesięciu lat jest fotowoltaika. Bazuje ona na zjawisku fotowoltaicznym gdzie wskutek absorpcji promieniowania słonecznego przez półprzewodnik z barierą potencjału następuje generacja ujemnego (elektronu) i dodatniego (dziury) ładunku. Ładunki te są rozdzielane przez barierę potencjału i zbierane na elektrodach zewnętrznych. W momencie przyłączenia odbiornika do tych elektrod występuje przepływ prądu (Jastrzębska 2007). Na chwilę obecną wyróżniamy trzy główne technologie ogniw fotowoltaicznych: ogniwa I generacji (poli oraz monokrystaliczne), ogniwa II generacji (amorficzne, cienkowarstwowe) oraz III generacji (organiczne). Najpopularniejsze na rynku są ogniwa krzemowe uzyskujące dość wysoką sprawność oraz niezawodność. Pojedynczy moduł jest w stanie zasilić tylko odbiorniki niewielkich mocy dlatego w celu uzyskania większych parametrów należy łączyć ogniwa równolegle, szeregowo lub w sposób mieszany. Połączenie kilku modułów PV tworzy instalację fotowoltaiczną. W zależności od typu przyłączenia wyróżniamy instalacje on-grid czyli takie przyłączone do sieci elektroenergetycznej oraz instalacje off-grid (wyspowe) które do systemu elektroenergetycznego przyłączone i nie są, a wyprodukowaną energię wykorzystują na potrzeby własne obiektu bądź gromadzą w akumulatorach.

2. Opis badanego obiektu

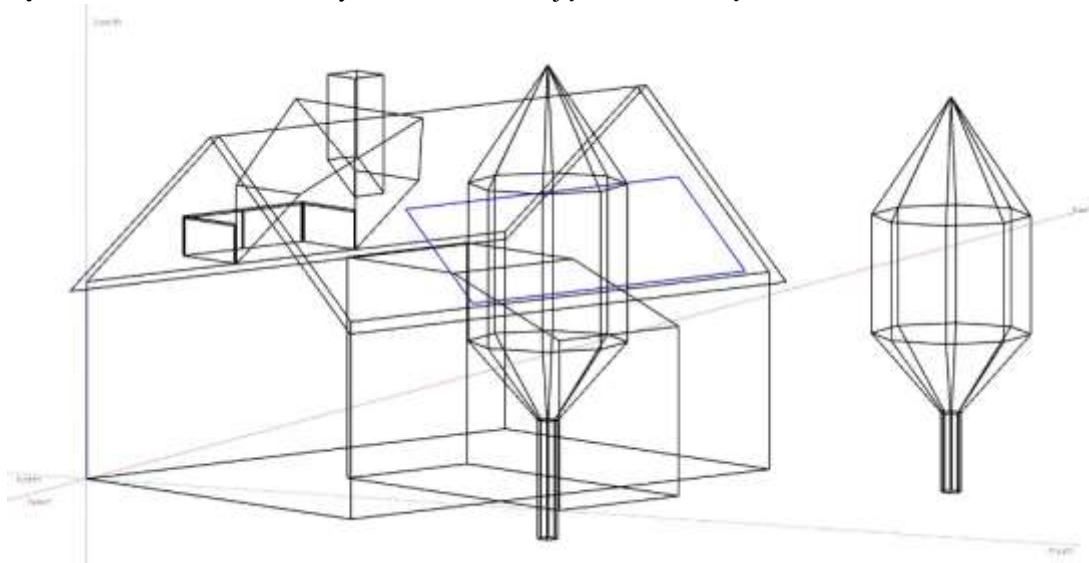
Badany obiekt to dom jednorodzinny ulokowany na terenie Podkarpacia (szczegółowe dane dla obiektu znajdują się w tabeli 1). W domu zastosowano dach dwuspadowy nachylony pod kątem 40°. Na jednej z połaci skierowanej w kierunku północno-wschodnim umieszczona jest lukarna o wymiarach 4 x 2 m, na drugiej skierowanej w kierunku południowo-zachodnim znajduje się komin o wysokości 3 m. Ze względu na dużo większą dostępną powierzchnię, zdecydowano generator fotowoltaiczny umieścić na połaci południowo-zachodniej w odchyleniu od strony południowej o 22°. W pobliżu strony z instalacją PV dodano dwa drzewa mogące powodować jej zacienianie.

Tab. 1. Dane badanego obiektu.

Typ obiektu	Dom jednorodzinny
Położenie	Przemyśl, Polska
Azymut	22°
Wymiary (szerokość x długość x wysokość)	10 x 14 x 5 m
Typ dachu	Dwuspadowy
Kąt nachylenia dachu	40°



Rys. 1. Dwa widoki 3D na budynek wraz z instalacją fotowoltaiczną.



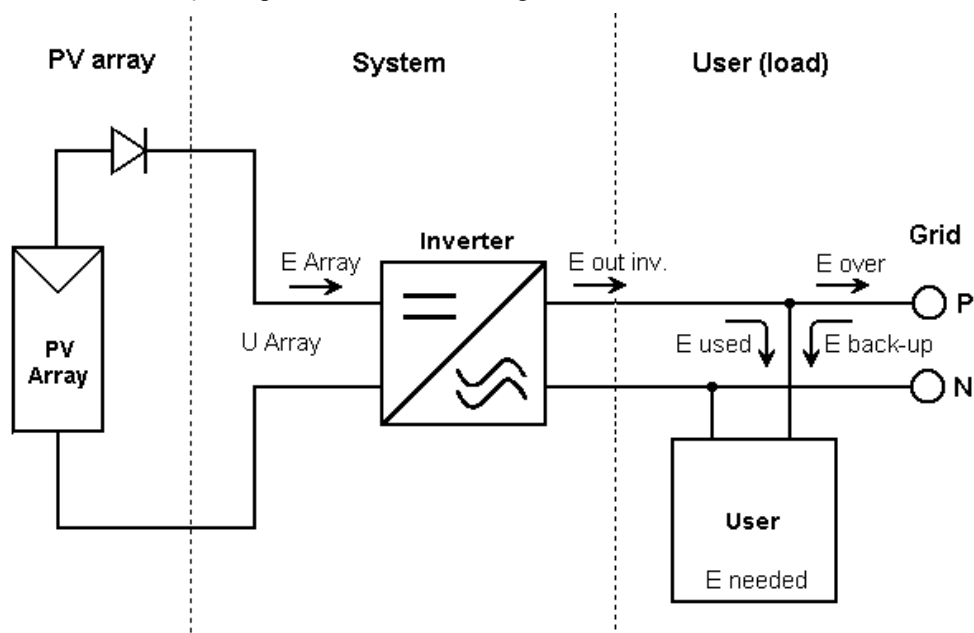
Rys. 2. Perspektywa widoku na badany obiekt.

3. Opis instalacji fotowoltaicznej

Projektowana instalacja jest tzw. systemem sieciowym (on-grid) czyli jest podłączona do sieci elektroenergetycznej. Takie rozwiązanie nie wymaga podłączania dodatkowych baterii akumulatorów przez co jest tańsze i wygodniejsze dla inwestora. Moc wyprodukowana i zużyta rozliczana jest z dystrybutorem energii na podstawie wskazań dwukierunkowego licznika energii.

Do projektu wybrano moduł fotowoltaiczny o mocy 300 Wp wykonany w technologii monokrystalicznej składający się z 60 ogniw połączonych w 3 zespoły. Zabezpieczenie przed prądem wstecznym stanowią zatem 3 diody by-pass, każda zabezpieczająca 20 ogniw. Projektowana instalacja fotowoltaiczna składa się z 18 paneli, co daje łącznie moc 5,4 kWp. Moduły połączono po 9 sztuk w dwa stringi które z kolei przyłączone są do inwertera z możliwością sterowania punktem mocy maksymalnej. Całkowita powierzchnia instalacji wynosi 29,3 m².

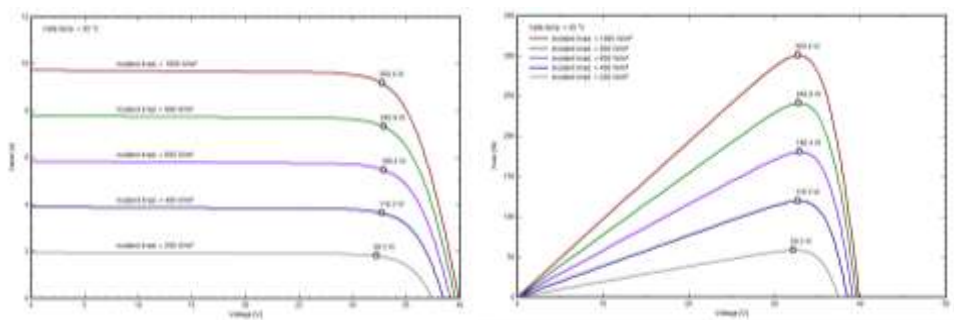
Poniżej przedstawiona jest charakterystyka prądowo-napięciowa oraz zależność mocy dla różnych wariantów natężenia promieniowania badanego modułu.



Rys. 3. Schemat połączenia instalacji PV z siecią elektroenergetyczną (PVsyst).

Tab. 2. Dane znamionowe oraz otrzymane z symulacji dla wybranego modułu PV.

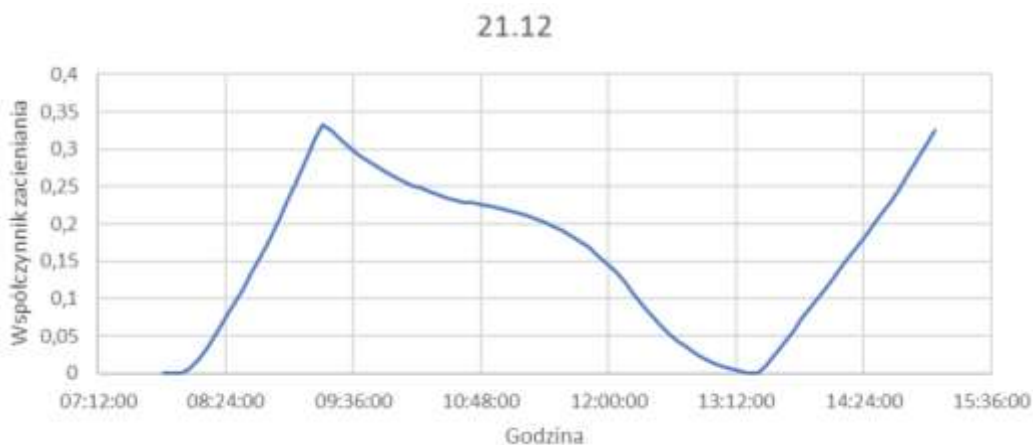
	Dane producenta	Dane z symulacji
Moc znamionowa	300 Wp	300,4 Wp
Prąd zwarcia	9,710 A	9,71 A
Prąd w punkcie MPP	9,160 A	9,17 A
Napięcie obwodu otwartego	39,90 V	39,9 V
Napięcie w punkcie MPP	32,8 V	32,7 V
Temp. wskaźnik mocy	-0,39 %/K	-0,38 %/K
Sprawność	18,4 %	18,47 %



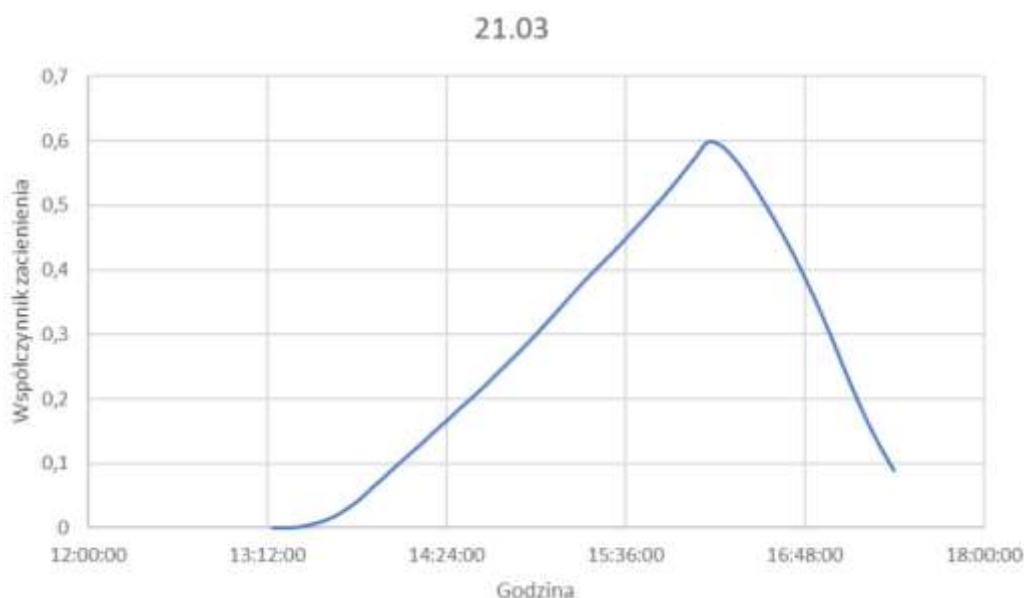
Rys. 4. Charakterystyki badanego modułu 300Wp.

4. Wpływ zacienienia na prace instalacji

Częstą przyczyną utraty mocy w instalacji fotowoltaicznej jest jej nieprawidłowy montaż w pobliżu obiektów które mogą rzucać na nią cień nawet przez kilka godzin dziennie. Do obiektów takich zaliczamy np. kominy, lukarny lub inne elementy konstrukcji dachu, drzewa, słupy a także zalegający śnieg. Parametrem opisującym jaka część instalacji jest zakryta jest tzw. współczynnik zacienienia. Wartość jego wyrażona jest w procentach i podana dla danej pory dnia.



Rys. 5. Wpływ zacienienia na pracę instalacji dla dnia 21.12



Rys. 6. Wpływ zacienienia na pracę instalacji dla dnia 21.03.

Na powyższych charakterystykach można zaobserwować jak współczynnik zacienienia kształtuje się dla zaprojektowanej instalacji. Podczas wędrówki słońca po horyzoncie zmienia się ilość zacienionych modułów. Dla okresu zimowego wartość współczynnika wynosi maksymalnie 35% jednak w związku z tym, że wtedy słońce jest najniżej zacienienie instalacji utrzymuje się praktycznie przez cały dzień. W okresie wiosennym kiedy to słońce jest trochę wyżej cień pokrywa większą część instalacji (nawet 60%) jednak stan ten utrzymuje się przez krótszy czas.

Charakterystyki wykonano dla okresu zimowego (21.12) oraz wiosennego (21.03). Wykres dla jesieni (ok. 21.09) pominięto gdyż jego wartości i charakterystyka są bardzo podobne do charakterystyki wiosennej. W okresie letnim (od kwietnia do września) zacienienie na wybranej instalacji jest bardzo niskie lub w ogóle nie występuje dlatego charakterystyki dla tego okresu również nie zostały przedstawione.

5. Otrzymane wyniki

Wszelkie obliczenia znajdujące się w tej publikacji zostały wykonane w programie PVsyst i przytoczone zostały w postaci raportów generowanych z programu. Główne dane zaprojektowanej instalacji fotowoltaicznej zostały przedstawione w tabeli 3.

Z przedstawionych wyników można odczytać że instalacja największą ilość energii wyprodukowana w lipcu (687,5 kWh), najmniejsza zaś w grudniu (134,3 kWh). Całkowita moc otrzymana z instalacji to 5211 kWh, oznacza to spełnia założone wymagania. Współczynnik wydajności czyli stosunek rzeczywiście wyprodukowanej energii elektrycznej do energii, którą mógłby wyprodukować ten sam system pracując z nominalną sprawnością wacha się w granicach 0.8 co mieści się w normach dla dobrze wykonanych instalacji małej mocy.

Tab. 3. Dane badanej instalacji

	GlobHor kWh/mł	DiffHor kWh/mł	T_Amb °C	GlobInc kWh/mł	GlobEff kWh/mł	EArray kWh	E_Grid kWh	PR
January	23.1	15.12	-2.18	40.0	34.3	185.7	175.9	0.813
February	34.8	22.40	-1.04	50.2	43.8	233.3	221.9	0.819
March	77.6	45.96	3.07	100.4	88.4	466.7	450.1	0.830
April	121.0	64.52	9.18	132.4	120.2	611.7	592.3	0.829
May	146.4	76.17	14.48	142.4	130.5	646.8	624.3	0.812
June	158.1	90.55	16.75	150.1	136.7	676.0	653.6	0.806
July	166.9	90.48	19.50	159.3	145.3	710.8	687.5	0.799
August	133.0	74.29	18.72	139.9	127.3	623.9	603.2	0.798
September	95.8	52.97	13.15	115.7	102.2	513.2	495.8	0.793
October	60.8	30.92	9.26	88.7	77.4	393.8	379.1	0.792
November	27.6	18.12	4.39	44.6	38.7	204.0	193.7	0.804
December	17.8	12.46	-0.66	32.2	26.8	143.3	134.3	0.772
Year	1062.8	593.97	8.78	1196.1	1071.7	5409.1	5211.7	0.807

GlobHor – globalne nasłonecznienie

DiffHor – promieniowanie rozproszone

T_AMB – średnia temperatura otoczenia

GlobInc – nasłonecznienie na płaszczyźnie instalacji PV (bez strat wynikających z zacienienia, zabrudzenia itp.)

GlobEff – efektywne nasłonecznienie na płaszczyźnie instalacji PV (wraz ze stratami)

EArray – energia wyprodukowana przez instalację (na wyjściu inwertera)

E_Grid – energia oddana do sieci (wraz ze stratami przesyłu)

PR – współczynnik wydajności

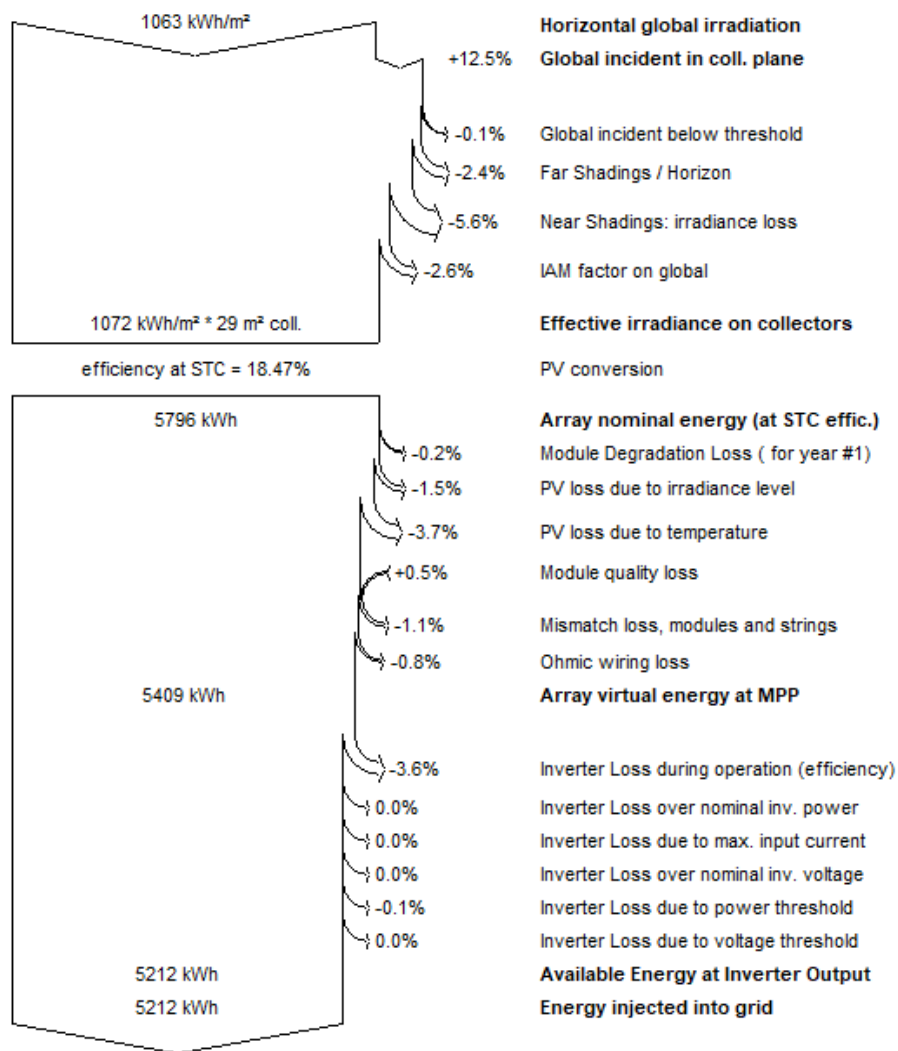
6. Analiza strat mocy

Program PVsyst jest bardzo rozbudowanym narzędziem i analiza strat mocy może być wykonywana na wiele różnych sposobów. W tym rozdziale przedstawiono wraz z krótkim omówieniem tylko dwa z nich (tabela, wykres).

Tab. 4 jest zestawieniem strat jakich najczęściej możemy się spodziewać podczas pracy instalacji fotowoltaicznej. Największe straty spowodowane są nagrzewaniem i wzrostem temperatury paneli oraz straty wynikające z pracy falownika. Ważnym aspektem jest zależność temperatury pracy paneli fotowoltaicznych do uzyskiwanej mocy. Analizując współczynnik TempLss można zaobserwować tam wartości ujemne. Oznacza to, iż w miesiącach zimowych kiedy to temperatura paneli jest niska straty te nie występują, a wręcz przeciwnie – instalacja produkuje więcej mocy niż w zakładanych warunkach STC.

Rysunek 7 przedstawia całościowy rozptył strat w badanej instalacji fotowoltaicznej podzielony na dwie części. W pierwszej (górną) docierające w badanym punkcie terenu natężenie promieniowania przeliczane jest na natężenie bezpośrednio padające na panele (po uwzględnieniu azymutu i kąta pochylenia), a następnie odejmowane są straty wynikające głównie z zacienienia i innych czynników ograniczających padanie promieni słonecznych na panel. Część druga (dolna) obejmuje straty całego systemu wynikające z konwersji energii w ogniwie oraz przetworzeniu jej przez falownik (z DC na AC). Analogicznie jak w przypadku tabeli nr 4 można stwierdzić, że

największe spadki mocy powoduje zacinienie modułów fotowoltaicznych (dalekie – far shadings i bliskie – near shadings), temperatura paneli oraz sprawność inwertera.



Rys. 7. Diagram strat instalacji PV.

7. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych można stwierdzić jak rozkładają się straty w instalacji fotowoltaicznej. Największe spadki mocy powodowane są wskutek cieni rzucanych przez obiekty znajdujące się na trasie wędrówki słońca oraz przez nagrzewanie się samych paneli PV. Duży udział procentowy w stratach ma również falownik przesyłający moc do systemu elektroenergetycznego.

Projektując instalację należy zwrócić uwagę na to, aby tak dobrać elementy by sprawność całego systemu była jak największa oraz na to aby w pobliżu nie było elementów mogących powodować zacinienie. Ważne jest to zwłaszcza w przypadku małych powierzchni gdzie nie ma

miejsca na zamontowanie kilkunastu modułów. W omawianym przypadku z 5796 kWh otrzymanych w warunkach standardowych (STC) do sieci oddawane jest 5212 kWh co daje 584 kWh różnicy.

Tab. 4. Zestawienie strat generatora fotowoltaicznego

	MisLoss	TempLss	DegrLss	ShdLoss	OhmLoss	InvLoss	E_Grid
	kWh	kWh	kWh	kWh/mJ	kWh	kWh	kWh
January	2.057	-8.39	0.371	4.014	0.900	9.87	175.9
February	2.587	-6.00	0.474	4.197	1.456	11.34	221.9
March	5.180	-3.11	0.957	7.700	3.392	16.55	450.1
April	6.797	21.11	1.300	5.656	5.144	19.32	592.3
May	7.190	38.74	1.412	4.514	5.694	22.41	624.3
June	7.512	43.30	1.479	5.250	5.712	22.34	653.6
July	7.901	53.88	1.571	5.325	6.089	23.36	687.5
August	6.935	45.91	1.377	5.486	5.328	20.70	603.2
September	5.702	23.72	1.106	8.250	4.221	17.46	495.8
October	4.373	11.60	0.837	7.811	3.079	14.67	379.1
November	2.261	-3.37	0.418	3.933	1.127	10.35	193.7
December	1.587	-5.76	0.290	3.278	0.625	9.04	134.3
Year	60.082	211.65	11.592	65.414	42.765	197.41	5211.7

MisLoss – straty niedopasowania

TempLss – straty wynikające ze zmiany temperatury

DegrLss – straty degradacji modułów

ShdLoss – straty wynikające z zacienienia

OhmLoss – straty omowe

InvLoss – całkowite straty falownika

E_Grid – energia oddana do sieci (wraz ze stratami przesyłu)

8. Bibliografia

- Jastrzębska G (2007) Odnawialne Źródła Energii i Pojazdy Proekologiczne, Wydawnictwa Naukowo – Technologiczne, Warszawa
- Kandasamy C, Prabu P, Niruba K (2013) Solar Potential Assessment Using PVSYSST Software, 2013 International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE)
- PVsystem, www.pvsyst.com (28.11.2018)
- Sarniak M (2015) Budowa i eksploatacja systemów fotowoltaicznych, Grupa MEDIUM, Warszawa
- Szymański B (2017) Instalacje fotowoltaiczne, Wydawca Globenergia, Kraków
- Teneta J (2012) Projektowanie systemów PV, AGH, Kraków
- Tytko R (2017) Urządzenia i systemy energetyki odnawialnej, Wydawnictwo Towarzystwa Słowaków w Polsce, Kraków
- Yadav P, Kumar N, Chandel S (2015) Simulation and Performance Analysis of a 1kWp Photovoltaic System Using PVSyst, 2015 International Conference On Computation Of Power, Energy, Information and Communication

10. Wpływ temperatury na parametry pracy paneli fotowoltaicznych

The impact of the temperature on the parameters of photovoltaic panels

Parfianowicz Kamil

Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Politechnika Rzeszowska

Opiekun naukowy: Kazimierz Buczek

Parfianowicz Kamil: kparfianowicz@prz.edu.pl

Słowa Kluczowe: odnawialne źródła energii, fotowoltaika, sprawność, PVsyst

Streszczenie

W artykule opisano jeden z głównych czynników który wpływa na otrzymywaną przez producentów sprawność paneli fotowoltaicznych. W pierwszej części opisano warunki w jakich moduły są badane, zaprezentowano również współczynniki temperaturowe oraz model ogniwa PV z krótką charakterystyką każdego znajdującego się na nim elementu. Model ten został wykorzystany do obliczeń symulacyjnych. Część druga zawiera badania symulacyjne przeprowadzone w programie PVsyst, gdzie dla dwóch typów paneli wyznaczono charakterystyki pokazujące jak temperatura wpływa na ich wydajność energetyczną. Część trzecia opisuje stan obecnej technologii w chłodzeniu paneli. W ostatnim rozdziale znajduje się podsumowanie opisywanych technologii.

1. Wstęp

Zwiększająca się popularność modułów fotowoltaicznych wymusza na producentach i naukowcach prowadzenia ciągłych badań oraz wprowadzania coraz to nowych rozwiązań technologicznych w ich produkcji. Jednymi z głównych kryteriów jakim kierują się inwestorzy przy wyborze paneli PV są: moc nominalna oraz sprawność. Parametry te determinują uzysk energii elektrycznej z całej instalacji w zależności od warunków środowiskowych czyli wartości nasłonecznienia, temperatury oraz prędkości wiatru.

2. Warunki badania paneli fotowoltaicznych

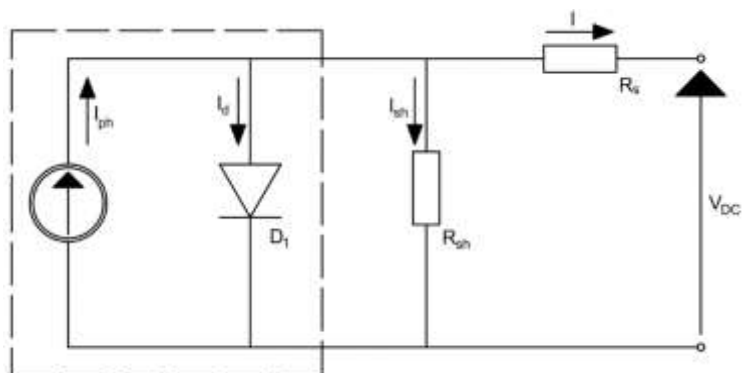
Panele fotowoltaiczne pracują w zależności od miejsca ich zamontowania w różnych warunkach nasłonecznienia. Liczba godzin słonecznych w Polsce jest na poziomie 1600 h, z czego tylko 15% to godziny o pełnym nasłonecznieniu (SMA Polska, 2014). Ilość energii słonecznej, która dociera do paneli jest zależna od wielu czynników (np. miejsca instalacji, temperatury otoczenia). Aby możliwe było porównanie różnych modułów PV dane znamionowe podawane są dla standardowych warunków atmosferycznych czyli STC (Standard Test Conditions). Rzeczywiste warunki pracy odbiegają jednak od warunków STC przy których wyznaczana jest m.in. moc nominalna czy sprawność. Dlatego większość producentów coraz częściej podaje obok warunków standardowych tzw. warunki normalne, czyli NOCT (Normal Operating Cell Temperature). Dane dla warunków NOCT są znacznie bliższe tym, które osiągnie instalacja pracując w warunkach rzeczywistego nasłonecznienia. Zestawienie parametrów znajduje się w tabeli poniżej.

Tab 1. Warunki STC i NOCT do oceny parametrów paneli fotowoltaicznych

STC – Standard Test Condition	
Natężenie promieniowania słonecznego	1000 W/m ²
Temperatura ogniwa oświetlanego panelu	25°C
Spektrum promieniowania dla gęstości atmosfery 1,5	AM 1.5
NOCT – Normal Operating Cell Temperature	
Natężenie promieniowania słonecznego	800 W/m ²
Temperatura otoczenia	20°C
Spektrum promieniowania dla gęstości atmosfery	AM 1.5
Prędkość wiatru	1 m/s

3. Model ogniwa fotowoltaicznego (Sarniak 2015)

Idealne ogniwo fotowoltaiczne można przedstawić za pomocą prostego modelu połączenia źródła prądu i diody. Zaznaczone to zostało linią przerywaną na schemacie 1.



Rys. 1. Schemat zastępczy ogniwa fotowoltaicznego (Sarniak 2015).

Aby lepiej odwzorować rzeczywiste warunki pracy ogniwa dodano dwie wartości rezystancji. Są to tzw. rezystancje pasożytnicze - równoległa (bocznikująca) R_{sh} oraz szeregową R_s . Dla tego schematu można zapisać zależność:

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

gdzie:

I – natężenie prądu ogniwa PV [A]

I_{ph} – natężenie prądu generowanego w ogniwie [A]

I_d – natężenie prądu diody [A]

I_{sh} – natężenie prądu płynącego przez bocznik [A]

Podstawiając do równania 1 zależności na natężenie prądu diody oraz prądu płynącego przez bocznik otrzymujemy:

$$I = I_{ph} - I_s * \left(\exp \left(\frac{V + I * R_s}{n * V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + I * R_s}{R_{sh}} \quad (2)$$

gdzie:

I_s – wsteczny prąd nasycenia diody [A]

V – napięcie ogniwa PV [V]

V_t – napięcie termiczne ogniwa

n – współczynnik jakości diody

R_s – rezystancja szeregową [Ω]

R_{sh} – rezystancja bocznikowa [Ω]

Napięcie termiczne ogniwa można wyznaczyć ze wzoru:

$$V_t = \frac{k_B * T_C}{q} \quad (3)$$

gdzie:

V_t – napięcie termiczne ogniwa

k_B – stała Boltzmanna $1,38 * 10^{-23}$ [J*K-1]

q – ładunek elektronu $1,602 * 10^{-19}$ [°C]

$$I_s = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{n \cdot V_t}\right) - 1} \quad (4)$$

gdzie:

I_{sc} – prąd zwarcia ogniwa
V_{oc} – napięcie obwodu otwartego

Rezystancja szeregową R_s oraz równoległą R_{sh} powodują straty i zmniejszenie sprawności modułów. Pierwsza z nich reprezentuje rezystancje półprzewodnika, metalowych kontaktów oraz rezystancję przejścia metal-półprzewodnik, druga natomiast jest wynikiem mechanicznych nieszczelności oraz defektów złącza i struktur p i n (Ceran 2018). W idealnym ogniwie wartość rezystancji szeregową powinna dążyć do zera, a równoległej (bocznikowej) do nieskończoności.

Pracę ogniwa można również reprezentować poprzez model dwudiodowy, gdzie zamiast jednej diody D1 stosuje się dwie diody. Wtedy to prąd I_d z modelu jednodiodowego rozkłada się na składowe: dyfuzyjną oraz rekombinacyjną. Model ten jest bardziej dokładny jeżeli chodzi o obliczenia, jednak w programie wykorzystanym do symulacji zaimplementowany jest model jednodiodowy i taki został opisany.

4. Zmiana parametrów pracy ogniwa związana za zmianą temperatury

Temperatura panelu fotowoltaicznego zależy m.in. od: natężenia promieniowania słonecznego, temperatury otoczenia, prędkości wiatru czy materiału z którego panel jest wykonany. Głównym powodem zmniejszenia mocy jest wzrost drgań atomów sieci krystalicznej z której zbudowane jest ogniwo. Drganie te utrudniają przepływ elektronów czego konsekwencją jest mniejsza siła elektromotoryczna czyli spadek napięcia. (Szymański 2017). Wartością wyjściową do obliczeń jest temperatura w warunkach STC czyli 25 °C.

Moduły fotowoltaiczne scharakteryzowane są przez trzy główne współczynniki związane z temperaturą: wskaźnik mocy, wskaźnik napięcia oraz wskaźnik prądu (tabela 2).

Tab. 2. Zestawienie wskaźników temperaturowych dla modułu z krzemu krystalicznego (Szymański 2017).

Polska nazwa parametru	Angielska nazwa parametru	Typowa wartość dla modułu z krzemu krystalicznego
Temperaturowy współczynnik mocy P _{max}	Temperature Coefficient of P _{max}	- 0,41 %/°C
Temperaturowy współczynnik napięcia V _{oc}	Temperature Coefficient of V _{oc}	- 0,31 %/°C
Temperaturowy współczynnik prądu I _{sc}	Temperature Coefficient of I _{sc}	+ 0,06 %/°C

Analizując wymienione w tabeli 2 współczynniki można dojść do wniosku, że najważniejszy jest temperaturowy wskaźnik mocy maksymalnej, gdyż to od jego wartości zależy ilość wyprodukowanej energii. Większa wartość tego współczynnika powoduje szybsze nagrzewanie się ogniwa co jest konsekwencją szybszego spadku mocy. Jednocześnie ze zmieniającą się wartością temperatury zmienia się także prąd. Współczynnik I_{sc} dla prądu jest dodatni co oznacza że w przeciwieństwie do napięcia jego wartość rośnie. Jednak w porównaniu do pozostałych współczynników z tabeli 2 jest to wartość bardzo mała.

5. Analiza wpływu temperatury wykonana w programie PVsyst

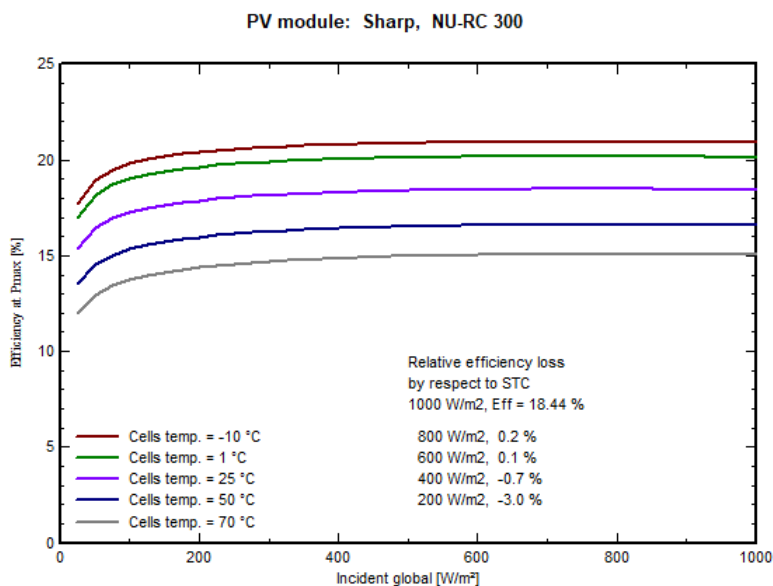
Do przeprowadzenia badań określających wpływ temperatury i nagrzewania się ogniw wykorzystano program PVsyst. Jest to komercyjne oprogramowanie służące do badań, projektowania oraz symulacji instalacji fotowoltaicznych. Analizie poddano dwa panele wiodących producentów: Sharp oraz REC. Wyznaczono charakterystyki sprawności i mocy dla różnych wariantów temperatury oraz wpływ temperatury na wartości rezystancji szeregowej i boczniowej.

Sharp NU-RC 300

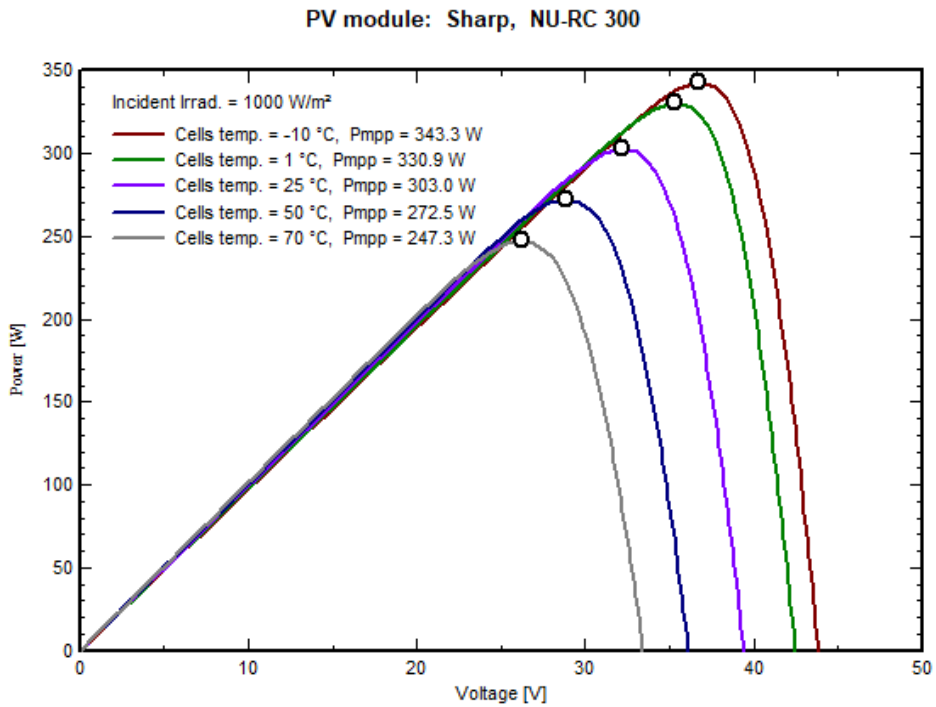
Pierwszy z badanych paneli to Sharp NU-RC 300. Wykonany jest w technologii monokrystalicznej, moc nominalna 300Wp a na rynek wprowadzony został w 2016 roku. Więcej danych znamionowych znajduje się w tabeli 3.

Tab. 3. Dane techniczne panelu Sharp NU-RC 300 odczytane z karty katalogowej oraz otrzymane w wyniku badań symulacyjnych.

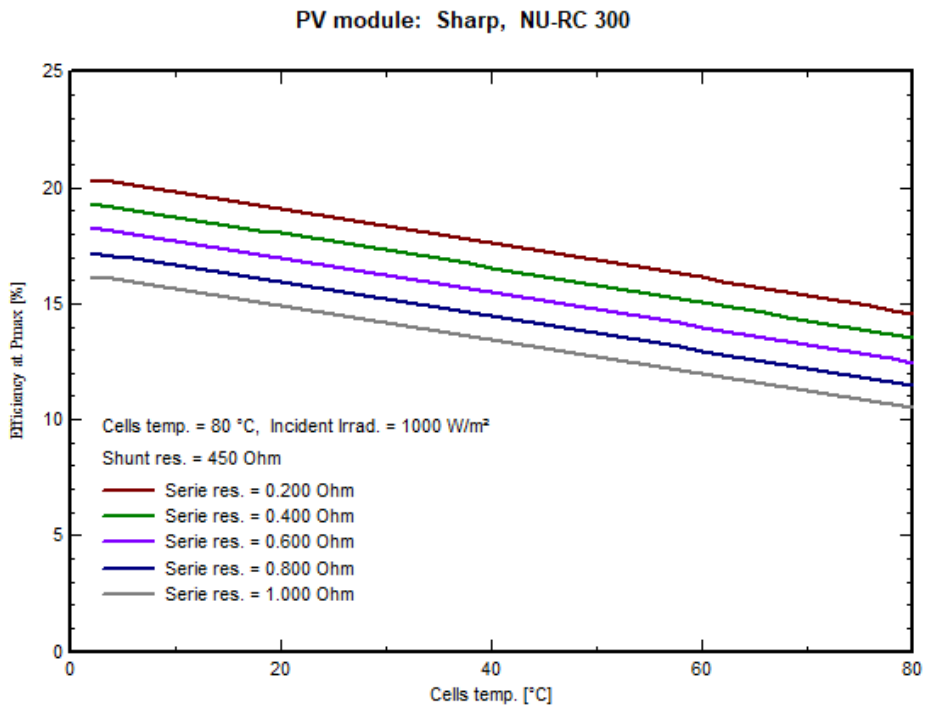
	Karta katalogowa	Dane symulacyjne
Moc nominalna	300 Wp	303,0 W
Sprawność	18,3 %	18,4 %
Napięcie obwodu otwartego	39,4 V	39,4 V
Napięcie w punkcie MPP	31,2 V	32,2 V
Prąd zwarcia	9,97 A	9,97 A
Prąd w punkcie MPP	9,63 A	9,42 A
Temperaturowy wskaźnik mocy	-0,40 %/°C	-0,39 %/°C
Rezystancja szeregowa		0,26 Ω
Rezystancja równoległa		450 Ω
Liczba ogniw		1 x 60
Technologia		Monokrystaliczna



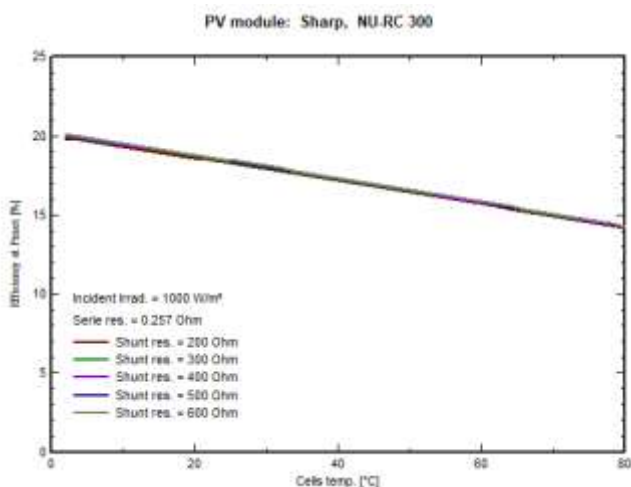
Rys. 2. Charakterystyka sprawności dla różnych wariantów temperatury ognia.



Rys. 3. Charakterystyka mocy dla różnych wariantów temperatury ogniwa.



Rys. 4. Charakterystyka sprawności dla różnych wariantów rezystancji szeregowej.



Rys. 5. Charakterystyka sprawności dla różnych wariantów rezystancji równoległej.

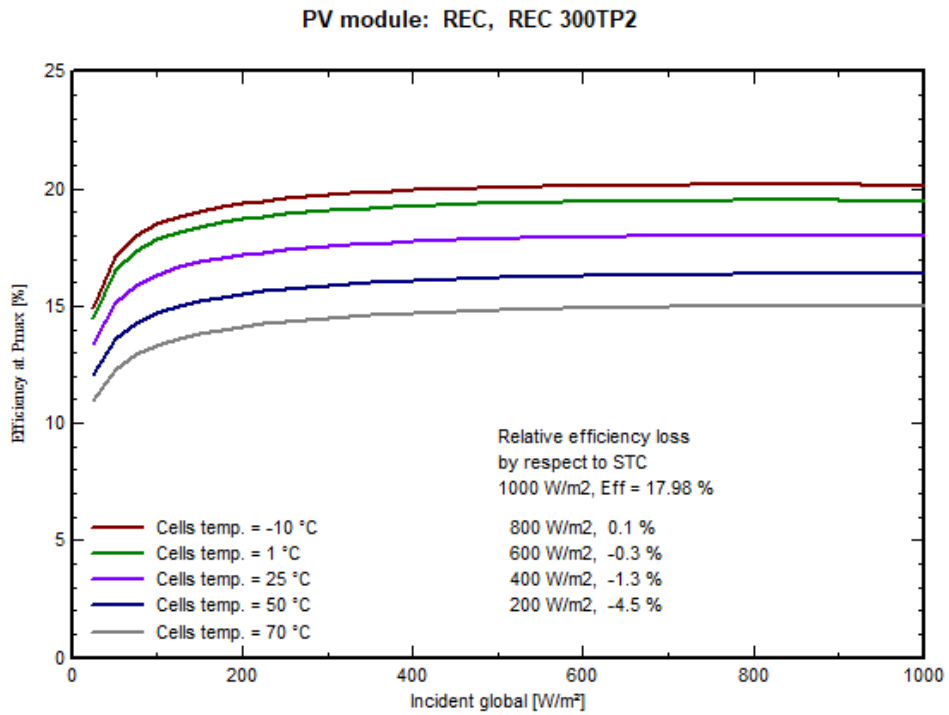
Analizując dane z tabeli nr 3 można stwierdzić, że wyniki symulacji w bardzo niewielkim stopniu odbiegają od danych katalogowych podanych przez producenta. Wykonane charakterystyki na rysunkach 2 i 3 pokazują wpływ temperatury na sprawność oraz moc wyjściową modułów. Obie z tych wartości zmniejszają się wraz ze wzrostem temperatury pojedynczej celi. W bardzo słoneczny dzień kiedy temperatura ta może wzrosnąć nawet do 70°C moc modułu spada o ponad 50W. Odwrotnie dzieje się gdy ogniwo zostaje schłodzone – wtedy w temperaturze bliskiej 0°C można uzyskać moc ok. 30W większą niż deklaruje producent dla warunków STC. Charakterystyki z rysunków 4 i 5 obrazują z kolei wpływ rezystancji szeregowej i równoległej na sprawność ogniwa. Wraz ze wzrostem temperatury wartości tych rezystancji maleją co wpływa niekorzystnie na sprawność paneli.

REC 300TP2

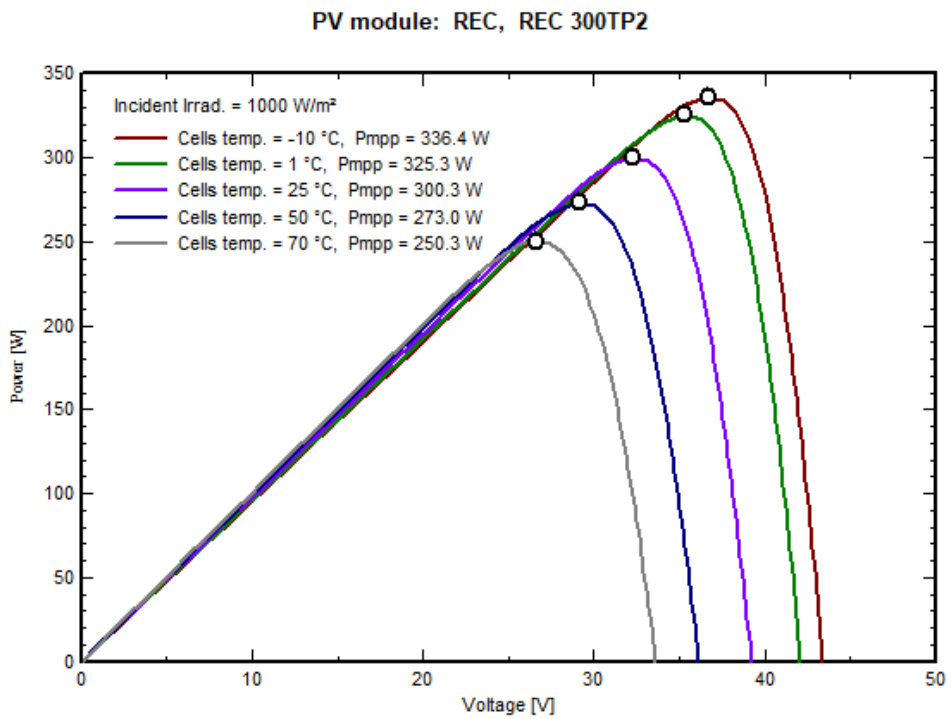
Kolejnym z przebadanych paneli jest moduł firmy REC o oznaczeniu 300TP2. Jego moc wynosi tyle samo co w poprzedniku, różni się użytym do produkcji rodzajem krzemu (polikrystaliczny) a także ilością połączonych ogniw. W tym przypadku na podobnej powierzchni ulokowano ich 120.

Tab. 4. Dane techniczne panelu REC 300TP2 odczytane z karty katalogowej oraz otrzymane w wyniku badań symulacyjnych

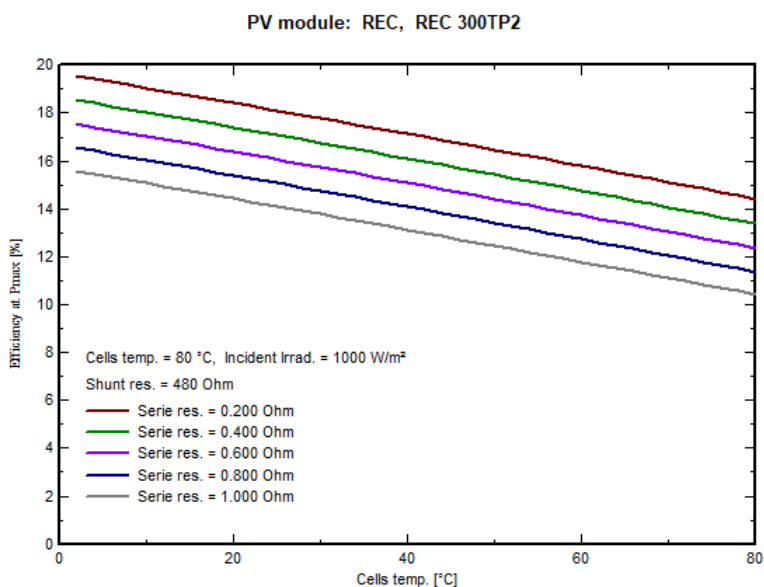
	Karta katalogowa	Dane symulacyjne
Moc nominalna	300 Wp	300,3 W
Sprawność	18,0 %	18,0 %
Napięcie obwodu otwartego	39,2 V	39,2 V
Napięcie w punkcie MPP	32,5 V	32,3 V
Prąd zwarcia	9,82 A	9,82 A
Prąd w punkcie MPP	9,24 A	9,30 A
Temperaturowy wskaźnik mocy	-0,36 %/°C	-0,36 %/°C
Rezystancja szeregową		0,22 Ω
Rezystancja równoległa		480 Ω
Liczba ogniw		2 x 60
Technologia		Polikrystaliczna



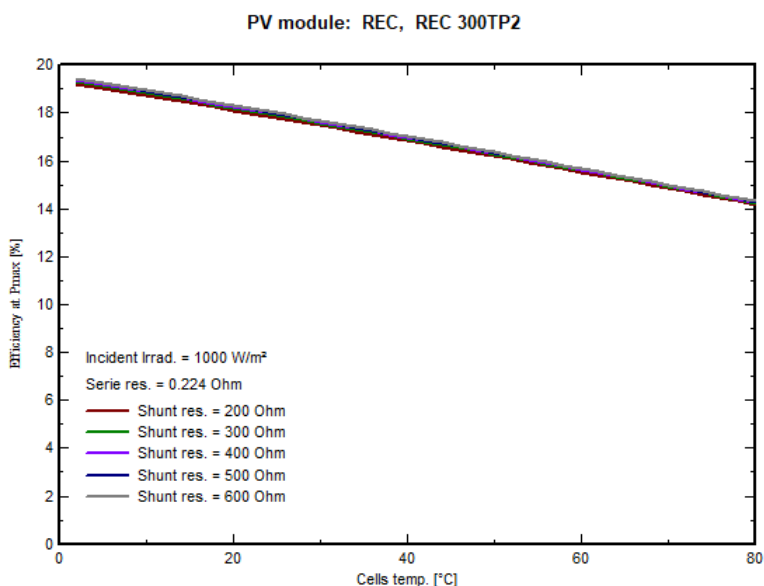
Rys. 6. Charakterystyka sprawności dla różnych wariantów temperatury ogniwa.



Rys. 7. Charakterystyka mocy dla różnych wariantów temperatury ogniwa.



Rys. 8. Charakterystyka sprawności dla różnych wariantów rezystancji szeregowej.



Rys. 9. Charakterystyka sprawności dla różnych wariantów rezystancji równoległej.

Podobnie jak w przypadku panelu firmy Sharp, tu również można zauważyć że wzrastająca temperatura znacznie obniżyła sprawność oraz moc badanego ogniwa. W temperaturze 50°C moc tego modułu wynosiła 273W, natomiast w 70°C było to już tylko 250W.

6. Opis dotychczasowych rozwiązań chłodzenia paneli

Najpopularniejszym sposobem chłodzenia paneli obecnie stosowanym są panele hybrydowe PVT czyli połączenie ogniwa słonecznego z kolektorem. W ogniwie takim zewnętrzną część stanowi moduł fotowoltaiczny, natomiast w dolnej części zastosowano rozwiązanie, które polega na wbudowaniu rurek z tworzywa sztucznego przez które przepływa woda. Rozwiązanie to jest o tyle

skuteczne, że nie tylko powoduje chłodzenie ogniwa, ale także pozwala dzięki kogeneracji na lepsze wykorzystanie energii ze słońca (Tytko 2017). Sprawność takiego urządzenia może wynieść od 60 do nawet 80%. Kolejnym ciekawym projektem są panele PV z warstwą tlenku krzemu. Technologia opracowana na uniwersytecie Stanforda polega na pokryciu górnej części modułu warstwą szkła, która zawiera tlenek krzemu SiO₂. Warstwa ta poprzez zastosowanie specjalnej struktury pozwala na odprowadzenie części ciepła docierającego ze słońca do ogniwa (Linxiao i in. 2014). Ponadto istnieje wiele innych rozwiązań opartych na chłodzeniu pasywnym lub aktywnym opisanych m.in. w: (Moharram i in. 2013; Popovici i in. 2015; Safi i Munday 2015).

7. Podsumowanie

Celem pracy było sprawdzenie w jaki sposób nagrzewanie się paneli fotowoltaicznych wpływa na osiągnięte przez nie parametry pracy oraz przegląd literaturowy dotychczasowych rozwiązań obniżania temperatury paneli. Po przeprowadzonych badaniach symulacyjnych można stwierdzić, że temperatura pracy ogniw fotowoltaicznych ma znaczny wpływ na sprawność i otrzymywaną moc z całej instalacji. Oba badane panele wykazały podobne właściwości w momencie zmiany temperatury ich ogniw. W przypadku wzrostu temperatury moc ich spadła o około 15%, w przypadku zmniejszenia wartości temperatury moc wzrosła o około 10%.

Różne potrzeby inwestorów wymagają często aby instalacje takie były wykonywane na małych powierzchniach (np. dachy budynków jednorodzinnych, instalacje przydomowe wolnostojące lub miejsca zacienione) ale z jak największą mocą zainstalowaną. Projektując instalacje należy liczyć że na 1kWp produkowanej energii potrzebujemy ok. 5-6m² powierzchni. Zwiększając sprawność poprzez obniżanie temperatury pozwoli z coraz to mniejszych powierzchni uzyskać większą moc.

8. Literatura

- Ceran B (2018) Modelowanie i analiza pracy modułu fotowoltaicznego w lokalnych warunkach atmosferycznych – Energetyka Solarna w Badaniach Naukowych, Wydawca Fundacja na rzecz Czystej Energii, Poznań, s. 184-198
- Linxiao Z, Aaswath R, Xingze K i in. (2014) Radiative cooling of solar cells, *Optica* 1, s. 32-38
- Moharram K, Kandil H, El-Sherif H (2013) Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling, *Ain Shams Engineering Journal*, Volume 4, Issue 4, s. 869-877
- Popovici C, Hudisteanu S, Mateescu T (2015) Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks, *Sustainable Solutions for Energy and Environment, EENVIRO - YRC 2015*
- REC karta katalogowa, https://www.recgroup.com/sites/default/files/documents/ds_re_c_twinpeak_2_series_rev_e_pol.pdf
- Sarniak M (2015) Budowa i eksploatacja systemów fotowoltaicznych, Grupa MEDIUM, Warszawa
- Sharp karta katalogowa, https://www.sharp.pl/cps/rde/xbcr/documents/documents/Marketing/Datasheet/1610_NURC300W_Mono_Datasheet_PL.pdf
- SMA Polska (2014) https://www.sma.de/fileadmin/content/landingpages/pl/FAQ/TI_przewy_miarowanie_DC_AC.pdf
- Szymański B (2017) Instalacje fotowoltaiczne, Wydawca Globenergia, Kraków
- Safi T, Munday J (2015) Improving photovoltaic performance through radiative cooling in both terrestrial and extraterrestrial environments, *Opt. Express* 23, A1120-A1128
- Tytko R (2017) Urządzenia i systemy energetyki odnawialnej, Wydawnictwo Towarzystwa Słowaków w Polsce, Kraków

11. Wpływ światła i pH na wzrost i rozwój *Chlorella vulgaris*

Effect of light and pH on the growth and development of *Chlorella vulgaris*

Ratomski Patryk, Hawrot-Paw Małgorzata

Katedra Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii, Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa,
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Opiekun naukowy: Małgorzata Hawrot-Paw

Patryk Ratomski: Patryk.Ratomski@zut.edu.pl

Słowa kluczowe: biomasa, mikroglony, fotobioreaktor, optymalizacja produkcji

Streszczenie

Celem przeprowadzonych badań było określenie optymalnych warunków do produkcji energetycznej biomasy mikroglonów z gatunku *Chlorella vulgaris* w zakresie czasu oświetlenia hodowli oraz pH.

Mikroglony hodowano w podłożu F2 o pH 6, 7, 8 i 9. Doświadczenie prowadzono w fotobioreaktorach rurowych oświetlanych przez 12, 18 lub 24 godz. Do oświetlenia każdego fotobioreaktora wykorzystano oświetlenie LED o mocy 9 W, w którym zastosowano diody obejmujące zakres fali światła fotosyntetycznie czynnego, tj. 400 - 700 nm. Zawartość biomasy określono metodą grawimetryczną z wykorzystaniem wagosuszarki oraz metodą spektrofotometryczną na podstawie zawartego w komórkach mikroglonów chlorofilu *a*. Analizy wagowe wykonano w dniu rozpoczęcia doświadczenia, a następnie po pięciu, dziesięciu oraz piętnastu dniach hodowli. Zawartość chlorofilu *a* oznaczono w 15 dniu doświadczenia.

Na podstawie wyników badań największy przyrost biomasy odnotowano w hodowli oświetlanej przez 18 godzin oraz przy pH 9, gdzie średnia ilość biomasy wynosiła 525 mg l⁻¹. W pozostałych wariantach, przy pH 6, 7 i 8, wartości te były niższe odpowiednio o 1, 5 i 7%. Największą zawartość chlorofilu *a* (146 mg·m⁻³) oznaczono przy zastosowaniu fotoperiodu 18/6 oraz pH 7, natomiast w pozostałych obiektach były to wartości niższe w zakresie od 37 do 83%.

1. Wstęp

Chlorella vulgaris jest autotroficznym organizmem jednokomórkowym żyjącym w środowisku wodnym lub wilgotnym, który do wzrostu wymaga przede wszystkim dostępu do wody, światła, dwutlenku węgla oraz podstawowych składników pokarmowych takich jak azot, fosfor, potas, magnez, żelazo oraz siarka (Ratledge i Cohen 2008). Mikroglony, w porównaniu do roślin, charakteryzują się bardziej efektywną fotosyntezą oraz większym przyrostem biomasy (Miao i Wu 2006). Z powodzeniem wykorzystuje się je do oczyszczania ścieków (Munoz i Guieysse 2006), w przemyśle farmaceutycznym, jako dodatek nawozowy w rolnictwie, składniki pokarmowe dla ludzi i paszę dla zwierząt (Lorenz i Cysewski 2003; Spolaore i in. 2006), a ponadto w procesach związanych z pozyskiwaniem energii, w tym produkcji biopaliw (Chisti 2007).

Biomasę mikroglonów produkuje się w systemach otwartych lub zamkniętych, bądź też w systemach hybrydowych, które różnią się między sobą przede wszystkim kosztami budowy i eksploatacji, ale również wydajnością produkcji biomasy oraz zakresem optymalizacji bioprocessów (Tab. 1).

Do systemów otwartych należą stawy hodowlane (Rys. 1), zwane też stawami glonowymi. Systemy te charakteryzują się prostą konstrukcją, niskim kosztem budowy oraz eksploatacji. Niewielka głębokość stawów (0,3 m) zapewnia mikroglonom odpowiednią ilość światła niezbędnego do prowadzenia procesu fotosyntezy (Chisti 2007). W celu wyeliminowania osadzania się biomasy na dnie zbiornika, stawy wyposażone są w turbiny recyrkulacyjne (Spolaore i in. 2006). Do podstawowych wad tych rozwiązań należy ograniczona kontrola procesu produkcji (Chisti 2007; Klimiuk i in. 2012) oraz nadmierna ewaporacja.

Systemy zamknięte to fotobioreaktory (Rys. 2) o znacznie zróżnicowanej budowie, w tym kolumnowe, barbotażowe, panelowe, poziome rurowe, typu *airlift*, spiralne, zbiornikowe, mieszane / hybrydowe (Patyna i Witczak 2016). W porównaniu do systemów otwartych hodowla mikroglonów w fotobioreaktorach pozwala na uzyskanie wielokrotnie wyższych plonów (Klimiuk i in. 2012), głównie poprzez możliwość kontroli i sterowania ich pracą. Fotobioreaktory pozwalają optymalizować proces produkcji biomasy dzięki możliwości stabilizacji temperatury, odczynu, zapewnienia odpowiedniego rodzaju oświetlenia, możliwości dozowania składników odżywczych w ilościach dostosowanych do wymogów pokarmowych mikroglonów.

Tab. 1. Porównanie systemów otwartych, fotobioreaktorów i hodowli hybrydowych do hodowli glonów (Alabi i in. 2009)

Czynnik	Systemy otwarte	Fotobioreaktory	Hodowle Hybrydowe
gęstość komórek w hodowli	niska	średnia	wysoka
czynniki ograniczające wzrost	światło	światło	tlen
powierzchnia w relacji objętości	wysoka	bardzo wysoka	nie dotyczy
kontrola parametrów	miska	średnia	bardzo wysoka
dostępność na rynku	łatwo dostępna	niestandardowe obiekty	łatwo dostępna
koszt konstrukcji na jednostkę	średni	wysoki	niski
koszt operacyjny	średni	wysoki	niski
baza technologiczna	łatwo dostępna	średnio dostępna	łatwo dostępna
ryzyko zanieczyszczenia	wysokie	średnie	niskie
straty wody	wysokie	średnie	niskie
uzależnienie od pogody	wysokie	średnie	niskie
utrzymanie	łatwe do utrzymania	trudne do utrzymania	wymaga specjalistycznego utrzymania
podatność na przegrzanie	niska	wysoka	nie dotyczy
skłonność do nadmiernego poziomu O ₂	niska	wysoka	nie dotyczy
łatwość czyszczenia	bardzo łatwe	trudne	trudne
łatwość skalowania	wysoka	zmienna	wysoka
wykorzystanie powierzchni ziemi	wysokie	różne	niskie
zastosowanie do różnych gatunków	wąskie	przystosowane	wąskie

Istotnym elementem związanym z efektywną produkcją biomasy mikroglonów jest ustalenie ich minimalnych wymagań pokarmowych z wykorzystaniem formuły cząsteczkowej biomasy a mianowicie: CO-0,48; H-1,83; N-0,11; P-0,01 (Grobbelar 2004). Związki biogenne takie jak fosfor muszą zostać dostarczone w ilościach większych, ponieważ fosfor tworzy kompleksy z jonami żelaza i po dodaniu do podłoża nie jest w całości dostępny dla alg (Molina i in. 1999). Ważnym parametrem jest również temperatura, która podczas hodowli powinna mieścić się w przedziale 20-30 °C (Rokicka i in. 2014). Optymalna temperatura zależy przede wszystkim od rodzaju wykorzystywanego szczepu mikroglonów.

Intensywność i czas oświetlania hodowli wpływają bezpośrednio na wzrost mikroglonów i proces fotosyntezy. Organizmy te potrzebują nie tylko optymalnych warunków oświetleniowych, ale również fazy braku dostępu do światła. Mikroglony wykorzystują światło w fazie jasnej, podczas której zachodzi szereg procesów fotochemicznych, a w komórkach alg powstają ATP i NADPH. W fazie ciemnej fotosyntezy w komórkach mikroglonów zachodzą przemiany biochemiczne efektem których jest wzrost alg. Ustalenie odpowiedniego cyklu świetlnego (fotoperiodu) jest więc ważnym czynnikiem warunkującym wzrost biomasy mikroglonów, a badania potwierdzają korzystny wpływ wydłużenia czasu oświetlania hodowli względem okresu ciemności (Rai i in. 2015).

W hodowli mikroglonów wykorzystywane jest oświetlenie naturalne (słoneczne) lub sztuczne, w tym tradycyjne lampy sodowe agro, fluorescencyjne lub też oświetlenie LED. Wykorzystanie światła słonecznego jest trudne jeśli konieczne jest utrzymywanie stabilnych warunków hodowli (stała temperatura, stała dawka promieniowania). Oświetlenie fluoroscencyjne jest często wykorzystywane do uprawy ze względu na możliwość dostosowania spektrum światła zgodnie z wymaganiami oświetleniowymi danego gatunku. Jest jedną z tańszych metod oświetlania, a jego stosowanie nie powoduje wytwarzania wysokiej temperatury podczas eksploatacji. Lampy sodowe do niedawna były jednym z podstawowych rodzajów oświetlenia wykorzystywanego w pomieszczeniach zamkniętych. Jest ono bardzo efektywnie wykorzystywane w procesie fotosyntezy, a tym samym powoduje zwiększenie plonów, jednak emituje znaczne ilości ciepła, ma wysoki koszt zakupu i eksploatacji, wysoką moc całego zestawu oraz dużą zawartość rtęci w żarówkach, stąd też problemy z jego utylizacją.



Rys. 1. Otwarty systemy hodowli mikroglonów – stawy glonowe (www.aban.com).

Wprowadzenie do produkcji biomasy glonów technologii LED dało szereg korzyści:

- niższe zapotrzebowanie na energię elektryczną, nawet do 80%, co oznacza niższe koszty utrzymania
- zwiększenie przyrostu biomasy w wyniku zastosowania diod emitujących światło o odpowiedniej długości fali i charakterystyce spektralnej dostosowanej do wymagań poszczególnych szczepów glonów
- lepsza kontrola nad procesami fotosyntezy i morfogenezy
- dłuższa żywotność i niższa temperatura pracy w porównaniu z lampami sodowymi (Atta i in. 2013).

Jednym z ważniejszych czynników wpływających na efektywność produkcji biomasy mikroglonów, poza temperaturą i oświetleniem, jest odczyn podłoża hodowlanego. Wpływa on nie tylko na skład komórek, ale również na długość życia alg. Odczyn warunkuje pochłanianie dwutlenku

węgla, absorpcję jonów i składników odżywczych oraz efektywność procesu fotosyntezy. Kwaśny odczyn (niskie pH) utrudnia pobieranie biogenów oraz zakłóca wzrost komórek, natomiast odczyn alkaliczny obniża zdolność pochłaniania dwutlenku węgla. Większość glonów jest zdolna do wzrostu w podłożach hodowlanych, których pH mieści się w zakresie od 5 do 7 (Rokicka i in. 2014), natomiast wartości optymalne zależą przede wszystkim od rodzaju szczepu (Juneja i in. 2013).



Rys. 2. Zamknięte systemy hodowli mikroglonów - fotobioreaktory (www.variconaqua.com).

2. Materiał i metody

Do oceny wpływu światła i pH na wzrost i rozwój mikroglonów wykorzystano hodowlę glonów słodkowodnych z gatunku *Chlorella vulgaris* (Fot. 1). Materiał do badań pochodził z Kolekcji Kultur Glonów Bałtyckich (CCBA - Culture Collection of Baltic Algae).



Fot. 1. Komórki glonów *Chlorella vulgaris* (autor: P. Ratomski).

W doświadczeniu zastosowano trzy czasy oświetlenia hodowli (fotoperiod 12/12, 18/6 i 24/0 światło/ciemność) oraz cztery poziomy pH (6, 7, 8 i 9). Hodowle oświetlano światłem LED z diodami białymi oraz czerwonymi (długość fali 600 - 700 nm; $9,45 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$) i niebieskie (długość fali 400 - 500 nm; $2,25 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$).

Badania prowadzono w fotobioreaktorach o pojemności 2,5 dm³, w których umieszczono 2 dm³ podłoża hodowlanego F2 oraz 200 cm³ inokulum z alg. Komórki glonów utrzymywano w stanie zawieszenia poprzez mieszanie gazem wykorzystując pompę Aqua Medic Mistral 2000 o mocy 25W i wydajności 0,9 m³·h⁻¹. Napowietrzanie umożliwiło jednocześnie wprowadzenie do środowiska reakcji niezbędnego w procesie ditenku węgla. Doświadczenie prowadzono w systemie pracy okresowej.

Efektywność przyrostu biomasy w hodowlach określono metodą grawimetryczną z wykorzystaniem wagosuszarki AXIS ATS60. Z poszczególnych fotobioreaktorów pobierano próbki o objętości 40 cm³, umieszczano je na aluminiowych szalkach i suszono w temp. 105°C. Wyniki przeliczono i podano w mg·l⁻¹. Analizy wagowe wykonano w dniu rozpoczęcia doświadczenia, a następnie po 5, 10 oraz 15 dniach hodowli.

Zawartość biomasy oceniano również metodą spektrofotometryczną na podstawie zawartego w komórkach mikroglonów chlorofilu *a*. Oznaczenia prowadzono zgodnie z normą PN-86 C-05560/02. Biomasa glonów zagęszczono metodą filtracji na sączku z włókna szklanego, a następnie barwnik ekstrahowano za pomocą 90-procentowego roztworu acetonu. Pomiaru absorbancji dokonano przy długości fali $\lambda=665\text{nm}$. Oznaczenia prowadzono przy wykorzystaniu spektrofotometru SEMCO S91E. Wyniki podano w mg·m⁻³. Zawartość chlorofilu *a* oznaczono w 15 dniu doświadczenia.

Wyniki badań poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem programu StaSoft ver. 13.0. Zastosowano dwuczynnikową analizę wariancji. Istotność różnic pomiędzy średnimi oceniono za pomocą testu Duncana na poziomie $\alpha \leq 0.05$.

3. Wyniki i dyskusja

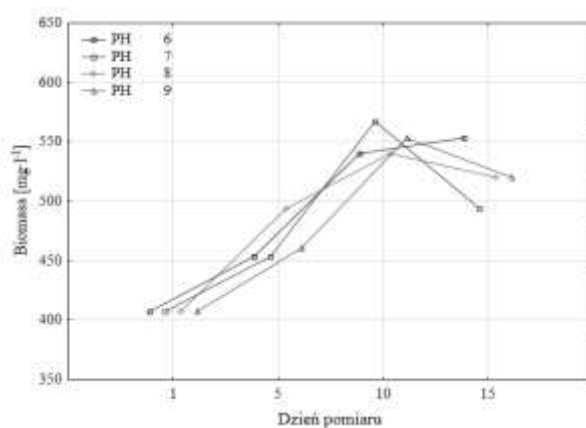
Na podstawie statystycznej analizy wyników badań stwierdzono, że zastosowane czynniki doświadczenia, zarówno fotoperiod, jak i odczyn podłoża hodowlanego, miały istotny wpływ na proces produkcji biomasy glonów *Chlorella vulgaris*.

Średnia ilość biomasy mikroglonów na początku doświadczenia we wszystkich obiektach wynosiła ok. 400 mg·l⁻¹. W hodowlach oświetlanych przez 12 godzin na dobę po 5 dniach zawartość biomasy mikroglonów zwiększyła się, niezależnie od wartości pH podłoża hodowlanego. Odnotowano wzrost o 12% przy pH 6 i 7 oraz 21% i 13%, odpowiednio przy pH 8 i 9 (Rys. 3). Po 10 dniach hodowli zawartość biomasy w poszczególnych fotobioreaktorach, w odniesieniu do poprzedniego terminu pomiarowego, wzrosła w zakresie od 47 (pH8) do 113 mg·l⁻¹ (pH 7). W ostatnim terminie ilość biomasy zwiększyła się (554 mg·l⁻¹) jedynie w fotobioreaktorze z podłożem o pH 6. Wartości oznaczone dla pH 7, 8 i 9 były niższe odpowiednio o 13, 4 i 6% w porównaniu do wyników z poprzedniego pomiaru.

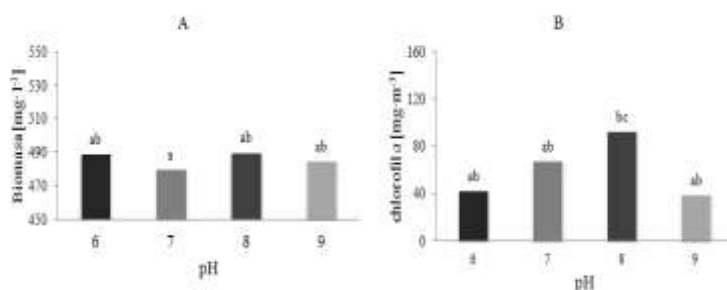
Średnia ilość biomasy z całego okresu doświadczenia mieściła się w przedziale od 480 (pH 7) do 490 mg·l⁻¹ (pH 8) (Rys. 4A). Podobną zależność zaobserwowali również Rachlin i Grosso (1991), którzy w swoich badaniach dotyczących wpływu pH na wzrost *Chlorelli vulgaris* najwyższy przyrost biomasy uzyskali przy pH równym 8.

Największą zawartość chlorofilu *a* (93 mg·m⁻³) oznaczono w obiekcie o pH 8, natomiast w pozostałych obiektach (pH 6, 7 i 9) były to wartości niższe odpowiednio o 55%, 27% i 58% (Rys. 4B).

Wydłużenie czasu oświetlania hodowli (fotoperiod 18/6 światło /ciemność) wpływało korzystnie na proces produkcji biomasy (Rys. 5). We wszystkich fotobioreaktorach jej zawartość po 5 dniach, w porównaniu do wartości początkowych, wzrosła w zakresie od 25% (pH 7 i 8) do 29% (pH 9). W kolejnym terminie pomiarowym obserwowano dalszy wzrost ilości biomasy od 33 (pH 8) do 67 mg·l⁻¹ (pH6). Po 15 dniach hodowli w trzech obiektach odnotowano spadek ilości biomasy. Przy pH 6 oznaczono w podłożu hodowlanym niemal 570 mg·l⁻¹, natomiast w fotobioreaktorze z podłożem o pH 7 i 8 ok. 530 i 500 mg·l⁻¹. Jedynie w podłożu hodowlanym o pH 9 ilość biomasy wzrosła do niemal 600 mg·l⁻¹ i była to najwyższa wartość oznaczona w ciągu całego doświadczenia. Podobne wyniki uzyskali Amini i in. (2012), którzy badając wpływ cyklu świetlnego w hodowli mikroglonów na ilość wytworzonej biomasy najwyższy przyrost obserwowali przy zastosowaniu fotoperiodu 16/8 (światło/ciemność).



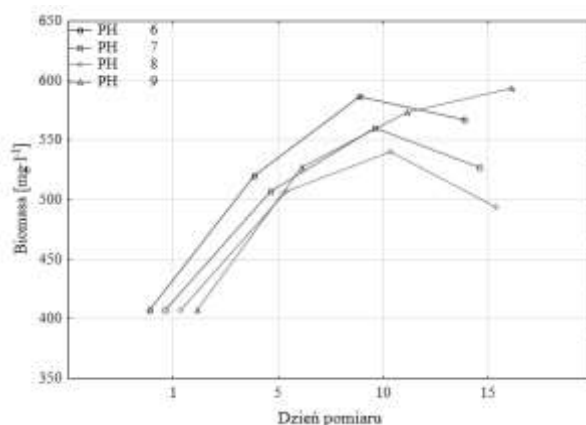
Rys. 3. Dynamika wzrostu biomasy mikroglonów w fotobioreaktorach oświetlanych w układzie 12/12 h (światło/ciemność).



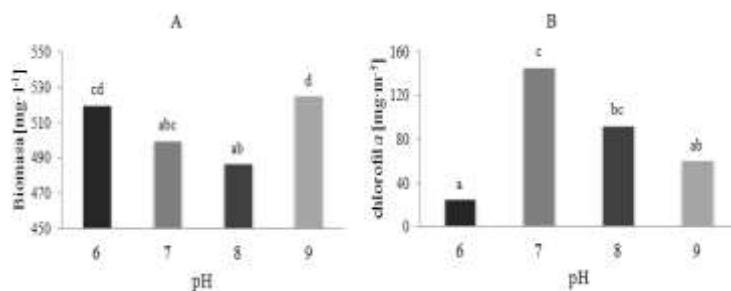
Rys. 4. Średnia ilość biomasy (A) w fotobioreaktorach oraz zawartość chlorofilu a (B) w komórkach mikroglonów przy oświetleniu hodowli w układzie 12/12 h (światło/ciemność)

Średnia ilość biomasy oznaczonej w przeciągu całego okresu doświadczenia mieściła się w przedziale od 487 mg·l⁻¹ dla obiektu o pH 8 do 525 mg·l⁻¹ przy pH 9 (Rys. 6A). W badaniach przeprowadzonych przez Rachlina i Grosso (1991) autorzy najwyższy przyrost biomasy odnotowali przy zastosowaniu podłoża hodowlanego o pH w zakresie od 7,5 do 8.

Największą zawartość chlorofilu a oznaczono przy pH7 (146 mg·m⁻³), najniższe wartości (53 mg·m⁻³) przy pH 8 (Rys. 6B).



Rys. 5. Dynamika wzrostu biomasy mikroglonów w fotobioreaktorach oświetlanych w układzie 18/16 h (światło/ciemność).

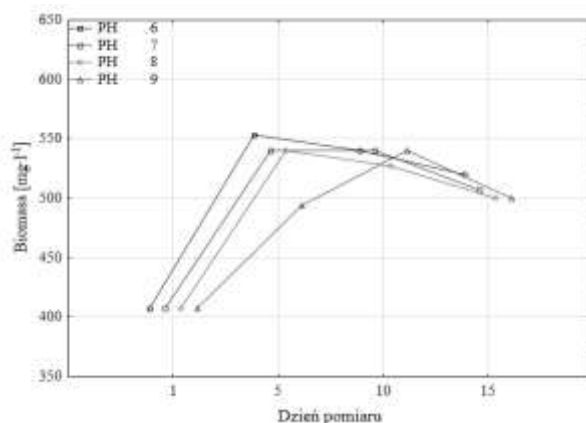


Ryc. 6. Średnia ilość biomasy (A) w fotobioreaktorach oraz zawartość chlorofilu a (B) w komórkach mikroglonów przy oświetleniu hodowli w układzie 18/6 h (światło/ciemność).

Zdecydowanie najmniej korzystne zmiany w zawartości biomasy mikroglonów odnotowano przy 24-godzinnym oświetleniu (Rys. 7). W porównaniu do początkowej ilości największy przyrost odnotowano w fotobioreaktorze z podłożem o pH 6 (ponad 550 mg·l⁻¹). Analiza zawartości biomasy mikroglonów po pięciu dniach doświadczenia wykazały wzrost we wszystkich obiektach w zakresie od 87 (pH9) do 147 mg·l⁻¹ (pH6), a w kolejnym redukcję, z wyjątkiem fotobioreaktora z podłożem hodowlanym o pH 9 (540 mg·l⁻¹). W ostatnim terminie pomiarowym zawartość biomasy mieściła się w zakresie od 500 mg·l⁻¹ przy pH 8 i 9 do 520 mg·l⁻¹ przy pH 6.

Średnio, biorąc pod uwagę cały okres prowadzenia hodowli, największą ilość biomasy (505 mg·l⁻¹) odnotowano w podłożu hodowlanym o pH 6.

Oznaczona zawartość chlorofilu a przy zastosowaniu fotoperiodu 24/0 (światło/ciemność) była najniższa spośród analizowanych wariantów oświetlania (Rys. 8B). Najmniejszą ilość barwnika stwierdzono w obiekcie o pH 8 (21 mg·m⁻³), a największą przy pH 9 (57 mg·m⁻³). Atta i in. (2013) analizując wpływ fotoperiodu na produkcję biomasy mikroglonów ustalili, że optymalne warunki hodowli występują przy fotoperiodzie 12/12 (światło/ciemność), natomiast najmniejszy przyrost w warunkach ciągłego oświetlania hodowli.



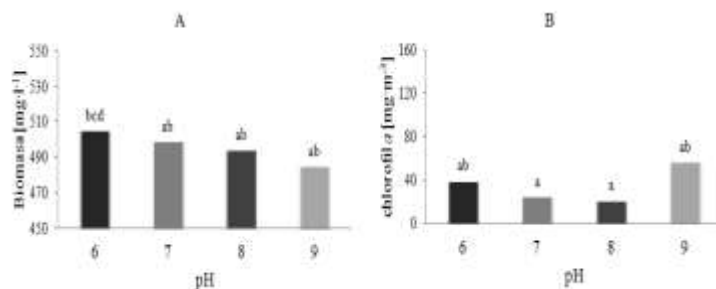
Rys. 7. Dynamika wzrostu biomasy mikroglonów w fotobioreaktorach oświetlanych w układzie 24/0 h (światło/ciemność).

4. Wnioski

Zastosowane w doświadczeniu czynniki (czas oświetlania hodowli, odczyn podłoża hodowlanego) miały istotny wpływ na produkcję biomasy mikroglonów *Chlorella vulgaris* w poszczególnych fotobioreaktorach.

Optymalne warunki hodowli, sprzyjające produkcji biomasy, na podstawie oznaczeń wagowych, uzyskano przy zastosowaniu fotoperiodu 18/6 h (światło/ciemność) i przy pH 9.

Największą zawartość chlorofilu *a* odnotowano przy oświetlaniu hodowli przez 18/6 h (światło/ciemność) oraz przy pH7.



Rys. 8. Średnia ilość biomasy (A) w fotobioreaktorach oraz zawartość chlorofilu *a* (B) w komórkach mikroglonów przy oświetleniu hodowli w układzie 24/0 h (światło/ciemność).

5. Literatura

- Alabi AO, Tampier M, Bileau E (2009) Microalgae Technologies and processes for biofuel /bioenergy production in British Columbia: Current Technology, Suitability and Barriers to Implementation. Final Report Submitted to The British Columbia Innovation Council: 11-14.
- Amini KZ, Seyfadabi J, Ramezanpur Z, (2011) Effect of light intensity and photoperiod on biomass and fatty acid composition of the microalga, *Chlorella vulgaris*. *Aquaculture International* 20: 41-49.
- Atta M, Idris A, Bukhari A et al. (2013) Intensity of blue LED light: A potential stimulus for biomass and lipid content in fresh water microalgae *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology* 148: 373-378.
- Chisti Y (2007) Biodiesel from microalgae. *Biotechnology Advances* 25: 294-306.
- Frąc M, Jezierska-Tys S, Tys J (2009) Algi - energia jutra (biomasa, biodiesel). *Acta Agrophysica* 13(3): 627-638.
- Grobbelar JU (2004) Algal nutrition. In: *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*, Richmond A (Editor): 97-115.
- Hase R, Oikawa H, Sasao C, Morita M, Watanabe Y (2000) Photosynthetic production of microalgal biomass in a raceway system under greenhouse conditions in Sendai City. *Journal of Bioscience and Bioengineering* 89: 157-163.
- Hu Q, Guterman H, Richmond A (1996) A flat inclined modular photobioreactor for outdoor mass cultivation of phototrophs. *Biotechnology and Bioengineering* 51: 51-60.
- Juneja A, Ceballos RM, Murthy GS(2013) Effects of environmental factors and nutrient availability on the biochemical composition of algae for biofuels production: a review. *Energies* 6: 4607-4638.
- Lorenz RT, Cysewski GR (2003) Commercial potential for *Haematococcus* microalga as a natural source of astaxanthin. *Trends in Biotechnology* 18: 160-167.
- Miao X, Wu Q (2006) Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. *Bioresource Technology* 97: 841-846.
- Molina GE, Acien F, Garcia CF et al. (1999) Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. *Journal of Biotechnology* 70: 231-247.
- Munoz R, Guieysse B (2006) Algal-bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: a review. *Water Research* 40: 2799-2815.
- Rachlin JW, Grosso A (1991) The effects of pH on the growth of *Chlorella vulgaris* and its interactions with cadmium toxicity. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 20(4):505-8.
- Raheem A, Wan AWAKG, Taufiq YYH et al. (2015) Thermochemical conversion of microalgal biomass for biofuel production. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49: 990-9.

- Rai MP, Gautam T, Sharma N (2015) Effect of salinity, pH, light intensity on growth and lipid production of microalgae for bioenergy application. *Journal of Biological Sciences* 15: 260-267.
- Ratledge C, Cohen Z (2008) Microbial and algal oils: Do they have a future for biodiesel or as commodity oils? *Lipid Technol.* 20: 155–160.
- Rokicka M, Zieliński M, Dębowski M i in. (2014) Optymalizacja hodowli alg w kierunku zwiększenia efektywności konwersji CO₂ w biomasę - przegląd metod sekwestracji. Wydawnictwo UWM w Olsztynie: 688-698.
- Sanchez MA, Ceron GMC, Contreas GA et al. (2003) Shear stress tolerance and biochemical characterizations of *Phaeodactylum tricomutum* in quasi steady - state continuous culture in outdoor photobioreactors. *Biochemical Engineering Journal* 16: 287-297.
- Spolaore P, Joannis-Cassan C, Duran E et al. (2006) Commercial applications of microalgae. *J. Biosci. Bioeng* 101: 87-96.

12. Metody zagęszczania i odwadniania biomasy mikroglonów - przegląd

Methods of thickening and dehydration of microalgae biomass – a review

Ratomski Patryk, Hawrot-Paw Małgorzata

Katedra Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii, Wydział Kształtowania Środowiska i Rolnictwa,
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Opiekun naukowy: Małgorzata Hawrot-Paw

Patryk Ratomski: Patryk.Ratomski@zut.edu.pl

Słowa kluczowe: mikroalgi, pozyskiwanie komórek, dehydratacja

Streszczenie

Wytwarzanie produktów z biomasy mikroglonów wymaga jej wcześniejszego odwodnienia. Ten etap wiąże się z dużymi nakładami finansowymi, które mogą pochłaniać do 25% całkowitych kosztów produkcji biomasy i jej przetworzenia.

Celem tego opracowania było dokonanie przeglądu podstawowych metod odwadniania na dużą skalę z możliwością wykorzystania ich w przemyśle. Omówione metody należą do technik fizycznych oraz chemicznych (flokulacja, sedimentacja, wirowanie, ultradźwięki, flotacja i filtracja). Oceny metod dokonano przy zastosowaniu ośmiu kryteriów: efektywność, koszt, toksyczność, wykorzystanie na skalę przemysłową, czas procesu, różnorodność gatunków, możliwość ponownego użycia podłoża hodowlanego oraz konserwacja instalacji. Każdemu kryterium przypisywano punkty w zakresie od 7 do 15 w zależności od stopnia ważności.

Techniki, które mogą zostać użyte na skalę przemysłową to wirowanie, filtracja z przepływem krzyżowym oraz flokulacja z wykorzystaniem związków organicznych. Metody te charakteryzują się wysoką skutecznością, niskimi kosztami, wykorzystaniem w odniesieniu do wielu gatunków, a także brakiem stosowania toksycznych związków.

1. Wstęp

Mikroglony to organizmy, których biomasa oraz zawarte w ich komórkach składniki mogą być wykorzystywane w wielu gałęziach przemysłu:

- kosmetycznym (składniki kremów)
- farmaceutycznym (suplementy diety, witaminy, kwas foliowy)
- rolniczym (jako nawozy i pasza dla zwierząt)
- energetycznym (jako prekursorzy do produkcji biodiesla, bioetanolu, biogazu i biowodoru) (Becker 2004).

Dodatkowym atutem mikroglonów jest ich zdolność do asymilowania dwutlenku węgla z atmosfery lub bezpośrednio z emitatorów przemysłowych. Ponadto mogą przyswajać związki fosforu oraz azotu pochodzące ze ścieków, z czym związana jest potencjalna możliwość wykorzystania ich do procesów bioremediacji środowiska wodnego.

W zależności od szczepu mikroglony mogą gromadzić w komórkach znaczne ilości białka (od 43 do 71% suchej masy) oraz łatwo przyswajalnych dla człowieka węglowodanów (10-30%), co może stanowić alternatywę w systemie żywieniowym człowieka.

W ostatnim czasie obserwuje się też znaczny wzrost zainteresowania produkcją biomasy mikroglonów z przeznaczeniem na cele energetyczne. W ich komórkach gromadzony jest olej, z którego w procesie transestryfikacji otrzymuje się biodiesel, a jego zawartość może stanowić 25-77% suchej masy (Schenk i in. 2008). Mikroglony uznawane są obecnie za najlepszy substrat do produkcji biopaliw ponieważ nie konkurują z roślinami jadalnymi o miejsce oraz mogą produkować nawet do 200 000 litrów oleju na hektar rocznie (Demirbas 2010).

2. Opis zagadnienia

Biomasa pochodząca z mikroglonów może w niedługim czasie stać się podstawowym, alternatywnym źródłem energii. Konieczne jest więc opracowanie opłacalnej ekonomicznie

technologii jej pozyskiwania, która nie będzie powodowała znacznego wzrostu ceny końcowego produktu, a tym samym nie zmniejszy opłacalności produkcji.

W związku z tym prowadzonych jest wiele badań mających na celu znalezienie optymalnej techniki odzyskiwania mikroglonów z medium hodowlanego, wykazującej wysoką efektywność odzyskiwania biomasy oraz znacznie ograniczającej koszty procesu.

W pracy zostały zaprezentowane podstawowe dostępne metody zagęszczania biomasy mikroglonów oraz dokonano ich oceny.

3. Przegląd literatury

Pozyskiwanie biomasy jest procesem skomplikowanym ze względu na małe rozmiary komórek mikroglonów. Przetworzenie biomasy wymaga wcześniejszego odwodnienia, a koszty tego etapu to nawet 1/4 budżetu przeznaczanego na wytworzenie biopaliwa z mikroglonów. Jest to między innymi koszt energii elektrycznej, odczynników chemicznych oraz eksploatacji całej instalacji służącej do separacji (Borodyanski i Konstantinov 2002). Do podstawowych metod odwadniania biomasy należy:

- flokulacja
- sedymentacja
- flotacja
- wirowanie
- filtracja
- ultradźwięki (Rawat i in. 2011; Zakrzewski 2011; Suali i Sarbatly 2012).

3.1 Flokulacja

Flokulacja jest to proces polegający na łączeniu się drobnego materiału zdyspergowanego w cieczy i tworzeniu agregatów z fazy stałej w wyniku działania związku polimerowego. Środki flokulujące to związki posiadające właściwości wspierania zjawiska łączenia się cząstek flokulujących. Początkowym etapem procesu jest wprowadzenie środka flokulującego do zawiesiny, który zakłóca stabilność cząstek powodując ich agregację. Im wyższa masa cząsteczkowa związku tym korzystniejszy wpływ na proces flokulacji. Flokulanty posiadające dużą masę cząsteczkową zdolne są do absorpcji kilku cząstek jednocześnie, tworząc przy tym trójwymiarową matrycę (Demirbas i in. 2011).

Do związków chemicznych wykorzystywanych w procesie flokulacji zalicza się związki polimerowe pochodzenia naturalnego oraz syntetycznego. Związki naturalne to między innymi skrobia i żelatyna, natomiast do związków syntetycznych należą poliakrylamidy, kwasy poliakrylowe oraz tlenki polietylenu. Związki wykorzystywane jako flokulanty muszą charakteryzować się bardzo dobrą rozpuszczalnością w wodzie oraz dużą masą cząsteczkową.

Ze względu na posiadany ładunek wyróżnia się trzy rodzaje flokulantów: anionowe, kationowe oraz obojętne. Komórki alg posiadają ładunek ujemny, który zapobiega ich naturalnej agregacji w zawiesinie, natomiast flokulanty kationowe zmieniają ten ładunek oraz powodują łączenie się wielu komórek mikroglonów. W procesie flokulacji można wykorzystać szereg związków chemicznych, m.in. wielowartościowe sole metali (chlorek żelaza, siarczan glinu oraz siarczan żelaza III) (Grima i in. 2003).

W procesie flokulacji stosuje się przede wszystkim flokulanty organiczne, głównie ze względu na stosowanie ich w niewielkich dawkach. Przykładowe naturalne polimery to między innymi Greenfloc 120, skrobia czy chitosan, dla którego efektywność flokulacji osiąga nawet 98% (przy zastosowaniu dawek w przedziale od 0,2 do 0,4 g·l⁻¹). Efektywność flokulantów zmniejsza się w obecności słonej wody, co skutkuje koniecznością zwiększenia ich dawki nawet do 2 g·l⁻¹. Czynnikiem wpływającym na przebieg procesu flokulacji jest również wartość pH. Optymalny odczyn mieści się w przedziale od 5 do 8 (Al hattab i in. 2015).

Flokulanty niejonowe oraz kationowe zdolne są do odwodnienia biomasy z efektywnością do 89,9%, ale tylko w odniesieniu do gatunków słodkowodnych. W wodzie słonej wymagane jest łączenie flokulantów polimerowych z nieorganicznymi związkami takimi jak wapno czy alun.

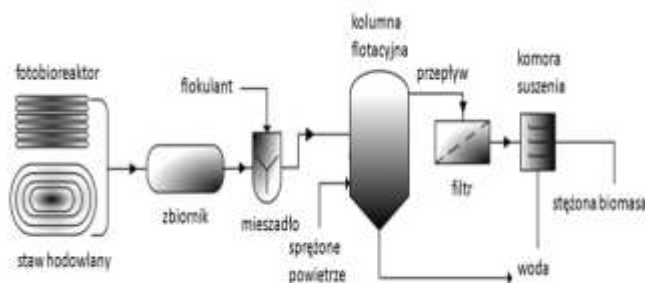
Stosowanie flokulantów nieorganicznych powoduje ograniczenia związane z wykorzystaniem pozyskanej biomasy. Użyte podczas flokulacji związki chemiczne, w szczególności sole metali, uniemożliwiają wykorzystanie biomasy na cele rolnicze.

Skuteczność sedymentacji przy zastosowaniu flokulantów nieorganicznych sięga nawet 90% (chlorek żelaza), jednak zastosowanie tych związków ma szereg ograniczeń technicznych, między innymi problemy z koagulacją drobnych cząstek oraz niską opłacalność. Z powodzeniem można je wykorzystywać jako element zestawu flokulantów poprawiających zdolność flokulacji (Grima i in. 2003).

Stosowania związków chemicznych nie wymaga flokulacja elektrolityczna. W metodzie tej wykorzystywane jest jedynie niskie natężenie prądu na poziomie $0,3 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ (Heasman i in. 2000). Ten rodzaj flokulacji stosuje się głównie do pozbywania się glonów w zbiornikach do magazynowania wody pitnej.

Przyszłościową metodą flokulacji, która nie została jeszcze dokładnie opracowana, ale wykazuje znaczny potencjał, jest flokulacja mikrobiologiczna. Metoda ta polega na wprowadzeniu do podłoża hodowlanego niewielkiej ilości kultury drobnoustrojów (na poziomie $1 \text{ g} \cdot \text{l}^{-1}$). Mikroorganizmy wykorzystywane w procesie flokulacji muszą mieć zdolność do uwalniania pozakomórkowej substancji zawierających polimery zaraz po wyczerpaniu się w hodowli dostępnych składników pokarmowych. Wykorzystanie drobnoustrojów jest znacznie tańsze w porównaniu do związków polimerowych. Ponadto technika ta nie powoduje uszkodzeń komórek mikroglonów, a także umożliwia wykorzystanie podłoża powtórnie, bez dodatkowej obróbki (Lee i in. 2010).

Po procesie flokulacji komórek mikroglonów wymagane jest dalsze odwodnienie biomasy z wykorzystaniem filtracji, wirowania, flotacji lub sedymentacji. Niektóre z tych procesów można łączyć z flokulacją, np. proces flotacji (Rys. 1). W takiej technologii biomasa mikroglonów poddawana jest najpierw w reaktorze mieszalnikowym obróbce flokulantem, a następnie zostaje wpompowana do kolumny flotacyjnej, gdzie kolejnym etapem jest jej unoszenie. Przez system przelewowy komórki mikroglonów przenoszone są do komory filtracyjnej. Zebrana biomasa pompowana jest do komory suszącej, a następnie do jednostki ekstrakcyjnej, w której pozyskiwany jest olej.



Rys. 1. Proces zbioru mikroglonów oparty na technice flokulacji i filtracji (opracowanie własne na podstawie Suali i Sarbatly (2012)).

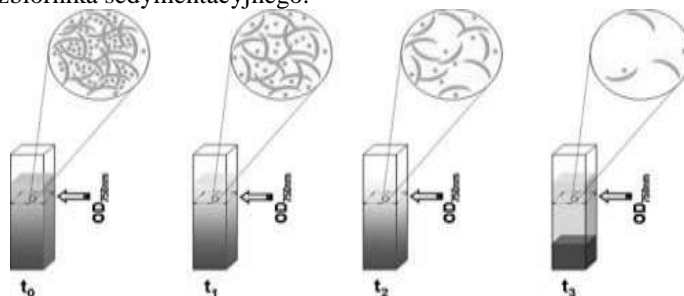
3.2 Sedymentacja

W procesie sedymentacji komórki mikroglonów są oddzielane od podłoża hodowlanego dzięki sile grawitacji (Rys. 2) (Salim i in. 2011). Szybkość procesu zależy przede wszystkim od gęstości hodowli oraz wielkości komórek glonów. Mniejsza gęstość oraz wielkość komórek wydłuża czas sedymentacji (Milledge i Heaven 2013).

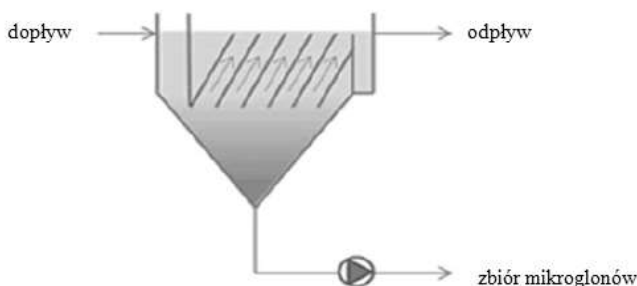
Oddzielenie fazy stałej od cieczy może odbywać się w dwóch systemach: separatorze lamelowym (Rys. 3) oraz w osadniku (Rys. 4). Separator lamelowy charakteryzuje się większą powierzchnią w porównaniu do osadnika. Biomasa mikroglonów zostaje wprowadzona do zbiornika lamelowego przez wlot umieszczony na górze zbiornika, a następnie pod wpływem siły grawitacji

osadza się na jego dnie. Nadmiar cieczy zostaje odprowadzony drugim kanałem znajdującym się w górnej części separatora.

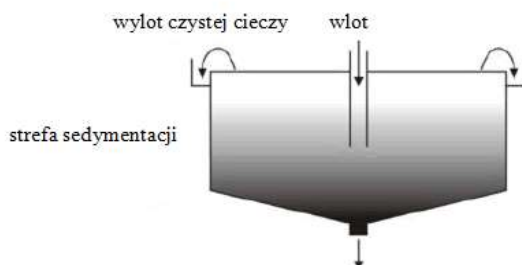
Osadniki sedymentacyjne charakteryzują się cylindrycznym dnem, w kształcie lejka, co służy skoncentrowaniu biomasy blisko wylotu znajdującego się w centralnie w jego dolnej części. Zbiornik dodatkowo wyposażony jest w pompę, której zadaniem jest przeniesienie biomasy z systemu hodowlanego do zbiornika sedymentacyjnego.



Rys. 2. Sedymentacja komórek mikroglonów w czasie (Salim i in. 2011).



Rys. 3. Zbiornik separatora lamelowego (opracowanie własne na podstawie Al hattab i in. (2015)).



Rys. 4. Osadnik sedymentacyjny (opracowanie własne na podstawie Al hattab i in. (2015)).

3.3 Flotacja

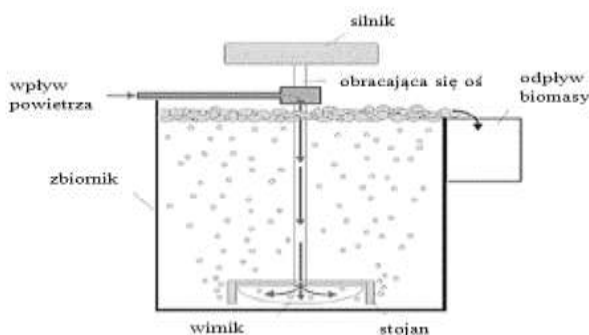
Odwodnienie biomasy mikroglonów metodą flotacji należy do procesów fizykochemicznych, w którym stosuje się napowietrzanie. Pęcherzyki powietrza przechodzą przez zawieszinę powodując wypływanie komórek mikroglonów na powierzchnię (Rys. 5) (Singh i in. 2011). Skuteczność odwadniania biomasy zależy od stopnia rozdrobnienia fazy gazowej oraz trwałości i gęstości pęcherzyków. Efektywność przebiegu flotacji uwarunkowana jest przede wszystkim wielkością komórek. Komórki mniejsze są znacznie łatwiej wynoszone na powierzchnię. Flotację stosuje się do odwadniania komórek o rozmiarach do 500 μm (Matis 1993).

Podziału technik flotacyjnych dokonuje się na podstawie sposobów wytwarzania pęcherzyków powietrza. Wyróżnia się m.in. flotację rozproszonego powietrza, flotację rozpuszczonego powietrza, generowanie mikropęcherzyków oraz flotację elektrolityczną.

Flotacja z rozproszonym powietrzem wymaga użycia mieszadła mechanicznego o dużej prędkości oraz systemu wtrysku powietrza. W technologii tej powstają pęcherzyki o średnicy w zakresie od 700 do 1500 μm .

Technika flotacji wykorzystuje dyspersję fazy gazowej w postaci pęcherzyków powietrznych. Następnie pęcherzyki po przyłączeniu się do komórek mikroglonów tworzą zespół o gęstości mniejszej od gęstości cieczy, powodując ruch komórek na powierzchnię, gdzie następuje gromadzenie się biomasy. Komórki mikroglonów unoszone są na powierzchnię ze znacznie większą prędkością niż wynosi ich prędkość opadania, co umożliwia zbiór biomasy.

Metoda generowania mikropęcherzyków polega na przekształceniu napływającego powietrza w strumień oscylacyjny o regularnej częstotliwości. Powstające w ten sposób drobne pęcherzyki, które zostają uniesione na powierzchnię razem z komórkami, a następnie komórki są zbierane (Xu i in. 2010).

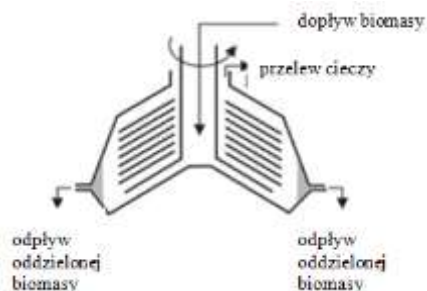


Rys. 5. Flotacja komórek mikroglonów (opracowanie własne na podstawie Al hattab i in. (2015)).

3.4 Wirowanie

Wirowanie jest jednym z bardziej efektywnych sposobów pozyskiwania biomasy mikroglonów. Technika ta nie wymaga stosowania żadnych związków chemicznych, jednak należy do metod zużywających znaczną ilość energii elektrycznej. Wysokie koszty związane z procesem wirowania związane są również z zakupem odpowiedniego sprzętu oraz jego eksploatacją, stąd też możliwość wykorzystania tej metody jest znacznie ograniczona.

Efektywność odzysku biomasy za pomocą wirowania zależy od siły odśrodkowej (Grima i in. 2003). W wyniku jej działania następuje tworzenie pierścieniowej warstwy, w której komórki mikroglonów zajmują położenie na i w pobliżu wewnętrznej ściany bębna, natomiast ciecz tworzy warstwę bliżej osi obrotu. W skali przemysłowej najczęściej wykorzystywane są wirówki talerzowe (Rys. 6). Działanie wirówki talerzowej opiera się na metalowych krążkach rozmieszczonych bardzo blisko siebie, znajdujących się w płytkiej cylindrycznej misie. Technika wirowania stosuje się dla komórek o wielkości w zakresie od 3 do 30 μm i zawiesin o stężeniu 2 – 25% (Milledge i Heaven 2013).

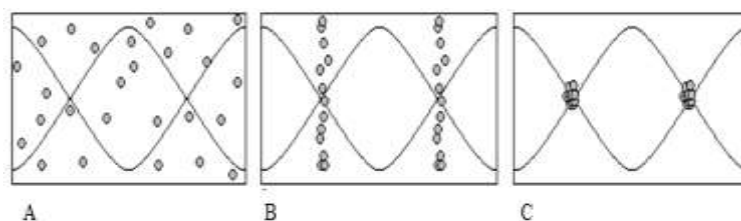


Rys. 6. Schemat odwadniania biomasy mikroglonów z wykorzystaniem procesu wirowania (opracowanie własne na podstawie Al hattab i in. (2015)).

3.5 Ultradźwięki

W metodzie z zastosowaniem ultradźwięków komórki mikroglonów dostarczane są do komory rezonatora, która składa się z przetwornika oraz źródła promieniowania (Rys. 7A.). Fale

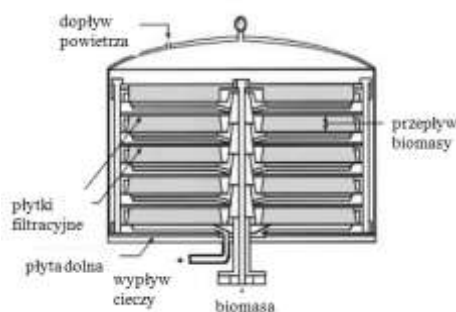
tworzą pola o maksymalnej energii potencjalnej (wybrzuszenia) oraz pola o minimalnej energii potencjalnej (wkłęsnięcia). Siła promieniowania działająca na komórki mikroglonów przenosi je na płaszczyznę o minimalnym polu energii potencjalnej (Rys. 7B). Rozproszone pole ultradźwiękowe powoduje przyciąganie się komórek mikroglonów, a następnie rozmieszczenie w polu o minimalnej energii (Rys. 7C). Po tym etapie następuje wyłączenie fal dźwiękowych i komórki mikroglonów, w postaci większych aglomeratów, poprzez działanie sił grawitacyjnych osadzają się na dnie zbiornika. Wykorzystanie ultradźwięków w procesie zbioru mikroglonów nie powoduje uszkodzeń komórek, nie generuje zanieczyszczenia wód hodowlanych oraz ma możliwość ciągłej pracy, co czyni tę metodę bardziej korzystną od podstawowych technologii odwadniania biomasy alg.



Rys. 7. Ultradźwięki w pozyskiwaniu biomasy mikroglonów: A) brak pola ultradźwiękowego; B) włączenie pola ultradźwiękowego; C) łączenie się komórek pod wpływem ultradźwięków (opracowanie własne na podstawie Al hattab i in. (2015)).

3.6 Filtracja

Filtracja polega na bezpośrednim pozyskiwaniu biomasy poprzez zastosowanie membran i zatrzymywaniu komórek mikroglonów na ich powierzchni (Rys. 8). Obecnie jest to jedna z najtańszych metod pozyskiwania biomasy mikroalg. W celu utrzymania wydajności filtra konieczne jest płukanie membrany co znacznie wydłuża czas całego procesu. Filtracja wymaga różnicy ciśnień na filtrze, którą można uzyskać poprzez zastosowanie próżni, ciśnienia lub grawitacji. Podział filtrów dokonuje się na podstawie rozmiarów porów. Wyróżnia się: makrofiltrację (powyżej 10 μ m), mikrofiltrację (0,1 – 10 μ m), ultrafiltrację (0,02 – 0,20 μ m) oraz odwróconą osmozę (poniżej 0,001 μ m) (Brennan i Owende 2010). Ciśnienie niezbędne do przepływu cieczy przez filtr zmniejsza się wraz ze wzrostem wielkości porów filtra. Techniki filtracyjne mogą koncentrować komórki mikroglonów z zawiesiny o gęstości od 5 do 18%, natomiast zdolność pozyskania komórek mieści się w przedziale od 20 do nawet 90% (Green 2008).



Rys. 8. Filtracja komórek mikroglonów (opracowanie własne na podstawie Al hattab i in. (2015)).

4. Podsumowanie

Metody odwodnienia biomasy mikroglonów z wykorzystaniem wirówki, filtracji z przepływem krzyżowym oraz flokulacji organicznej charakteryzuje wysoka skuteczność odzysku komórek ze środowiska wodnego (Tab. 1). Ponadto metody te nie wymagają stosowania toksycznych substancji, co umożliwia ponowne wykorzystanie podłoża hodowlanego, a czas całego procesu jest

znacznie krótszy w porównaniu do pozostałych technik. Metody te charakteryzuje szeroki zakres zastosowania w odniesieniu do wielu gatunków mikroglonów.

Możliwość wykorzystania na skalę przemysłową pozostałych technologii zagęszczania i odwadniania biomasy jest ograniczona. Podstawowym problemem jest ich mała przydatność w odniesieniu do dużych objętości. Bariera jest również niewielka różnorodność gatunków, w produkcji których mogłyby te metody znaleźć zastosowanie oraz wysokie koszty eksploatacyjne. Niektóre z prezentowanych technik, np. flokulacja, wprowadza do biomasy związki chemiczne, które mogą powodować zmiany w strukturze komórek mikroglonów, a ponadto wymaga długiego czasu na ich sedymentację.

Tab.1. Analiza porównawcza metod odwadniania biomasy mikroglonów (opracowanie własne na podstawie (Al hattab i in. 2015).

Kryterium (punkty)	Metody														
	Fizyczne								Chemiczne		AF	BF	Ultradźwięki		
	S	FP	FC	FPK	OST	WD	FRr	FRz	FN	FO			KE	FkE	FtE
Efektywność odwadniania (15)	5	13	13	15	13	15	12	10	10	11	11	11	13	13	13
Koszt (15)	15	9	9	12	8	6	10	9	11	11	12	10	11	11	11
Toksyczność i wpływ na środowisko (15)	15	15	15	15	15	15	12	8	5	15	8	15	12	12	12
Wykorzystanie na dużą skalę (15)	5	10	10	10	12	12	13	13	15	15	8	15	7	8	8
Czas (15)	2	12	12	12	15	15	10	10	10	10	8	10	15	15	10
Różnorodność gatunkowa (10)	4	6	5	8	10	5	5	8	5	6	4	8	3	5	4
Ponowne wykorzystanie podłoża (8)	8	8	8	8	8	8	8	5	2	5	2	3	5	4	4
Konserwacja (7)	7	2	2	4	6	6	7	7	7	7	7	4	3	3	3
Suma (100)	61	75	74	84	87	82	77	70	65	80	60	76	69	71	65

S: sedymentacja

FP: filtracja próżniowa

FC: filtracja ciśnieniowa

FPK: filtracja z przepływem krzyżowym

OST: odwirowanie w stosie talerzowym

WD: odwirowanie dekantacyjne

FRr: flotacja rozproszonym powietrzem

FRz: flotacja rozpuszczonym powietrzem

FN: flokulacja nieorganiczna

FO: flokulacja organiczna

AF: autoflokulacja

BF: bioflokulacja

KE: koagulacja elektrolityczna

FkE: flokulacja elektrolityczna

FtE: flotacja elektrolityczna

5. Literatura

- Al hattab M, Ghaly A, Hammouda A (2015) Microalgae Harvesting Methods for Industrial Production of Biodiesel: Critical Review and Comparative Analysis. *Journal of Fundamentals of Renewable Energy and Applications* 5: 41-54.
- Becker W (2004) Microalgae in Human and Animal Nutrition, *Handbook of Microalgal Culture. Biotechnology and Applied Phycology*: 312-351.
- Borodyanski G, Konstantinov I (2002) Microalgae separator apparatus and method. United States patent US 2002/0079270A1.
- Brennan L, Owende P (2010) Biofuels from microalgae a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. *Renewable Sustainable Energy Reviews* 14: 557-577.
- Demirbas A (2010) Use of algae as biofuel sources. *Energy Conversion and Management* 51:

2738-2749.

Demirbas MF, Balat M, Balat H (2011) Biowastes-to-biofuels. *Energy Conversion and Management* 52: 1815-1828.

Green FB (2008) Harvesting microalgae: challenges and achievements. *Microalgae Biomass Summit*, Algal Biomass Organization, Seattle, Washington, USA.

Grima ME, Belarbi EH, Acien-Fernandez FG, Robles-Medina A, Yusuf C (2003) Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnol Advances* 20: 491-515.

Heasman M, Diemar J, Oconnor W, Sushames T, Foulkes L (2000) Development of extended shelf-life microalgae concentrate diets harvested by centrifugation for bivalve mollusks-a summary. *Aquaculture Research* 31(8-9): 637-59.

Lee AK, Lewis DM, Ashman PJ (2010) Energy requirements and economic analysis of a full-scale microbial flocculation system for microalgal harvesting. *Chemical Engineering Research and Design* 88(8): 988-96.

Matis KA, Gallios GP, Kydros KA (1993) Separation of fines by flotation techniques. *Separations Technology* 3: 76-90.

Milledge JJ, Heaven S (2013) A review of the harvesting of microalgae for biofuel production. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology* 12: 165-178.

Rawat I, Kumar RR, Mutanda T, Bux F (2011) Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy* 88: 3411-3424.

Salim S, Bosma R, Vermuë MH, Wijffels RH (2011) Harvesting of microalgae by bio-flocculation. *Journal of Applied Phycology* 23: 849-855.

Schenk P, Thomas-Hall S, Stephens E, Marx U, Mussgnug J (2008) Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenergy Research* 1: 20-43.

Singh A, Nigam PS, Murphy JD (2011) Mechanism and challenges in commercialisation of algal biofuels. *Bioresource Technology* 102: 26-34.

Suali E, Sarbatly R (2012) Conversion of microalgae to biofuel. *Renewable Sustainable Energy Reviews* 16: 4316-4342.

Xu L, Wang F, Li HZ, Hu ZM, Guo C (2010) Development of an efficient electroflocculation technology integrated with dispersed-air flotation for harvesting microalgae. *Journal of Chemical Technology Biotechnology* 85: 1504-1507.

Zakrzewski T (2011) Biomasa mikroalg – obiecujące paliwo przyszłości, *Czysta energia* 2: 27-28.

13. Hydrauliczne układy smarowania w dzielarkach do ciasta

Hydraulic lubrication systems in dough dividers

Towarnicki Krzysztof

Katedra Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

Opiekun naukowy: Michał Stosiak

Towarnicki Krzysztof: Krzysztof.towarnicki@pwr.edu.pl

Słowa Kluczowe: piekarnia, dzielenie ciasta, smarowanie

Streszczenie

Wyroby piekarskie i mączne zajmują 6 miejsce na liście wyrobów przemysłu spożywczego. Na przełomie ostatnich lat nastąpiły znaczne zmiany w technologii wyrobu ciasta, wprowadzono dodatkowe polepszacze i spulchniacze. Korekty w składzie ciasta zostały spowodowane zmniejszaniem kosztów produkcji, tak aby przy mniejszej wadze, wyrób piekarski posiadał tę samą objętość. Na tej podstawie nastąpiło znaczne umocnienie ciasta, wśród piekarzy przyjęło się powiedzenie, że mieszają „beton”. Poprzednio projektowane urządzenia stosowane w piekarniach przeznaczone były do luźnego ciasta. Z powodu zmian technologii wytwarzania ciasta nastąpiły zmiany konstrukcyjne maszyn, szczególnie jeśli chodzi o ich napędy oraz system smarowania. Układy mechaniczne zastąpiono układami hydraulicznymi. Wynika to z zalet napędu hydraulicznego: przenoszenie dużej mocy, odporność na pyły i zanieczyszczenia oraz łatwość automatyzacji. Ze względu na prowadzenie produkcji ciągłej, należało zastąpić dotychczas stosowane ręczne smarowanie elementów współpracujących. Wprowadzono dodatkowe hydrauliczne systemy smarowania. Poniższy artykuł opisuje urządzenia do dzielenia i kształtowania kęsów ciasta z zastosowanymi układami smarującymi. Przedstawiono przegląd maszyn od tych z lat 80 XX wieku, do obecnych z napędem hydraulicznym. Przewiduje się dalszy rozwój tych urządzeń ze względu na automatyzację piekarskiego procesu piekarniczego, maszyna zastępuje człowieka podczas produkcji wszelkiego rodzaju wyrobów piekarskich.

1. Wstęp

Początki hydrauliki rozpoczęły się już w starożytności, gdzie człowiek wykorzystywał ruch cieczy na własne potrzeby. W tamtym czasie nie korzystano jeszcze ze sformułowanych praw, z których korzystają dzisiejsi projektanci układów hydraulicznych. 200 lat przed naszą erą wprowadzono pompę ssąco-tłoczącą, a w 1600 roku J. Kepler opracował pompę zębatą, która za jego życia nie znalazła praktycznego zastosowania w napędach. Sukcesywnie wprowadzano w niej kolejne udoskonalenia. Dzisiaj należy do najczęściej używanych pomp wyporowych w hydraulicznych układach napędowych. W układach smarowania wykorzystuje się głównie pompy mimośrodowe. Obecny rozwój techniki hydraulicznej związany jest z rozpowszechnieniem się systemów elektroniki i automatyki w budowie maszyn. Główną zaletą hydraulicznych układów napędowych oraz smarujących jest szeroka możliwość sterowania zarówno prędkością jak i mocą odbiorników. Wprowadzenie nowoczesnych, wielopoziomowo rozwiniętych układów elektronicznych w układach hydraulicznych przyczyniło się do płynnej regulacji oraz znacznego obniżenia emitowanego przez nie hałasu. Obecnie trwają dodatkowe prace związane z optymalizacją budowy elementów układów hydraulicznych. Odnosi się to głównie do dwóch kierunków: minimalizacji ich masy, co wiąże się ze zmniejszeniem ich gabarytów oraz redukcji emitowanego przez nie hałasu. W ciągu ostatnich kilku lat zaobserwowano rozwój mikrohydrauliki, która szeroko opisana jest w lit (Kollek i in. 2014). Ich wprowadzenie znacznie przyczyniło się do stosowania centralnych układów smarowania, ze względu na transportowanie małych objętości cieczy. W przypadku hydraulicznych układów napędowych, ich niewątpliwą zaletą jest przenoszenie dużej mocy, które pozwoliło na zastosowanie tego napędu do maszyn przemysłu spożywczego. W zachodniej Europie już na początku lat 80 XX wieku

zastosowano tego typu napęd w urządzeniach do mieszania i dzielenia ciasta. W Polsce dopiero na początku XXI wieku zaczęto wprowadzać hydrauliczne układy napędowe w urządzeniach piekarniczych. Wynika to zarówno z zalety jaką jest łatwość sterowania jak również z wysokiej odporności na pyły i zanieczyszczenia w stosunku do klasycznych mechanizmów śrubowych, mimośrodowych, krzywkowych czy zapadkowych. Obecny rozwój techniki wprowadził systemy elektroniki i automatyki w budowie elementów oraz układów hydraulicznych. Wprowadzenie nowoczesnych rozbudowanych układów elektronicznych w układach hydraulicznych wpłynęło na płynną regulację oraz obniżenie emitowanego przez nie hałasu. W obecnym czasie zaobserwować można wzrost zainteresowania wprowadzania hydraulicznych układów napędowych do urządzeń przemysłu spożywczego. Trudno jest sobie wyobrazić układ smarowania bez korzystania z układu hydraulicznego.

2. Opis zagadnienia

Dzielarki do ciasta są urządzeniami przeznaczonymi do pracy w piekarni. Służą do równomiernego podziału porcji urobionego ciasta, niektóre posiadają dodatkowo możliwość mechanicznego zaokrąglenia określonej liczby, w zależności od urządzenia, identycznych pod względem objętości porcji do wypieku, odnosi się to głównie bułek. Dla ukształtowania chleba budowane są linie technologiczne, a na ich początku zawsze znajduje się dzielarka.

Dzielarki do bułek składają się zazwyczaj z dwóch głównych podzespołów:

- zespół dzielarki – w przemyśle spotkać można dwa rozwiązania w zależności, czy jest to dzielarka jednostanowiskowa, czy zaadoptowana w linii technologicznej. Dla stacjonarnej stosuje się głowicę nożową z wstawionym wewnątrz wysuwającym w dół nożem wieńcowym. Opuszczanie w dół głowicy i noża uzyskuje się za pomocą odpowiednio dobranego mechanizmu w zależności od producenta urządzenia. Obniżenie głowicy doprowadza do równomiernego rozprasowania ciasta, a następnie przez wysunięcie noża otrzymuje się podział urobionego ciasta na równe kęsy pod względem objętości, która znajduje się na palecie umieszczonej na płycie górnej zaokrągłarki. W dzielarkach stanowiących część linii technologicznej zazwyczaj stosowane są obracające się bębny z odpowiednio ukształtowanymi gniazdami, które umożliwiają pobranie z komory głównej określonej ilości ciasta. W wyniku obrotu bębna porcje ciasta są przenoszone do zespołu zaokrąglenia, a następnie w wyniku kolejnego obrotu bębna za pośrednictwem taśmociągu, bułki przenoszone są na kolejne stacje linii produkcyjnej.

- zespół zaokrągłarki – praktycznie identyczny niezależnie od rodzaju dzielarki jest to część urządzenia, w którym płyta górna wykonuje ruch kołowy po naciśnięciu dźwigni przez operatora, lub w kodlu automatycznym po otrzymaniu sygnału o podzieleniu włożonego ciasta. Ruch płyty górnej powoduje zaokrąglenie uprzednio podzielonych porcji. W większości urządzeń napęd płyty górnej odbywa się za pomocą silnika elektrycznego poprzez przekładnię pasową, stolik obrotowy oraz suwak i łącznik.

Dzielarki do chleba. Są to urządzenia o napędzie elektrycznym, przeznaczonym do objętościowego dzielenia na kęsy ciast żytnich, pszennych i mieszanych przemyśle piekarskim. W zależności od rodzaju dzielarki, konstrukcje do dzielenia opierają się na tłokowych lub komorowych.

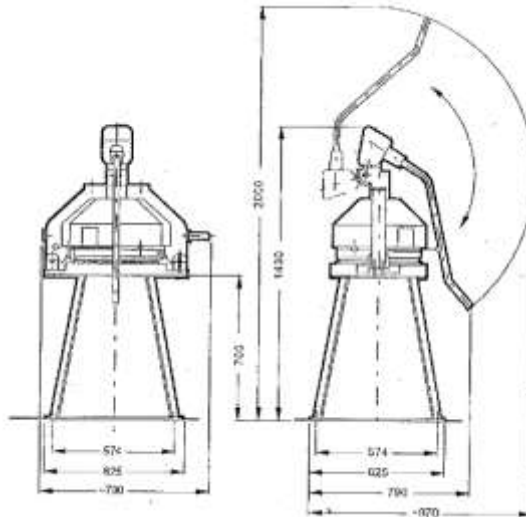
3. Przegląd rozwiązań systemów smarowania w dzielarkach do ciasta

3.1 Ręczne dzielarki do bułek

Dzielarki tego typu nie potrzebują zasilania elektrycznego, do ich napędu wystarczy jedynie siła ludzkich mięśni. Rozróżnia się dwa typy tych urządzeń:

Głowica prasująca dociskana od dołu lub od góry. Przeznaczona do równomiernego podziału kęsów ciasta na porcje o wadze 25-100 gramów, które zostaną później ręcznie uformowane.. Wydajność około 4000 szt./h. Smarowanie odbywa się w sposób ręczny poprzez aplikowanie oleju za pomocą oliwiarki kropłowej na współpracujących elementach.

Poniżej przedstawiono na (Rys. 1) dzielarkę z podanymi wymiarami gabarytowymi.

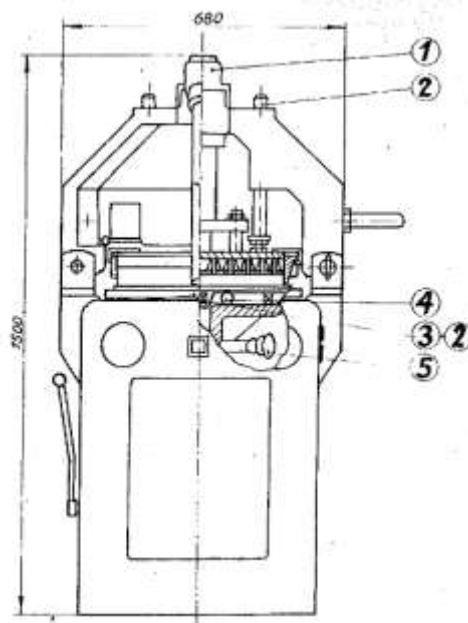


Rys. 1. Widok ogólny ręcznej dzielarki z wymiarami gabarytowymi.

3.2 Ręczne dzielarko-zaokrąglarki do bułek

Są to urządzenia służące do otrzymywania zaokrąglonych jednakowych pod względem masy bułek. Dzielarko-zaokrąglarka składa się z dwóch zespołów:

Zespołu dzielącego oraz zespołu zaokrąglającego. Obsługa pracującej dzielarko zaokrąglarki sprowadza się do okresowego sprawdzania naciągu pasków klinowych i napełniania punktów smarnych, a także do oczyszczania elementów dzielarki z pozostałości ciasta po każdorazowym zakończeniu pracy. Konserwacja sprowadza się do okresowej wymiany smaru w miejscach oznaczonych na rys. 2 oraz opisanych w poniższej tabeli.



Rys. 2. Schemat smarowania ręcznej dzielarko-zaokrąglarki.

Tab. 1 Plan smarowania ręcznej dzielarko-zaokrąglarki.

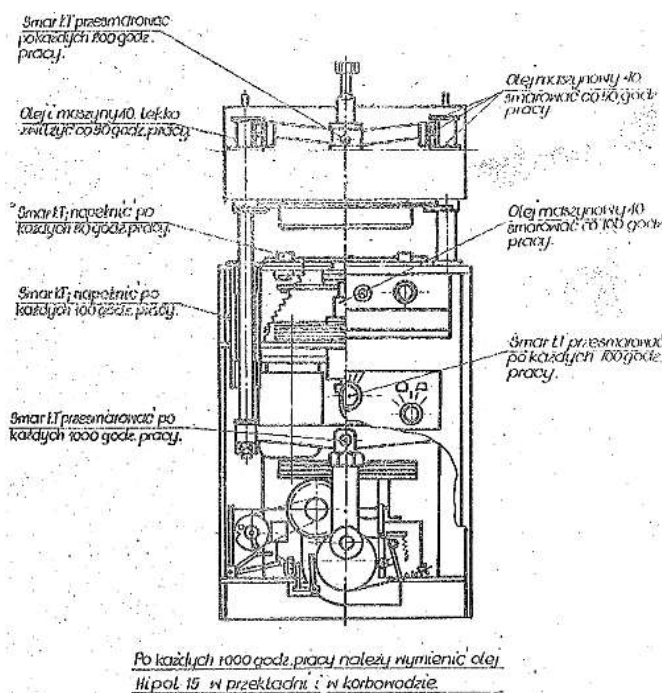
Miejsce smarowania	Rodzaj smarowania	Częstotliwość smarowania w godz. Pracy.	Sposób smarowania
1	Smar stały ŁT4-S2	200	Nasmarować zęby koła i wałka
2	Olej przekładniowy Transel 80	200	Oliwiarką nasmarować wałek pionowy i sworznie prowadzące
3 i 4	Smar stały ŁT4-S2	600	Zdjąć płytę górną. Nasmarować łożyska wózka i płyty górnej.
5	Smar stały ŁT4-S2	600	Sukcesywnie poprzez dokręcanie smarownicy.

3.3 Półautomatyczne dzielarko-zaokrąglarki

Przeznaczone są do dzielenia i formowania bułek z pierwotnego kęsa ciasta. Składają się z następujących zespołów:

- Głowicy roboczej,
- Stołu formującego,
- Napędu prasowania,
- Napędu formowania,
- Układu sterowania i automatyki,
- Korpusu z osłonami,
- Skrzynki elektrycznej.

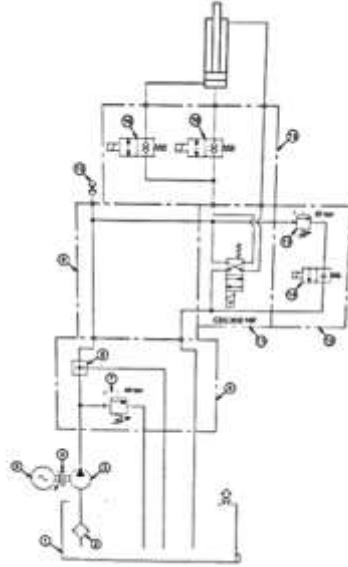
Poniżej przedstawiono schemat smarowania półautomatycznej dzielarko-zaokrąglarki produkcji polskiej.



Rys. 3. Schemat smarowania półautomatycznej dzielarko-zaokrąglarki do bułek.

3.4 Dzielarki oraz dzielarko-formierki do bułek z napędem hydraulicznym

Są to dzielarki do bułek w swojej konstrukcji zbliżone do ręcznych dzielarek z głowicą prasującą od dołu. Napęd za pomocą ludzkich mięśni został zastąpiony napędem hydraulicznym. Poniżej przedstawiono schemat układu napędowego.

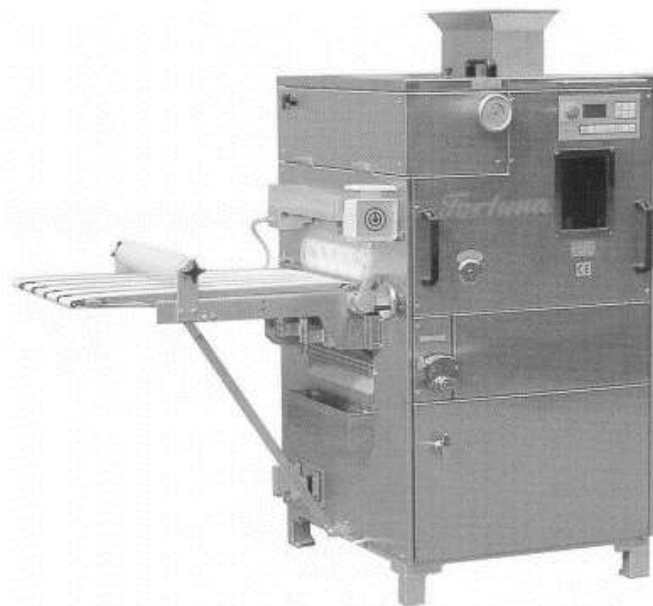


Rys. 4. Schemat układu hydraulicznego dzielarki do bułek.

W dzielarkach oraz dzielarko-formierkach z napędem hydraulicznym, nie ma potrzeby smarowania elementów ruchomych. Należy jedynie pamiętać o regularnej wymianie oleju hydraulicznego.

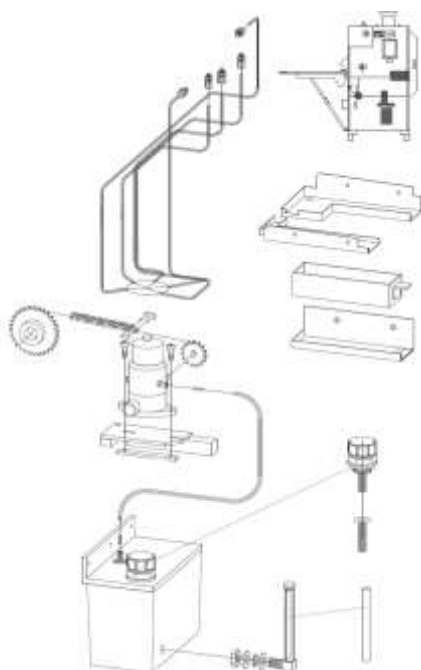
Dzielarki do bułek wchodzące w skład linii produkcyjnej.

Poniżej przedstawiono dzielarkę do chleba, która jest częścią składową ciągu technologicznego do produkcji bułek.



Rys. 5 Widok ogólny dzielarki włączonej w linię automatyczną.

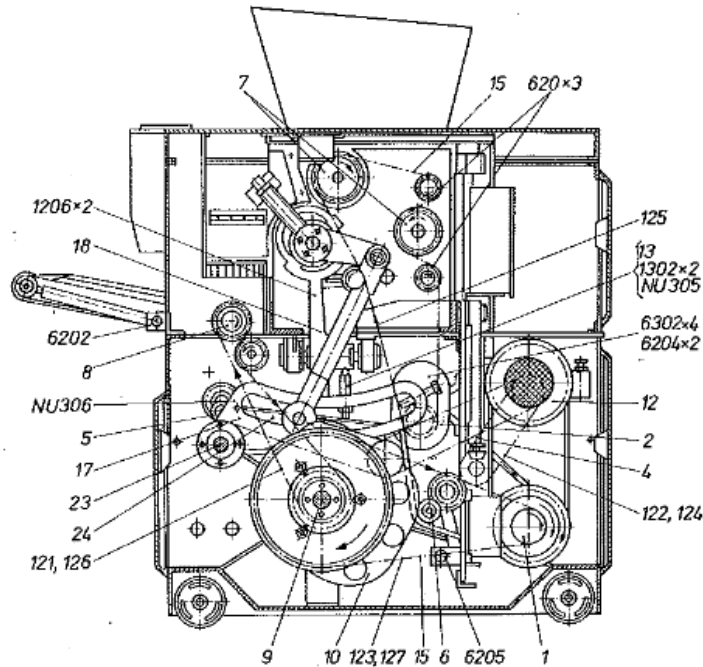
Ciągła produkcja wymusza odpowiedni sposób zabezpieczenia elementów maszyn przez ich zbyt szybkim zużywaniem się. Z tego względu wprowadza się centralne smarowanie, które zapewnia automatyzację procesu smarowania olejem lub smarem. Znacząco podnosi komfort operatora maszyny, które musiał dotychczas wykorzystywać do tego ręczne urządzenia pomocnicze. Centralne smarowanie pozwala na precyzyjne dozowanie substancji smarujących, zachowując przy tym dokładność i regularną częstotliwość dawkowania. W urządzeniach przemysłu spożywczego układy smarowania dzieli się na dwie kategorie w których olej smarujący ma kontakt z żywnością lub nie. Olej przeznaczony do smarowania elementów mających kontakt z żywnością musi być transportowany przez układ zbudowany z elementów, które są odporne na korozję oraz ich użytkowanie nie powoduje wprowadzenia zanieczyszczeń do oleju. Materiałami spełniającymi te kryteria są głównie metale nierdzewne i kwasoodporne oraz tworzywa sztuczne. Głównym elementem układu smarowania jest pompa która powoduje przepływ cieczy smarującej. Poniżej przedstawiono system smarowania komory dzielącej powyższej dzielarki.



Rys. 6 Widok układu smarowania dzielarki do bułek.

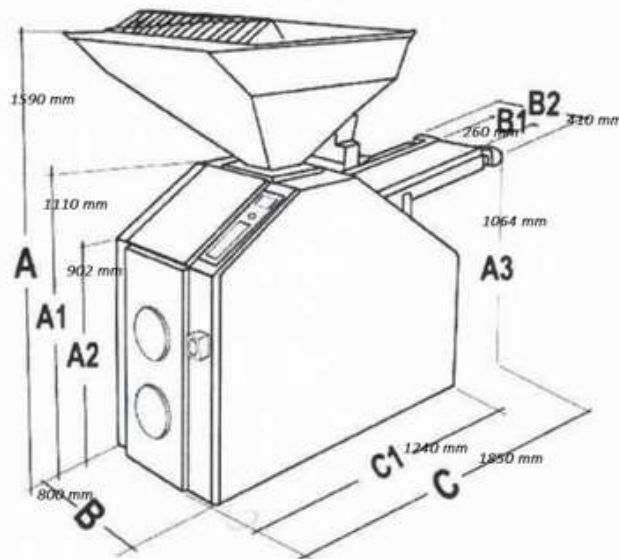
3.5 Dzielarka do chleba z nożową komorą dzielącą

Zasada działania: Ciasto wprowadzone do leja przenoszone jest poprzez walce podające do właściwej komory dzielenia. Pracujący za walcami nóż dozujący odcina odpowiednie kęsy ciasta i przepycha przez gardziel. Regulowanie wagi odbywa się poprzez zmianę nastawy ruchu wahadłowego noża dozującego i zawiera się w granicach od 400 do 2400 g. Kęs ciasta spada na transporter, który przenosi go na dalsze, przewidziane technologią urządzenia. Nóż odcinający otwiera gardziel w czasie ruchu roboczego noża dozującego. W czasie ruchu powrotnego nóż dozujący schowany jest w bębnie dozującym. Smarowanie elementów napędowych przeprowadza się za pomocą pompy smarowej poprzez nasmarowanie wszystkich smarowniczek kołnierзовych oraz za pomocą pędzla – łańcuchy napędowe. Co pewien czas należy napełniać oliwiarkę kropłową umieszczoną w górnym korpusie. Poniżej przedstawiono boczny schemat smarowania z zaznaczonymi punktami do smarowania.



Rys. 7 Schemat punktów smarowania dzielarki do chleba z nożową komorą dzielącą.

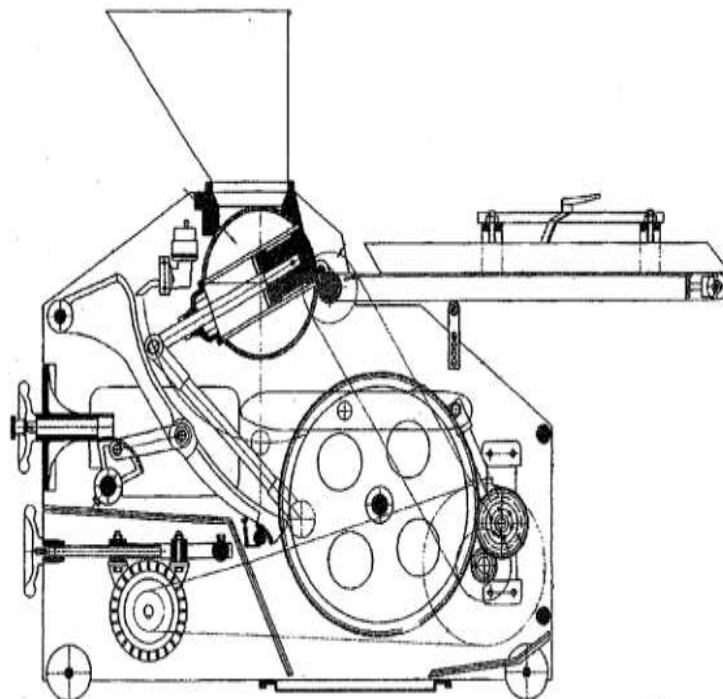
3.6 Dzielarki do chleba z tłokową komorą dzielącą



Rys. 8 Widok ogólny dzielarki do chleba z tłokową komorą dzielącą.

Zasada działania: Ciasto wprowadzone do leja, zsuwa się do komory dzielącej. Następnie przez obniżenie się tłoka, ciasto zostaje wprowadzone do cylindra. Gdy odpowiednia ilość ciasta napelni cylinder, wtedy cylinder się obraca, a ciasto znajdujące się u wierzchołka zostaje odcięte. Po przekręceniu się cylindra, tłok zaczyna się wysuwać, a kęs ciasta spada na transporter, który przenosi go na dalsze, przewidziane technologią urządzenia. Regulowanie wagi odbywa się poprzez zmianę długości ruchu tłoka. Smarowanie powierzchni tłoka oraz cylindra odbywa się za pomocą

odpowiednich kanałów wykonanych w cylindrze, do których doprowadza się olej za pomocą silikonowych rurek oraz pompy. Ze względu na kontakt oleju z ciastem należy stosować jedynie olej z oliwek. Poniżej przedstawiono przekrój maszyny z widocznym pracującym tłokiem.



Rys. 9 Schemat działania dzielarki do chleba z tłokową komorą dzielącą.

4. Podsumowanie

W powyższym opisie zostały przedstawione urządzenia do dzielenia ciasta. Maszyny produkowane pod koniec XX wieku posiadały głównie napęd mechaniczny, a obecne coraz częściej posiadają napęd hydrauliczny. Wprowadzenie napędu hydraulicznego wynika z kilku przyczyn. Pierwszy to wysoka odporność na zabrudzenia i zapylenia w stosunku do napędów mechanicznych. Biorąc pod uwagę urządzenia piekarnicze jest to istotny czynnik wpływający na ich prawidłową pracę. Kolejną przyczyną wprowadzenia tego napędu w dzielarkach jest generowanie dużych sił. Ze względu na wprowadzaniem do wyrobów piekarniczych spulchniaczy oraz polepszaczy pieczywa, urabiane ciasto stało się sztywniejsze i dotychczasowe napędy mechaniczne miały problem ze sprasowaniem takiego ciasta. W obecnych czasach obserwuje się rozwój automatyzacji w każdej dziedzinie przemysłu, nie wyłączając przy tym przemysłu spożywczego. Hydrauliczne układy napędowe na to pozwalają ze względu na łatwość automatyzacji i regulacji, co pozwala na pracę maszyny w linii technologicznej. Ciągła produkcja wymusza odpowiedni sposób zabezpieczenia współpracujących elementów maszyn przed ich zbyt szybkim zużyciem się. Z tego względu wprowadza się centralne smarowanie, które zapewnia automatyzację procesu smarowania olejem lub smarem. Znacząco podnosi komfort operatora maszyny, który musiał dotychczas wykorzystywać do tego ręczne urządzenia pomocnicze. Centralne smarowanie pozwala na precyzyjne dozowanie substancji smarujących, zachowując przy tym dokładność i regularną częstotliwość dawkowania. W urządzeniach przemysłu spożywczego układy smarowania dzieli się na dwie kategorie w których olej smarujący ma kontakt z żywnością lub nie. Olej przeznaczony do smarowania elementów mających kontakt z żywnością musi być transportowany przez układ zbudowany z elementów, które są odporne na korozję oraz ich użytkowanie nie powoduje wprowadzenia zanieczyszczeń do oleju. Materiałami spełniającymi te kryteria są głównie metale nierdzewne i kwasoodporne oraz tworzywa

sztuczne. Głównym elementem układu smarowania jest pompa która powoduje przepływ cieczy smarującej. Kolejnym elementem układu sterowania są zawory oraz rozdzielacze, dzięki którym uzyskuje się równomierne wraz z regularną częstotliwością smarowanie. Następnym ważnym elementem są przewody elastyczne lub sztywne. Ostatnimi elementami układu smarowania są końcówki, które są dedykowane do konkretnego zużywającego się elementu. W ostatnich latach w układach hydraulicznych zaczęto stosować olej biodegradowalny, którego składnikiem bazowym jest olej roślinny. Wpływ stosowania olejów biodegradowalnych odnaleźć można w literaturze (Poprawski 2014; Sacha 2013; Rogoś i Urbański 2009). Ze względu na coraz większy stopień automatyzacji produkcji, przewiduje się wzrost wprowadzania centralnych układów smarowania w urządzeniach związanych z produkcją spożywczą.

5. Literatura

- Kollek W, Osiński P, Stosiak M i in. (2014) Problems relating to high-pressure gear micropumps, Archives of Civil and Mechanical Engineering (14) 2014: 88-95.
- Poprawski W (2014) Biodegradowalne smary w zastosowaniu do węzłów łożyskowych elementów wykonawczych maszyn roboczych, Inżynieria Maszyn (2)2014, 99-107.
- Rogoś E, Urbański A (2009) Biodegradowalny olej hydrauliczny o podwyższonych właściwościach smarnych, Tribologia (2)2009, 201-212.
- Sacha D (2013) Nowe metody oceny właściwości olejów hydraulicznych i turbinowych wprowadzone w specyfikacjach produktowych według PN-ISO, NAFTA-GAZ (3)2013, 263-270.

14. Hydrauliczne układy wspomagające w miasiarko – ubijarkach do ciasta

Hydraulic support systems in dough mixers

Towarnicki Krzysztof

Katedra Eksploatacji Systemów Logistycznych, Systemów Transportowych i Układów Hydraulicznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

Opiekun naukowy: Michał Stosiak

Towarnicki Krzysztof: krzysztof.towarnicki@pwr.edu.pl

Słowa Kluczowe: piekarnia, ubijanie masy, zasilacz hydrauliczny

Streszczenie

Produkcja wyrobów piekarskich i cukierniczych zajmuje czołowe miejsce na liście wyrobów przemysłu spożywczego w Polsce. W ostatnim okresie, znacznie zmieniono technologie wytwarzania ciasta, poprzez wprowadzenie polepszaczy i spulchniaczy. Wynika to z redukcji kosztów produkcji, wyprodukowany produkt ma tę samą wielkość gabarytową przy pomniejszonej wadze. Przygotowywane ciasto jest znacznie utwardzone, piekarze posługując się językiem popularnym porównują je z betonem. Urządzenia używane od dekad nie potrafią sprostać tym wymaganiom, produkowane wcześniej maszyny ulegają częstym awariom, które są spowodowane pękaniem elementów napędowych. W obecnych urządzeniach moc silników napędzających wzrosła praktycznie dwukrotnie. Stosowane dotąd mechaniczne układy zapinania oraz podnoszenia dzieży, nie spełniają w pełni swoich zadań. Konstruktorzy maszyn posiadając tę wiedzę, zaczynają zastępować dotychczas napędy mechaniczne, napędami hydraulicznymi. Główną zaletą układów hydraulicznych jest przenoszenie dużych mocy. Ponadto niezaprzeczalną ich zaletą jest odporność na zanieczyszczenia występujące na hali produkcyjnej w piekarni oraz łatwość automatyzacji. Poniższy artykuł opisuje działanie miasiarko-ubijarek do ciasta różnego typu i konstrukcji, poczynawszy od najstarszych użytkowanych zaraz po wojnie do obecnie użytkowanych.

1. Wstęp

Początki hydrauliki można odnaleźć już w starożytności, gdy człowiek wykorzystywał ruch cieczy na własne potrzeby. W tamtym czasie nie korzystano zdefiniowanych praw, na których opiera się dzisiejsza technika hydrauliczna. Pierwsze maszyny które opierały swe działanie na energii cieczy budowano już w starożytności, a przeszło 200 lat przed naszą erą skonstruowano pompę ssąco-tłoczącą. Następnie w około 1600 roku J. Kepler opracował pompę zębatą, choć w tamtym czasie nie znalazła praktycznego zastosowania. W następnych latach pracowano na jej udoskonaleniu. Dzisiaj jest to grupa pomp wyporowych najczęściej stosowanych w napędach hydraulicznych. Obecny rozwój technologii hydraulicznej powiązany jest z spopularyzowaniem układów elektroniki i automatyki w budowie maszyn. Niewątpliwą zaletą hydraulicznych układów napędowych jest bezstopniowa regulacja prędkością oraz mocą odbiorników. Wkomponowanie rozbudowanych układów elektronicznych w układach hydraulicznych wpłynęło na płynną regulację oraz zmniejszenie emitowanego przez nie hałasu. Aktualnie prowadzone są badania nad optymalizacją konstrukcji elementów hydraulicznych. Prace obejmują głównie dwóch kierunków: redukcji masy oraz zmniejszenie emitowanego przez nie hałasu. Niepodważalną zaletą napędów hydraulicznych jest możliwość przenoszenia dużych obciążeń, które przychyliło się do wprowadzenia tego napędu w urządzeniach przemysłu spożywczego. Często zdrowie człowieka uważane jest za największe dobro, a żywienie jest podstawą dla zachowania zdrowia. Dzisiaj trudno wyobrazić sobie wytwarzanie żywności bez użycia maszyn. Z tego względu podjęto próby udoskonalania maszyn, aby produkcja żywności była zgodna z zachowaniem zasad czystości i higieny.

2. Opis zagadnienia

Działanie miesiarko-ubijarek sprowadza się głównie do obrotu głowicy z wymiennymi narzędziami, a dzieża pozostaje nieruchoma. Ubijanie i mieszanie mas uzyskuje się w wyniku obrotu narzędzi roboczych, które wykonują ruch złożony składający się z:

- ruchu obiegowego po stałym promieniu,
- ruchu obrotowego wokół własnej osi w kierunku przeciwnym do ruchu obiegowego.

Powiązanie obu ruchów wymiennych narzędzi wynika z przeznaczenia miesiarko-ubijarek do przygotowywania ciast miękkich i średniotwardych, kremów, puree ziemniaczanego i innych produktów spożywczych o podobnej konsystencji oraz do ubijania śmietany, jaj, majonezu, margaryny itp.

Niektóre miesiarko-ubijarki posiadają dodatkowy napęd do przystawek w postaci urządzeń do mielenia maku i mięsa, krojenia mięsa albo warzyw i przygotowywania innych dodatków. Obróbka produktów może wymagać w określonych warunkach temperatur wyższych od temperatury pokojowej. W tym celu dzieża jest podgrzewana zewnętrznie za pomocą urządzeń grzejnych elektrycznych lub gazowych. Są to maszyny standardowe przystosowane do pracy w cyklu półautomatycznym lub automatycznym. Wyposażone w ręczne lub mechaniczne układy podnoszenia i opuszczania dzieży. Do napędy głównej głowicy z możliwością zamocowania różnego rodzaju narzędzi stosuje się silnik elektryczny. Urządzenie tego typu musi posiadać możliwość zmiany prędkości obrotowej mieszadła. W zależności od producenta stosowane są przełożenia za pomocą przekładni zębatej, przekładni pasowej lub przekładni stożkowej. Dla uzyskania złożonego ruchu obiegowego i obrotowego, w głowicach miesiarko-ubijarek zastosowane są przekładnie obiegowe. Dzięki wprowadzonym napędom można uzyskać stopniową oraz bezstopniową zmianę prędkości obrotowej. W urządzeniach nowej generacji do zmiany prędkości obrotowej wykorzystuje się głównie falownik.

3. Przegląd rozwiązań napędów w miesiarko-ubijarkach do ciasta.

Jedną z pierwszych polskich miesiarko-ubijarek jest ubijaczka cukiernicza GUK produkowana przez Toruńskie Zakłady Urządzeń Młynskich „Spomasz” w dwóch wersjach 1 i 2. Wersja 1 z dzieżą o pojemności dzieży 100 L, a wersja 2 z dzieżami o pojemności 25 i 50 L. Konstrukcje obu ubijaczek są zbliżone do siebie.

Napęd ubijarki GUK-1 pod względem kinematycznym nie różni się od ubijarki GUK-2, zastosowano jedynie silnik o większej mocy oraz powiększono poszczególne elementy biorące udział w przenoszeniu mocy. Dodatkowo ze względu na znaczną masę dzieży zastosowano silnik elektryczny do napędu podnoszenia i opuszczania dzieży. W tym celu w wsporniku dzieży zamontowano na stałe nakrętkę, a śrubę osadzono na łożyskach umożliwiając przy tym jej obrót, bez możliwości przesunięcia liniowego wzdłuż osi. Podczas obrotu śruby następuje przesunięcie liniowe się nakrętki wzdłuż osi nakrętki, dzięki temu przesuwają się również wspornik dzieży po prowadnicach. Na jednym końcu śruby zamontowano koło pasowe, a napęd z silnika przekazywany jest za pomocą pasa klinowego. Dla ograniczenia przesuwu wspornika maksymalnego w dół oraz do góry, zastosowano wyłączniki krańcowe. Dodatkowo w bocznej części korpusu ubijarki obok przycisków do załączania silnika głównego, wmontowano przyciski do sterowania silnikiem napędu wspornika dzieży. Stosowane narzędzia do tej ubijarki różnią się jedynie wielkością.

Poniżej przedstawiono budowę ubijarki cukiernicznej GUK – 1.

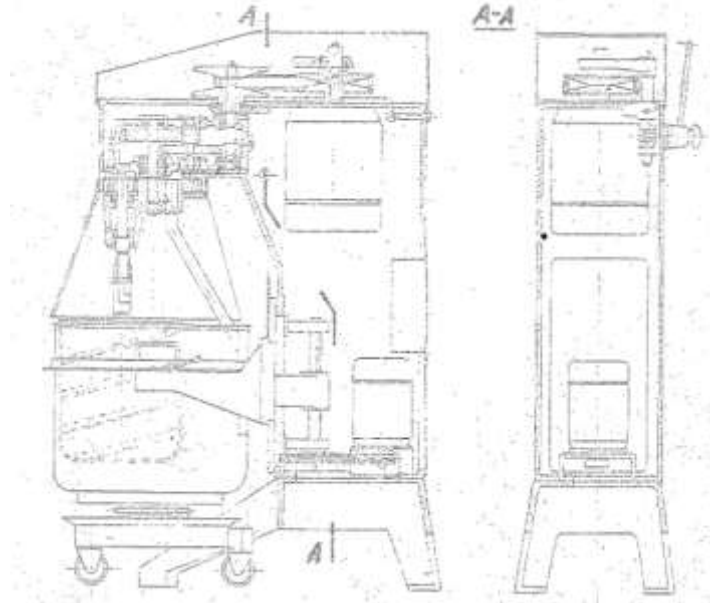
Budowę ubijarki cukiernicznej GUK-2 przedstawiono poniżej.

Powyższy plan przedstawia rozkład zespołów ubijarki. Korpus ubijarki spełnia rolę elementu konstrukcyjnego łączącego w jedną całość pozostałe zespoły maszyny:

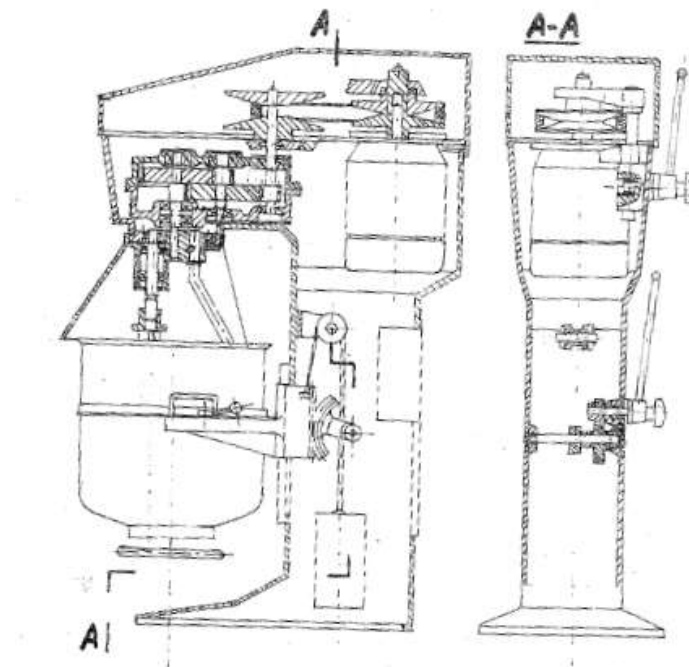
W górnej części korpusu przewidziano miejsce na pomieszczenie elementów przekładni bezstopniowej z układem zmian obrotów oraz reduktora i głowicy z uchwytami do mocowania

narzędzi roboczych i zgarniacza. Natomiast w dolnej części korpusu zlokalizowano ręczny układ podnoszenia i opuszczania obejmy dzieży.

Przekładnia bezstopniowa napędzana jest z elektrycznego silnika asynchronicznego o budowie klatkowej. Zamocowano go do płyty zaopatrzonej w podłużne otwory pod śruby, przy których poluzowaniu możliwy jest przesuw płyty po korpusie i naciąg pasa przekładni bezstopniowej. Naciągu dokonuje się poprzez dokręcenie dwóch śrub w górnej części korpusu.



Rys. 1. Przekrój ubijarki cukierniczej GUK-1.



Rys. 2. Przekrój ubijarki cukierniczej GUK-2.

Na wale silnika osadzono tarczę IV przekładni bezstopniowej, posiadającą na części cylindrycznej dwa wpusty, po których przesuwają się tarcze III. Pomiędzy tarcze włożony jest gerotorowy zębata pas klinowy. Pas ten przenosi moment obrotowy od silnika na drugą parę tarcz osadzonych na wałku wejściowym do reduktora. Tarcza II osadzona jest na wałku wejściowym reduktora na stałe. Tarcza I przesuwają się po wałku wejściowym na dwóch wpustach. Tarcza III i I dociskana jest do pasa dwoma widełkami poprzez pokrywki i łożyska kulkowe wzdłużne. Zmiana położenia widełek w górę i dół, a tym samym zmiana obrotów przekładni bezstopniowej następuje poprzez obrócenie o wymagany kąt w lewo lub prawo dźwigni układu zmiany obrotów po uprzednim jej odblokowaniu, co wykonuje się wyłącznie przy pracującej ubijarce.

Dźwignia zmiany obrotów osadzona jest na wałku zakończonym zębatką współpracującą z uzębieniem wykonanym na wałku pionowym. Na wałku pionowym mocowane są widełki. Z przekładni bezstopniowej napęd przekazywany jest na reduktor.

Obudowa reduktora składa się z dwóch części wykonanych jako żeliwne obudowy skręcone śrubami i kołkowane. W obudowie reduktora zamontowane są dwa wałki z zębnikami, tzn. wałek wejściowy i wałek pośredniczący. Z wałka wejściowego napęd przekazywany jest na koło zębata osadzone na wałku pośredniczącym. Z wałka pośredniczącego w dalszej kolejności napęd przekazywany jest na identyczne koło zębata na wałku wyjściowym.

Na wałku wyjściowym już poza reduktorem zamocowano przy pomocy wpustu i wkręconej od czoła śruby poprzez podkładkę – korpus głowicy, w którym ułożyskowano wałek-wrzeciono. Z jednej strony tego wałka osadzone jest koło zębata zazębiające się z kołem zębatym wewnętrznym. Z drugiej strony tego wałka – wrzeciona na części gwintowej osadzono nakrętkę, a poniżej przykręcony wpust do bagnetowego zamocowania narzędzi. Poza tym w korpusie głowicy znajduje się otwór z rowkiem wpustowym do osadzenia zgarniacza. Zamocowanie zgarniacza odbywa się przez obrócenie dźwigni sworznia o 180°.

W górnej części ściany bocznej korpusu zamontowane są przyciski sterownicze służące do włączenia i wyłączenia silnika elektrycznego napędu głowicy i narzędzi. W dolnej części korpusu na przedniej ścianie znajdują się przewodnice, po których przesuwają się wsporniki dzieży. Do skasowania luzów pomiędzy prowadnicami a wspornikiem dzieży zastosowana jest ruchoma prowadnica oraz dwie śruby.

W część dolną korpusu wmontowano mechanizm podnoszenia i opuszczania dzieży. Jest to ręczny układ podnoszenia i opuszczania dzieży składający się z obejm, na której osadzona jest rolka prowadząca linkę oraz wałka I z osadzonym na nim kołem zębatym i układem blokującym składającym się z dźwigni, rękojeści gwiazdowej, korpusu dźwigni, pokrywki zębataj i sprężyny. W skład tego układu wchodzi jeszcze wałek III, na którym nałożone jest koło zębata i piasta z wieńcem zębatym współpracującym z zębatką na łączniku przykręconym do wspornika dzieży. Dla zrównoważenia ciężaru wspornika z dzieżą zastosowano przeciwcieżar zawieszony na linie.

Ubijarka posiada grzejnik związany z obejmą dzieży, odległość grzejnika od dna dzieży jest regulowana. Zamocowanie dzieży i jej ustalenie względem narzędzi roboczych uzyskuje się przez nałożenie dzieży na kołki osadzone w obejmie i obrót dwóch zamontowanych na niej zacisków po obu stronach dzieży.

Dzieża składa się z cylindrycznego płaszcza i wyoblanego dna – spełniając rolę naczynia dla ubijania mas. Do podnoszenia dzieży służą dwa uchwyty związane z kątownikami przyspawanymi do części cylindrycznej dzieży. W celu ustalenia dzieży względem narzędzi roboczych, kątowniki przyspawane do części cylindrycznych posiadają po dwa otwory o średnicy i rozstawie kołków osadzonych we wspornikach dzieży. Odchylenie grzejnika gazowego w ubijarce odbywa się po uprzednim odblokowaniu rękojeści gwiazdowej.

Narzędzia robocze są wymienne i służą do ubijania, mieszania i ugniatania mas cukierniczych. Ubijarka posiada 3 rodzaje narzędzi roboczych. Wszystkie narzędzia wykonane są ze stali odpornej na korozję. Miesidło krzyżowe służy do mieszania mas cukierniczych gęstych. Ubijaki różgowe przeznaczone są do ubijania mas cukierniczych rzadkich, natomiast miesidła krzyżowe służą do wyrabiania mas cukierniczych bardzo gęstych. Poza narzędziami roboczymi ubijarka wyposażona została w zgarniacze służące do zeszkrobывania wyrabianej masy w wewnętrznych ścianek dzieży w celu dokładnego jej wymieszania.

Aby wyeliminować możliwość manipulowania podczas pracy ubijarek wewnątrz dzieży lub przy narzędziach roboczych zaopatrzone je w osłony obrotowe. Osłona wykonana jest z blachy w kształcie stożka ściętego, wyciętego w tylnej części. Mocowana jest do korpusu ubijarki przy pomocy pięciu kulek łożyskowych umieszczonych w oprawkach. Oprawki przykręcone są wkrętami do stalowego pierścienia, który jest przyspawany do części stożka ściętego. Pierścień posiada wyfrezowanie pod rolkę wyłącznika krańcowego. W przedniej części stożka przewidziano wziernik do obserwacji urabianej masy i do dodawania dalszych komponentów urabianej masy. Obrót osłony o 180° celem otwarcia powoduje samoczynne wyłączenie silnika napędowego. Włączenie silnika możliwe jest dopiero po zamknięciu osłony. Instalacja elektryczna ubijarki posiada system blokujący uniemożliwiający włączenie silnika układu napędowego głowicy przy otwartej osłonie narzędzia roboczego.

Wymienne narzędzia mocowane są w uchwycie bagnetowym. Mocując narzędzia w ubijarce wprowadzamy czop wrzeciona z zamocowanym na nim wpustem w nacięcie uchwytu i obracamy je o ¼ obrotu, a następnie ściągamy poosiwo w dół aż do oporu. Położenie ustalmy przez dokręcenie do górnej krawędzi uchwytu narzędzia nakrętki.

W czasie pracy ubijarki dzieża musi być założona na wspornik. Osiągamy to przez nałożenie dzieży z kątownikiem posiadającym dwa otwory na kołki osadzone we wsporniku. Blokowanie dzieży uzyskujemy przez obrót do przodu dwóch zacisków krzywkowych.

Intensywność podgrzewania dzieży można regulować zmianą wielkości płomienia uzyskiwanego przez obrót pokrętła kurka gazu lub zmianę odległości palnika od dna dzieży. Zmianę wysokości położenia dzieży uzyskuje się przez przesterowanie ręczne wspornika dzieży przesuując się po prowadnicach wykonanych w korpusie. Ręczne przesterowanie układu podnoszenia dzieży w ubijarce odbywa się tak samo jak w układzie zmiany obrotów: przy pomocy dźwigni po uprzednim odkręceniu rękojeści blokującej. Czynność tę należy wykonywać wolno i ostrożnie, by nie spowodować zablokowania narzędzia roboczego w dzieży. Narzędzia powinny obracać się w dzieży bez ocierania się o jej dno i boki.

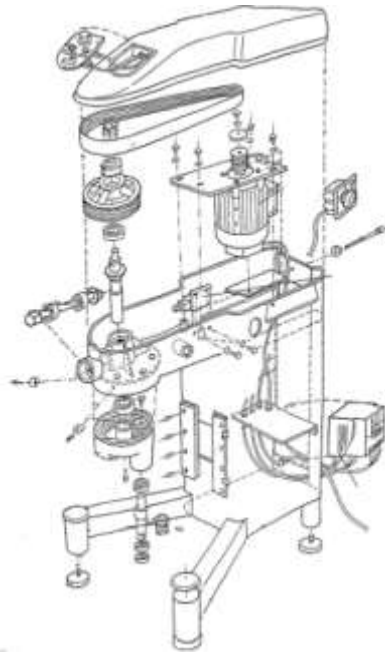
Powyżej przedstawione ubijarki są używane do dziś w wielu cukierniach. Ich niewątpliwą zaletą jest bezstopniowa zmiana prędkości obrotowej narzędzia. Starsze modele oraz obecne ubijarki produkcji zachodniej posiadają możliwość wyboru jedynie 3 prędkości obrotowych. Najmniejsza prędkość do mieszadła hakowego, średnia prędkość do mieszadła krzyżowego oraz największa prędkość przeznaczona do pracy z mieszadłem różgowym. Obecnie produkowane ubijarki posiadają napęd głowicy realizowany za pomocą przekładni pasowej. Bezstopniowa zmiana prędkości obrotowej odbywa się za pomocą falownika umieszczonego na zasilaniu silnika napędowego. Poniżej przedstawiono budowę takiej miesiarko-ubijarki.

W maszynach do pracy w cukierniach rzemieślniczych do napędu podnoszenia i opuszczania dzieży o pojemności do 80 L, stosuje się głównie napęd ręczny za pomocą specjalnej dźwigni. Poniżej przedstawiono widok takiego układu.

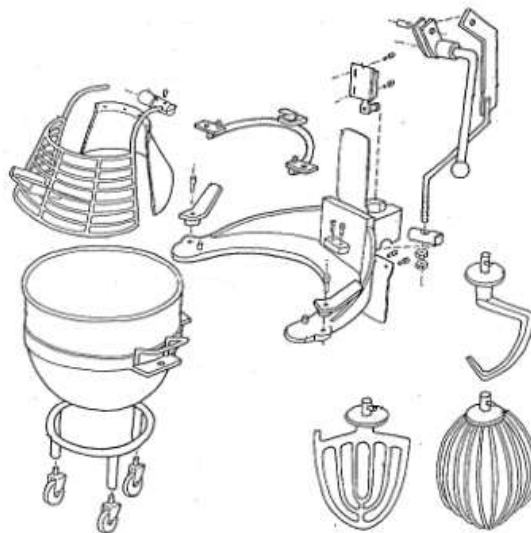
Do cukierni przemysłowych, gdzie stosuje się maszyny o dużych pojemnościach dzieży powyżej 80L, stosuje się głównie układ hydrauliczny. Miesiarko-ubijarka posiada również wrzeciono, gdzie można założyć różnego rodzaju narzędzia. Producent oferuje trzy narzędzia pracy do wyboru – pletwę, krzyżak i różgę. Wrzeciono wykonuje jedynie ruch obrotowy, bez ruchu obiegowego. W celu wymieszania pełnej zawartości dzieży, stosuje się napęd dzieży. Zamiast podnoszenia i opuszczania dzieży stosuje się podnoszenie i opuszczanie głowicy z wrzecionem.

Miesiarko-ubijarka składa się z korpusu stalowego, w którym umieszczone są mechanizmy pozwalające na przeniesienie napędu na wrzeciono, napędu obracającego dzieżę oraz układu hydraulicznego którego zadaniem jest przyciągnięcie dzieży do miesiarki oraz podniesienie i opuszczenie głowicy z zamontowanym narzędziem na wrzecionie.. Napęd wrzeciona złożony jest z silnika głównego oraz przekładni pasowej, znajdujących się w głowicy miesiarki. Zmiana bezstopniowej prędkości obrotowej odbywa się za pomocą falownika. Dzięki zastosowaniu jedynie przekładni pasowej urządzenie pracuje wyjątkowo cicho. Napęd dzieży składa się z silnika oraz w zależności od producenta przekładni pasowej lub reduktora, który napędza podatne koło cierne. Na obracającej się dzieży, zamontowanej na wózku, znajduje się stalowe koło cierne, które podczas współpracy w podatnym kołem ciernym wprowadza dzieżę w ruch obrotowy. Dzieża na wózku jest

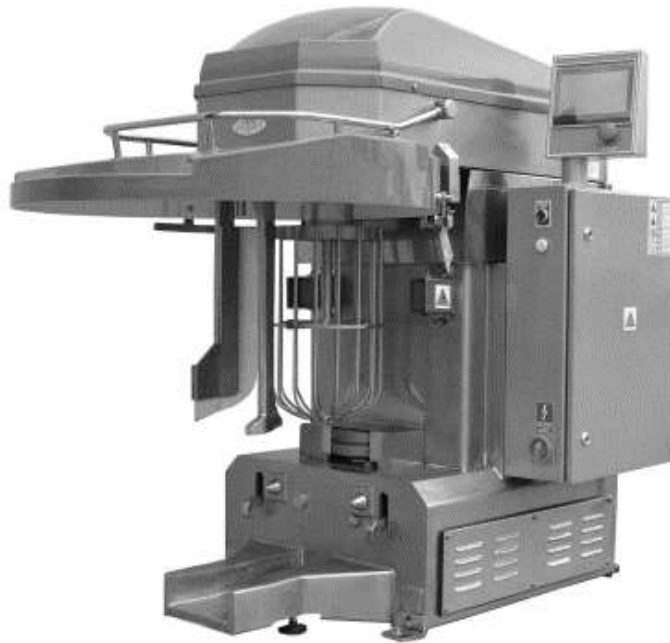
automatycznie przyciągana i blokowana za pomocą specjalnych zaczepów systemu hydraulicznego. Układ hydrauliczny służący do przyciągania wózka składa się z zasilacza hydraulicznego, rozdzielacza hydraulicznego oraz w zależności od producenta jednego lub dwóch siłowników z hakami na końcu służącymi do trzymania wózka. Układ podnoszenia głowicy również w zależności od producenta składa się z jednego lub dwóch siłowników unoszących głowicę oraz rozdzielacza hydraulicznego. Do zasilania zarówno układu podnoszenia jak i przyciągania wózka wykorzystywany jest ten sam zasilacz hydrauliczny. Opuszczanie głowicy jest możliwe dopiero po zapięciu wózka, a jego odpięcie realizowane jest dopiero po uniesieniu głowicy. Poniżej przedstawiono miesiarko-ubijarkę z zamocowanym mieszadłem różgowym.



Rys. 3. Widok miesiarko-ubijarki ze zmianą prędkości obrotowej za pomocą falownika.

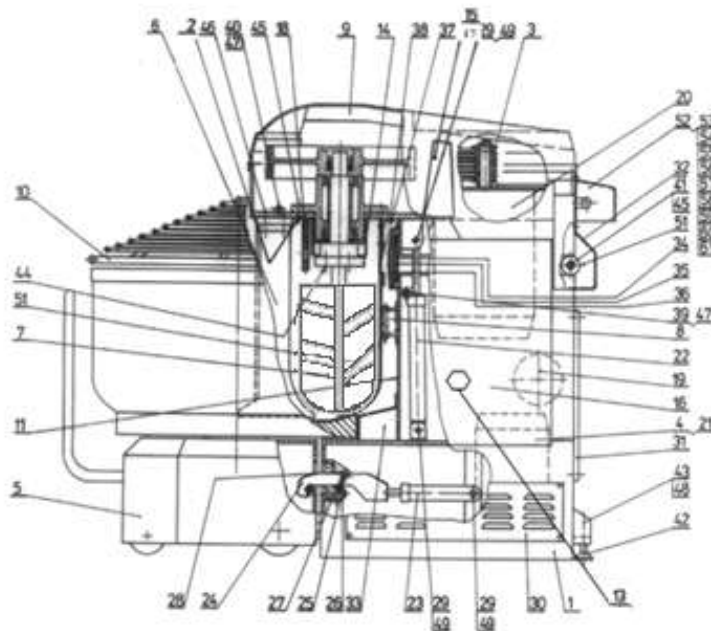


Rys. 4. Widok układu podnoszenia dzieży oraz wymiennych narzędzi.



Rys. 5. Widok miesiarko-ubijarki .

Na schemacie można zauważyć siłowniki należące do układu hydraulicznego. W (Tab. 1) podano opis elementów zaznaczonych na (Rys. 6).



Rys. 6. Widok ogólny miesiarko-ubijarki typ SMRU 260.

Tab. 1. Spis elementów miesiarko-ubijarki.

L.p.	Opis
1.	Korpus
2.	Oslona górna
3.	Napęd spirali
4.	Napęd rolki
5	Wózek
6	Zgarniacz
7	Mieszadło typu płetwa
8	Rolka oporowa
9	Pokrywa górna
10	Oslona dzieży (siatka)
11	Oslona przednia
12	Czujnik temperatury
13	Moduł sterowniczy
14	Oslona spirali
15	Moduł pulpitu sterującego
16	Skrzynka elektryczna
17	Pulpit sterowniczy
18	Instalacja wodna
19	Agregat hydrauliczny
20	Silnik napędu spirali
21	Silnik napędu kotła
22	Siłownik podnoszenia
23	Siłownik dociągania wózka
24	Ramię hakowe
25	Wspornik ramienia hakowego
26	Sprężyna
27	Rolka dolna
28	Rolka górna
29	Sworzeń
30	Oslona boczna
31	Oslona tylna
32	Oslona zawiasów
33	Oslona rolki napędowej
34	Oslona wewnętrzna
35	Oslona środkowa
36	Oslona zewnętrzna
37	Oslona dzieży pionowa
38	Wspornik osłony
39	Mimośród osłony środkowej
40	Mimośród osłony dzieży
41	Tulejka osłon

42	Stopka
43	Śruba poziomująca
44	Śruba M16 lub M18
45	Śruba M12
46	Śruba zgarniacza
47	Śruba M8
48	Nakrętka M20
49	Pierścień osadczy
50	Podkładka
51	Smarownicza

Instalacja wodna – opcja wykonania

52	Oslona wodomierza
53	Rura
54	Wodomierz
55	Elektrozawór
56	Mufa redukcyjna
57	Przedłużka redukcyjna
58	Kolanko
59	Nypel
60	Opaska
61	Łącznik wodomierza

Zasilacze hydrauliczne w tych urządzeniach posiadają pompy zębate o ząbieniu zewnętrznym o których szerzej można dowiedzieć się w lit (Kollek 1996; Kollek i Maćkiewicz 1999; Osiński 2013) oraz zbiorniki oleju o pojemności od 5 do 6,5L. Ciśnienie maksymalne w układzie to 140 bar, a ciśnienie robocze to 120 bar.

4. Podsumowanie

W powyższym artykule zostały przedstawione miesiarko-ubijarki do przygotowywania ciast lub mas w cukierniach. W zależności od zastosowanego narzędzia można wyrabiać masy cukiernicze rzadkie, gęste lub bardzo gęste. Przedstawiono szczegółową budowę ubijarek cukierniczych produkowanych pod koniec XX wieku, stosowane do dzisiaj w wielu cukierniach rzemieślniczych. Często uznawane za jedno z najlepszych polskich maszyn w branży cukierniczej. W obecnie produkowanych urządzeniach zmieniono układ przeniesienia napędu. Pozostawiono główny silnik elektryczny oraz głowicę z przekładnią planetarną, dzięki której narzędzie wykonuje ruch obrotowy oraz obiegowy. Zastąpiono przekładnię zębatą połączoną z bezstopniową przekładnią pasową, na przekładnię wielopasową, a do bezstopniowej zmiany prędkości obrotowej zastosowano falownik na zasilaniu głównego silnika napędowego. Ze względu na coraz większą produkcję masową w przemyśle spożywczym, wprowadza się miesiarko-ubijarki o większej pojemności dzieży. Ze względu na masę dzieży, zrezygnowano z układu w którym dzieża jest w bezruchu, a narzędzie wykonuje ruch obrotowy i obiegowy. Wprowadzono układ zbliżony do miesiarek do ciasta, gdzie mieszało wykonuje ruch obrotowy, oraz dzieża również wykonuje ruch obrotowy, dzięki czemu następuje równomierne wymieszanie masy w całej objętości dzieży. Często duże miesiarko-ubijarki są budowane na bazie konstrukcji miesiarek do ciasta. Mieszało zostaje zastąpione wrzecionem, na którym montowane są wymienne narzędzia w zależności od konsystencji masy cukierniczej. Dodatkowo na zasilaniu silnika montowany jest falownik dla zapewnienia płynnej zmiany prędkości obrotowej narzędzia. Dzięki temu praca maszyny jest cicha i niezawodna. Zrezygnowano

z mechanicznych układów podnoszenia i opuszczania dzieży. Wprowadzono układ z miesiarek do ciasta, gdzie głowica z odpowiednim narzędziem jest podnoszona i opuszczana, a wózek z obrotową dzieżą jest na stałe zapięty do miesiarko-ubijarki. Wprowadzenie kompletnych zasilaczy hydraulicznych pozwoliło na zastosowanie układów hydraulicznych do zapinania wózka oraz podnoszenia głowicy w miesiarkach. Dzięki temu uzyskano sztywne zamocowanie wózka oraz sztywne dociśnięcie głowicy do korpusu maszyny. Dodatkowo niewątpliwą zaletą układów hydraulicznych jest odporność na zanieczyszczenia w stosunku do mechanizmów śrubowych, zapadkowych lub przekładni zębatych stosowanych w starszych urządzeniach. W ciągu ostatnich kilku lat zaobserwowano rozwój mikrohydrauliki, która szeroko opisana jest w lit. (Kollek i in. 2014). W wyniku ciągłych ulepszeń wprowadzanych do układów hydraulicznych przewiduje się wzrost zainteresowania do stosowania ich do układów wspomagających urządzeń przemysłu spożywczego.

5. Literatura

- Kollek W, Osiński P, Stosiak M i in. (2014) Problems relating to high-pressure gear micropumps, Archives of Civil and Mechanical Engineering (14) 2014: 88-95.
- Kollek W (1996) Pompy zębate, konstrukcja I eksploatacja. Zakład Narodowy im. Ossolińskich. Wrocław 1996: 10-21.
- Kollek W, Mackiewicz J (1999) Teoria I obliczanie pomp zębatych, Kadłuby I układy napięte wstępnie, Zakład Narodowy im. Ossolińskich. Wrocław 1999: 13-22.
- Osiński P (2013) Wysokociśnieniowe, niskopulsacyjne pompy zębate o zazębieniu zewnętrznym, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2013: 27-66.

15. Minerale miedzionośne – występowanie i charakterystyka

Copper-bearing minerals - occurrence and characteristics

Irmína Wojciechowska, Kinga Filipowiak, Przemysław Aksamitowski, Karolina Wieszczycka

Instytut Technologii i Inżynierii Chemicznej, Wydział Technologii Chemicznej, Politechnika Poznańska

Opiekun naukowy: Karolina Wieszczycka

Wojciechowska Irmína: irmina.w.wojciechowska@doctorate.put.poznan.pl

Słowa kluczowe: rudy miedzi, geologia, metalurgia

Streszczenie

Artykuł opisuje rodzaje skał bogatych w minerały miedzionośne, ze szczególnym naciskiem na ich występowanie na terenach Polski. Wyszczególnione zostają minerały rudonośne oraz towarzyszące. Opis charakterystyki minerałów miedzi przedstawia takie informacje jak budowa chemiczna, barwa, zawartość miedzi, współwystępowanie oraz inne, unikatowe cechy.

1. Wstęp

Miedź, zarówno do celów przemysłowych jak i użytkowych, pozyskiwana jest głównie z minerałów kruszcowych, których liczba na świecie wynosi ponad 160. Do minerałów o największej zawartości miedzi, a tym samym największym znaczeniu dla przemysłu, należą m.in. chalkozyn, bornit, chalkopiryt, digenit, kowelin, kupryt, malachit, djurelit, anilit i idait. Są to tzw. minerały rudne, wykorzystywane do otrzymywania czystego metalu. 90% światowej miedzi tworzy rudy siarczkowe, 9% tlenki miedzi, natomiast ok. 1% stanowi miedź rodzima – metal w czystej postaci, rzadko spotykany i bez znaczenia dla przemysłu. Ze względu na to, że rudy miedzi są ubogie w metal i często współwystępują ze skałami płonnymi, czyli minerałami nierudnymi, konieczne jest uzyskiwanie z nich koncentratów, np. w procesie flotacji. Koncentraty miedziowe przerabia się na sposób pirometalurgiczny w piecach hutniczych bądź drogami hydrometalurgicznymi. Ostateczne oczyszczanie następuje drogą elektrochemiczną, której produktem są katody miedziowe, przetwarzane na różnego rodzaju wlewki (Bolewski et al. 1993).

Zasoby miedzi, szacowane na 36 mln ton, plasują Polskę na 5 miejscu na świecie pod względem posiadania złóż tego metalu. Ostatnie 50 lat działalności górnictwa miedziowego w Polsce przyniosło ok. miliard ton urobku z którego wytworzono 18 mln ton miedzi. Polskie kopalnie należą wyłącznie do rodzaju kopalń głębinowych i to jednej z nich przypadło miano największej kopalni rudy miedzi w Europie – mowa tu o złożu Rudna, bogatej w rudę piaskowca, łupki miedzionośne i rudę węglanową (Mizerski et al. 2005).

W Polsce złoża miedzi współwystępują ze złożami srebra. Ich największą cechują się sudecki i przedsudecki obszar kraju, tworząc Stare i Nowe Zagłębie Miedziowe. Kruszec może występować w skałach w sposób rozproszony, w postaci gniazd, żył, soczewek, lamin lub masywów. Są to skały osadowe typu cechsztyńskiego, powstałe w okresie permu, kiedy obszary obecnej Europy Zachodniej i Środkowej, w tym Polski, objęte były płytkim i ciepłym morzem. Do skał tych zalicza się łupki miedzionośny, odkryty w latach 50tych XX wieku przez polskiego geologa, Jana Wyżykowskiego. Jest on eksploatowany w okolicach Lubina i Polkowic i stanowi jedno z największych na świecie złóż miedzi. Na tym obszarze w XIX wieku zaczęło kwitnąć górnictwo i hutnictwo miedzi, związane ściśle z eksportem tego metalu na zachód (<https://www.pgi.gov.pl/psg-1/psg-2/informacja-i-szkolenia/wiadomosci-surowcowe.html>).

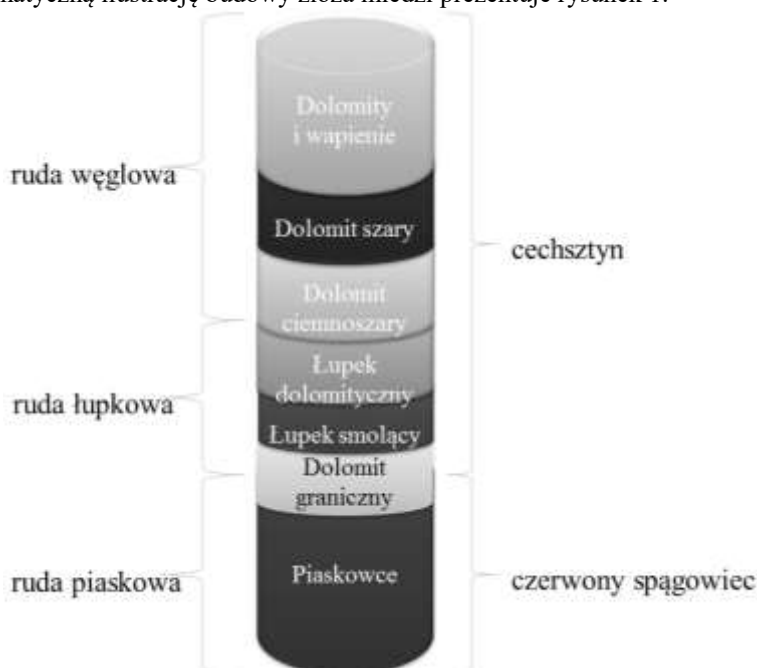
2. Opis zagadnienia

Polska monoklina przedsudecka i niecka północnosudecka tworzy formację cechsztyńską bogatą w takie minerały jak biały spągowiec, wapień podstawowy, łupki miedzionośny i wapień

cechsztyński. Wszystkie te złoża mają charakter polimetaliczny, co oznacza, że oprócz miedzi znajdują się w nich również związki innych metali, takich jak np. srebro, często współwystępujące ze związkami miedzi. Oprócz srebra występują również minerały ołowiu, cynku, kobaltu, molibdenu, niklu, selenu, renu, złota i platyny. Większość złóż, które nie są jeszcze zagospodarowane górnictwem, leżą na terenie niecki północnosueckiej. Wydobycie miedzi ma charakter strategiczny – nie tylko w Polsce, lecz na całym świecie, co związane jest z powszechnością jej wykorzystania w przemyśle. Miedź jest budulcem podstawowym w elektryce i wchodzi w skład niemal każdego urządzenia elektrycznego, z jakim mamy do czynienia na co dzień. Istotność sytuacji podkreśla ubogość złóż, jakimi dysponujemy, każąc pochylić się uważniej nad tematem recyklingu miedzi z tzw. e-waste oraz różnego rodzaju źródeł odpadowych, takich jak cieciki pogalwaniczne czy wody przemysłowe. Poznanie minerałów miedzianośnych, ich pochodzenia, charakterystyki i sposobów zastosowania jest niezwykle ciekawe, biorąc pod uwagę znaczenie jakie ma miedź w dzisiejszych czasach (Kiersnowski et al. 2017, Kłapciński et al. 2007).

3. Przegląd literatury

Jak wspomniano wcześniej polskie złoża miedzi są to skały pochodzenia cechsztyńskiego. Skały te mają charakter osadowy i są pozostałością po płytkim, ciepłym morzu, które obejmowało Niż Polski w środkowym i późnym permie (300 – 250 mln lat temu). Do skał pochodzenia cechsztyńskiego zalicza się biały spągowiec (szary i biały piaskowiec), dolomit drobnoziarnisty, łupki miedzianośne, wapienie i dolomity wapienne, anhydryty oraz sól kamienną. Największy uzysk miedzi uzyskuje się z tych minerałów, w których wtrącenia miedzi mają wielkość ziaren rzędu 50 – 100 μm . Występowanie większych ziaren wiąże się z otaczaniem ziaren przez materiał płonny, który łatwo nasycy się wodą i powoduje przenoszenie ziaren miedzi do frakcji odpadowej. Zbyt drobne ziarna surowca z kolei powodują tworzenie mułu osiadającego, który utrudnia proces flotacji. Rudy węglanowe i piaskowcowe mają średnicę ziaren pomiędzy 40 a 200 μm – należą do nich piaskowce, dolomity, anhydryty, gips i kalcyt. Rudy łupkowe zawierają minerały miedzianośne o drobnych wydzielinach rzędu 5 – 30 μm i tworzone są głównie przez materiały ilaste oraz dolomity (Konopacka et al. 2014). Schematyczną ilustrację budowy złoża miedzi prezentuje rysunek 1.



Rys. 1. Schematyczny profil stratygraficzny złoża rud miedzi.

Minerał miedzionosny można podzielić na dwie kategorie: rudne, czyli ulegające obróbce metalurgicznej w celu uzyskania czystej, metalicznej miedzi, oraz nierudne, o znaczeniu w jubilerstwie lub kolekcjonerskim.

Tabela nr 1 przedstawia najważniejsze minerały rudne miedzi oraz podstawowe informacje na ich temat.

Tab.1. Najważniejsze minerały rudonośne miedzi.

Nazwa	Wzór chemiczny	Zabarwienie	% zawartość miedzi
Chalkozyn	Cu_2S	ciemnoszare	79,8
Bornit	Cu_5FeS_4	miedziano-czarne	63,3
Digenit	Cu_9S_5	szaroniebieskie	78,1
Kowelin	CuS	niebieskie	66,5
Chalkopiryty	$CuFeS_2$	mosiężno-żółte	34,6

Polskie kopalnie głębinowe w okolicach Lubina i Polkowic specjalizują się głównie w wydobyciu łupku miedzionosnego, okruszcowanego specyficznie na sposób soczewkowy i żyłkowy. Złóża lubińsko-głogowskie bogate są w minerały takie jak chalkozyn, bornit, chalkopiryty, digenit i kowelin. Dodatkowo miedź stanowi rozproszone domieszki do minerałów takich jak piryt, galena i sfaleryt.

Chalkozyn, zwany inaczej błyszczem miedzi, jest najważniejszym z wymienionych minerałów o zawartości Cu do 80%. Dominuje on zarówno w piaskowcach, minerałach węglanowych, jak i w łupkach, przy czym najbogatszy w chalkozyn jest łupek smolący. Jest kruchym, nieprzezroczystym minerałem, krystalizującym w układzie rombowym. W Polsce występuje na Dolnym Śląsku. Oprócz tego, że jest doskonałym źródłem miedzi, stanowi również minerał kolekcjonerski i jest ceniony w jubilerstwie do wytwarzania żałobnej biżuterii. Często występuje w asocjacji z innym minerałem hydrotermalnym – bornitem, przy czym im wyższa zawartość chalkozynu w łupkach, tym zawartość bornitu będzie mniejsza. Kruchy i nieprzezroczysty bornit cechuje się ponadto iryzacją, czyli występowaniem specyficznego zjawiska optycznego, nadającego mu odcienie fioletu, niebieskiego i zieleni. W zrostach z chalkozynem i bornitem często występuje digenit, kruchy, błyszczący minerał krystalizujący w układzie regularnym. Kolejnym minerałem jest kowelin - miękki, nieprzezroczysty i niełamliwy siarczek, wykazujący fioletową i czerwoną iryzację, co czyni go wartościowym kamieniem kolekcjonerskim. Często współwystępuje z chalkozynem, chalkopirytem i bornitem w postaci żyłek bądź nalotów. Podobnie w postaci żyłek, jak również i gniazd występuje chalkopiryty, zwany inaczej pirytem miedziowym. Jest to pospolity minerał, niekiedy wykazujący zieloną iryzację, a jego kryształy osiągają niekiedy wielkość 2 cm, co czyni go atrakcyjnym dla zbieraczy. Podobnie jak w przypadku bornitu, jego zawartość jest odwrotnie proporcjonalna do zawartości chalkozynu w łupku (Schumann 2015, Medenbach et al. 1995).

Oprócz minerałów rudnych, miedź występuje często w postaci minerałów towarzyszących, które nie mają znaczenia przemysłowego. Zestawienie najważniejszych z nich zawiera tabela 2.

Do wyjątkowo ozdobnych minerałów miedzi bez wątplenia należy malachit – hydroksywęglan miedzi(II) o intensywnej, zielonej barwie. Występuje w postaci nacieków, skupień nerkowatych bądź gronowatych (Rys. 2b). Jest kruchym minerałem o budowie pasiastej, w Polsce występującym na Dolnym Śląsku i w okolicach Miedzianej Góry. Stosowany powszechnie w jubilerstwie, przeważnie w szlifie kaboszonowym (Rys. 2a).

Jako kamień o bogatej strukturze i pięknym ubarwieniu znajduje zastosowanie w architekturze i sztuce, jak również do produkcji pigmentu (zieleń malachitowa) (Anthony et al. 2003, <http://gems.minsoc.ru/eng/articles/malachite/>).

Innym minerałem wykorzystywanym niekiedy w jubilerstwie jak również cenionym przez kolekcjonerów jest kupryt. Jest to rzadko występujący tlenek miedzi(I) o ciekawym, czerwonym do

czerwonobrunatnego zabarwieniu i diamentowym połysku, które przyniosło mu przydomek miedziowego rubinu. Często współwystępuje z malachitem, azurytem innymi minerałami nierudnymi, w Polsce w podobnie jak malachit w województwie świętokrzyskim i na Dolnym Śląsku. Głęboki kolor i połysk porównywalny z diamentowym czyniłoby z kuprytu cenny kamień jubilerski, gdyby nie miękkość tego minerału, szacowana na 3,5 w skali Mohsa. Wiąże się to z trudnością w uzyskaniu wysokiej liczby karatów i efektownego fasetowania (Gaines et al. 1997).

Tab.2. Minerały miedzi o charakterze nierudnym.

Nazwa	Wzór chemiczny	Zabarwienie	% zawartość miedzi
Malachit	$\text{Cu}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$	zielone do ciemnozielonego	57,1
Kupryt	Cu_2O	Czerwone do brunatnoczerwonego	89,8
Chalkantyt	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	niebieskie	25,1
Tenoryt	CuO	czarno-szare	80,4
Azuryt	$\text{Cu}_3(\text{CO}_3)_2(\text{OH})_2$	niebieskie	19,5



Rys. 2. Malachit: A - szlif kaboszonowy, B: forma gronowata minerału – w Muzeum Mineralów Latarnia Morska Kołobrzeg. Fot.: I. Wojciechowska.

Tenoryt, zwany niekiedy melakonitem to minerał z gromady tlenków o wzorze CuO . Często współwystępuje z malachitem i kuprytem, i podobnie jak one, stanowi produkt utleniania złóż kruszców miedzi. Jest minerałem bardzo rzadko występującym i o wysokim znaczeniu kolekcjonerskim. Charakteryzuje się dużą miękkością i kruchością, tłustym połyskiem i wykazywaniem zjawiska pleochroizmu. Rysunek 3 przedstawia kryształy tenorytu na fragmentach skały wapiennej oraz piaskowca (Gaines et al. 1997, Bolewski et al. 1993).

Azuryt należy do grupy miękkich, pospolitych minerałów z grupy węglanów i stanowi cenny kamień kolekcjonerski. Jego miękkość uniemożliwia uzyskanie dużych klejnotów, szlifuje się go do postaci małych kaboszonów wykorzystywanych w biżuterii artystycznej. Interesująca barwa azurytu

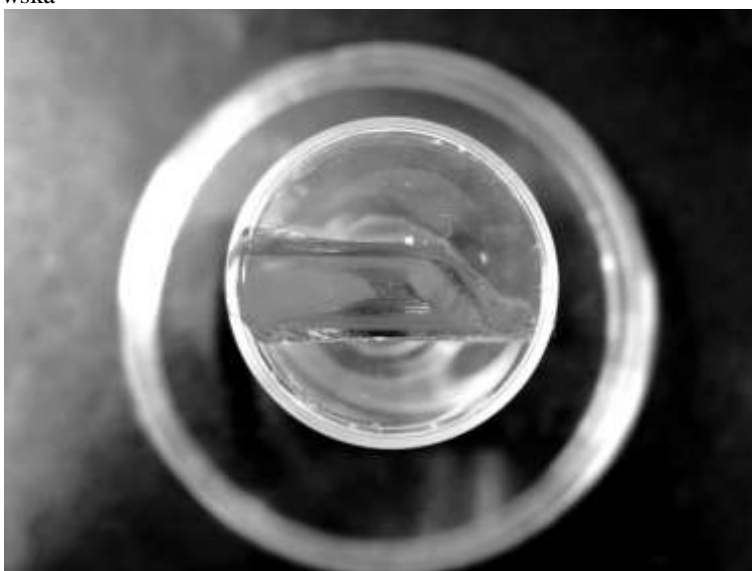
przyczyniła się do jego wykorzystania jako surowiec do wytwarzania pigmentu, czego skutki można podziwiać np. w postaci obrazu Dama z wiewiórką Hansa Holbeina Młodszeo. Ciekawostkę stanowi fakt, że w wyniku ekspozycji na powietrze i zawarty w nim dwutlenek węgla, azuryt samoistnie przechodzi

w malachit (Gettens et al. 1993).

Chalkantyt, inaczej pięciowodny siarczan(VI) miedzi(II) jest powszechnie spotykanym minerałem współwystępującym w rudach miedzionośnych. Jego bardzo niska twardość (2,5 w skali Mohsa) i łatwa rozpuszczalność w wodzie uniemożliwiają zastosowanie w jubilerstwie. Chalkantyt jest wyjątkowo łatwy w hodowli laboratoryjnej, przykład pojedynczego, słupkowego kryształu przedstawia rysunek 4. Związek ten otrzymywany na drodze chemicznej syntezy wykorzystywany jest jako środek ochrony roślin. Najczęściej tworzy się w wyniku parowania wody przy odpowiednim jej zasoleniu. W Polsce występuje w okręgu lubińsko-głogowskim, spotkać go można również w kopalniach w okolicach Miedzianej Góry (Goh et al. 2006, Dare et al. 2011).



Rys. 3. Kryształy tenorytu w Muzeum Mineralów Latarnia Morska Kołobrzeg.
Fot.: I. Wojciechowska



Rys. 4. Sztucznie wychodowany, pojedynczy kryształ chalkantytu – Zakład Chemii Organicznej Instytutu Technologii i Inżynierii Chemicznej Politechniki Poznańskiej.
Fot.: I. Wojciechowska

4. Podsumowanie

Z cywilizacyjnego punktu widzenia miedź należy do jednych z najbardziej wartościowych pierwiastków. Jest niezbędna w życiu codziennym współczesnego człowieka i wszechobecna. Nie można jednak ignorować faktu ograniczonych źródeł miedzi, jakimi dysponuje Ziemia. Wydłużanie cyklu życia przedmiotów codziennego użytku, dbałość o niwelowanie źródeł odpadów, recykling i odzysk miedzi z wód ściekowych są obecnie niezwykle ważnymi tematami, nad którymi należy się pochylić, chcąc zapewnić stałe źródło tego pierwiastka w przemyśle i mając na uwadze dbałość o środowisko naturalne.

Praca została sfinansowana z grantu nr 03/32/DSMK/0820.

5. Literatura

- Anthony JW, Bideaux RA, Bladh KW et al. (2003) Handbook of Mineralogy Borates, Carbonates, Sulfates. Mineralogical Society of America I: 124-126.
- Bolewski A, Manecki A (1993) Mineralogia szczegółowa. Polska Agencja Ekologiczna I: 58-62.
- Dare AS, Barnes S, Prichard HM et al. (2011) Chalcophile and platinum-group element (PGE) concentrations in the sulfide minerals from the McCreedy East deposit, Sudbury, Canada, and the origin of PGE in pyrite. *Mineralium Deposita* 46 (4): 381–407.
- Gaines V, Skinner W, Foord E et al. (1997) The System of Mineralogy. *Dana's New Mineralogy* 8: 15-18.
- Gettens RJ, Fitzhugh EW (1993) Azurite and Blue Verditer, in *Artists' Pigments. A Handbook of Their History and Characteristics*. Oxford University II: 57-58.
- Goh SW, Buckley AL, Lamb R (2006). Copper(II) sulfide. *Minerals Engineering* 19 (2): 204–208.
- <http://gems.minsoc.ru/eng/articles/malachite/>
- Kiersnowski H, Petecki Z (2017) Budowa geologiczna podcechsztyńskiego podłoża Legnicko-Głogowskiego Okręgu Miedziowego (LGOM) i jego otoczenia: spojrzenie krytyczne. *Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego* 468: 175-197.
- Kłapciński J, Peryt T (2007) Budowa geologiczna monokliny przedsudeckiej. Monografia KGHM Polska Miedź S.A: <https://kg hm.com/>
- Konopacka Ż, Zagożdżon KD (2014) Łupiek miedzionośny legnicko-głogowskiego okręgu miedziowego. *Łupiek miedzionośny* I: 7-12.
- Medenbach O, Sussieck-Fornefeld C (1995) *Leksykon przyrodniczy. Minerale*. Świat Książki I: 89-93.
- Mizerski W, Orłowski S (2005) *Geologia historyczna dla geografów*. PWN II: 121
- Schumann W (2016) *Minerały świata*. Alma Press I: 26-27.
- <https://www.pgi.gov.pl/psg-1/psg-2/informacja-i-szkolenia/wiadomosci-surowcowe.html>