

2Leszek UŁANOWICZ ORCID 0000-0001-7493-2546

Grzegorz JASTRZĘBSKI ORCID 0000-0002-8952-8973

Łukasz TOMASZEK

Paweł SZCZEPANIAK ORCID 0000-0001-6544-0005

*Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)*

## FUEL FLOW TEST THROUGH A LEAKY FUEL ASSEMBLY

### Badanie przepływu paliwa przez nieszczelny zespół paliwowy

**Abstract:** *The occurrence of an external leak in the aviation fuel unit leads to a catastrophic aviation event. The aim of the research was to estimate the flow of the fuel stream through the fuel filter chamber with its external unsealing. The research was carried out using experimental methods and computer CFD modelling. Experimental studies were carried out on a specially designed test stand. During the tests, the flow rate of the fuel stream flowing out to the environment was changed. Numerical calculations allowed to obtain the values of the stream and pressure inside the leaky filter chamber. The results of numerical calculations were compared with the results of experimental measurements. The CFD method significantly supplemented the information on the fuel flow inside the considered filter chamber at its external unsealing. The use of software based on the CFD method allows to obtain reliable values characterizing the fuel flow in the aviation fuel unit.*

**Keywords:** aviation, fuel assembly, leak, damage, simulation

**Streszczenie:** *Wystąpienie nieszczelności zewnętrznej w lotniczym zespole paliwowym prowadzi do katastroficznego zdarzenia lotniczego. Celem badań było oszacowanie przepływu strugi paliwa przez komorę filtra paliwowego, przy jego zewnętrznym rozszczelnieniu. Badania wykonano metodami eksperymentalnymi oraz z użyciem komputerowego modelowania CFD. Badania eksperymentalne przeprowadzono na specjalnie zaprojektowanym stanowisku badawczym. W czasie badań zmieniano natężenie przepływu strugi paliwa wypływającej do otoczenia. Obliczenia numeryczne pozwoliły uzyskać wartości strumienia i ciśnienia wewnątrz nieszczelnej komory filtra. Wyniki obliczeń numerycznych zostały porównane z wynikami pomiarów eksperymentalnych. Metoda CFD w znacznym stopniu uzupełniła informacje o przepływie paliwa wewnątrz*

*rozpatrywanej komory filtra przy jego zewnętrznym rozszczelnieniu. Wykorzystanie oprogramowania bazującego na metodzie CFD pozwala uzyskać wiarygodne wartości charakteryzujące przepływ paliwa w lotniczym zespole paliwowym.*

**Słowa kluczowe:** lotnictwo, zespół paliwowy, nieszczelność, uszkodzenie, symulacja

## 1. Introduction

One of the key factors affecting the safety and airworthiness of an aircraft is the tightness of the aviation fuel system [3, 10, 13]. The occurrence of an external leak in an aviation fuel system usually leads to a catastrophic aviation event. Lasek M. et al. [10] describe a dangerous fuel leak from the aircraft tank during its flight. The cause of the malfunction was operational damage to the fuel filler to the tank. Marzuolo et al. [13] described damage and fuel leakage from the metal duct of the aircraft installation as a result of cavitation erosion in it. Erosion has caused large local seepage of the conduit. Zhang et al. [9] presented an analysis of the failure of the high-pressure fuel filter on a Boeing 747 aircraft.

One of the main components of aircraft fuel systems is the fuel filter. During the operation of an aviation fuel filter on an aircraft, it is quite common for it to leak externally. The reasons for fuel leakage from the filter are usually: discontinuity of its body structure in the form of cracks [14], aging wear of rubber seals [4, 7], and damage to the elements maintaining its kinematic bond (threaded pins of the filter cover) [15]. Therefore, work is being undertaken to assess the effects of a leak in the aviation fuel assembly on the efficiency of the fuel system and, as a result, on the operation of the aircraft engine.

The analysis of scientific and technical literature shows that simulation methods based on fluid mechanics equations and advanced computer techniques are used to design and test fluid devices. In the last decade, numerical fluid mechanics (CFD) from Computational Fluid Dynamics has been used to simulate the flow of working fluids. Jayanti [8] used the fluid mechanics equations to study leakage from a crack of specific dimensions. He determined the impact of the damage on such parameters as the flow rate through the crack or the pressure change at the leak site. In turn, Zeng [17] performed a numerical analysis of incompressible leakage in short pipes under different flow conditions. He estimated that the relationship between the pressure change at the leak site and the mass flow rate was approximately linear, with the dominant effect of the inlet mass flow rate and a negligible effect of pipe length. Baranowski et al. [2] used non-linear differential equations to describe the fuel flow in the fuel system, fuel pump, lines and valves. Balac et al. [1] presented the results of the FEM analysis of a pressure vessel with the study of crack growth on a cylindrical surface. Crack initiation was initiated in the most critical area of the tank and then the damage development was simulated using the extended finite element method (XFEM). The results of the numerical analysis of the finite element model were compared with the experimental values. Lisowski [12] presented CFD modeling of blade operation in a vane pump. The Fluent program was used to describe the flow between the blade and the

pump stator. The aim of the work was to determine the most favorable operating conditions of the pump, which are the presence of fluid friction and tightness of the system. Using the CFD method, the standard pressure force that should be implemented by the hydraulic system to obtain high efficiency and durability of the pump was determined. Lichota et al. [11] and Hamid et al. [6] presented a numerical analysis of three different designs of fuel pump blades using the ANSYS CFX version 15 program. Lichota [11] used the ANSYS program to perform a 3D analysis of the cold flow engine fuel system, while Hamid [6] used it to assess the speed of the swirling movement of the flow outside the pump blade. In both cases, information on identifiable areas derived from flow stability was obtained. In summary, CFD computer modeling can be used to simulate steady or transient 2D, axially symmetric or 3D incompressible fluid flows in complex geometries, including (if required) heat transfer effects. Many different classes of problems can be analyzed, including isothermal Newtonian and non-Newtonian flows, natural and/or forced convection problems. CFD modeling allows you to create plots of the velocity vector, pressure contour, flow lines, vortex contour, temperature contour.

The literature analysis carried out above shows that, regardless of the software used, the procedure in the numerical modeling process is identical for all types of programs, i.e.:

formulation of the flow problem, making a geometric model of the object using a CAD program, assigning boundary conditions, mesh generation, solution and analysis of convergence, interpretation of results. The numerical modeling process can be basically divided into three stages: preprocessing, solving, and postprocessing.

The literature analysis also shows that CFD programs can be used to obtain information on the phenomena occurring in the tested assembly and fluid system, i.e.:

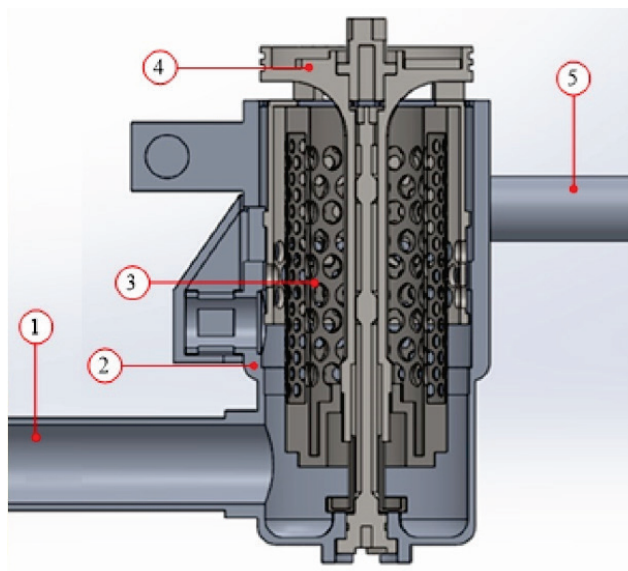
- distribution of selected flow quantities by the tested unit, e.g. pressure, flow velocity [16],
- capacity of the tested unit [5],
- places where flow disturbances occur [2, 5].

According to the authors of this article, the mathematical equations of fluid mechanics are non-linear, which makes it difficult to obtain an accurate quantitative result. Therefore, the correct approach in numerical flow modeling is to verify the mathematical model with experimental research.

The subject of the article concerns the problem of modeling a specific case of fuel flow through a fuel filter-type chamber with its assumed unsealing to the environment. The main purpose of the research was to estimate the fuel flow rate at the filter outlet, towards the aircraft engine, with its unsealing to the environment. The fuel flow rate at the filter outlet was determined indirectly by the amount of fuel bleed with the fuel filter cover open. The CFD computer modeling method verified by experimental tests was used to describe the flow phenomena in the fuel filter-type chamber when it is unsealed to the environment. Complete simulation studies of the fuel flow through the filter were carried out in the Solidworks 2019 environment [18] using the dedicated "Flow Simulation" module.

## 2. Preparation for calculations in the CFD environment

Using the Solidworks application [18], the computational geometry of a 3D model of a real aviation fuel filter was made. The computer solid model of the fuel filter is shown in Fig. 1. The 3D model was imported to the CFD computing environment. A computational grid of finite elements in the volume of the considered model was generated, i.e. a discrete model of the fuel filter, and boundary conditions, constraints and other parameters necessary for calculations were defined. The discrete model of the computational mesh was generated by the finite element method (FEM), i.e. the mesh is built of element cells in FEM. The numerical grid maps the fluid model geometrically. The computational domain includes the filter area and the feed and discharge lines of the fuel stream.



**Fig. 1.** Computer solid model of the fuel filter: 1 – power channel, 2 – filter body, 3 – filter cartridge, 4 – filter cover, 5 – motor power channel

The view of the solid model of the fuel filter in the computational domain and with the view of the global mesh in the Solidworks - Flow Simulation software environment is presented in Fig. 2.

The Solidworks Flow Simulation software automatically selects the appropriate calculation method depending on the assumed boundary conditions [18]. Two types of solvers were used. An implicit solver for incompressible or slightly compressible flows (Mach number less than 3.0) and a hybrid solver for liquids with cavitation. The computational domain is: X axis - 0.249 m, Y - 0.339 m, Z - 0.542 m. Total number of elements in the created mesh: 42,252. Flow type: laminar and turbulent. Initial conditions: temperature: 293.2 K, static pressure: 101,325.0 Pa, type of analysis: internal flow.

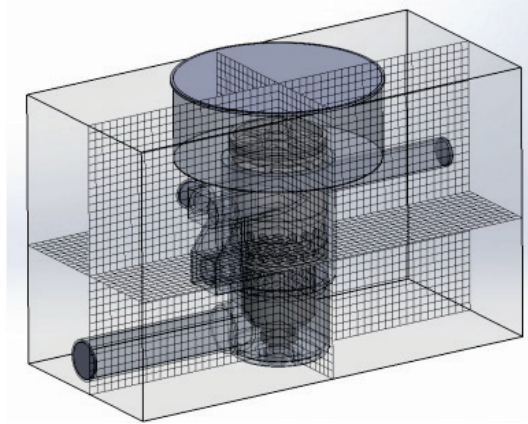


Fig. 2. View of the solid model of the fuel filter with the grid in the computational domain

The boundary conditions used for the simulation were implemented from the catalog data of the on-board pump and from the possibility of fuel flow through the test stand. Test boundary conditions:

- fuel flow rate at the entrance to the supply channel of the  $\dot{Q}_{V1}$  filter = 200 [dm<sup>3</sup>/min] and 280 [dm<sup>3</sup>/min],
- pressure at the outlet from the engine supply channel in both cases 101325 [Pa],
- ambient pressure for both cases 101325 [Pa].

The view of the solid model with the indication of the boundary conditions is shown in Fig. 3.

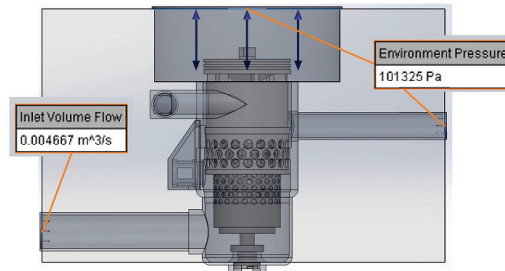


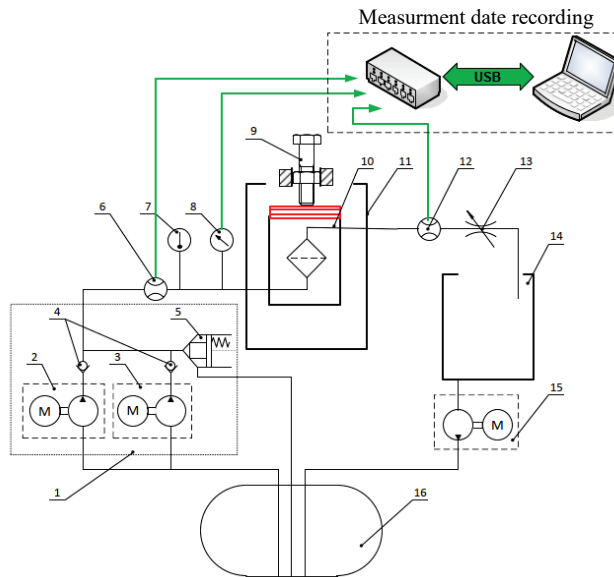
Fig. 3. View of the fuel filter solid model with boundary conditions

The simulation tests carried out concerned the determination of the fuel flow rate through a 10 mm gap with the filter cover open. The following parameters were adopted for simulation calculations in the Solid Works FLOW 2019 software environment:

- working fluid: JET A1 aviation kerosene,
- inner diameter of the supply channel:  $\varnothing$  45 mm,
- internal diameter of the motor supply channel:  $\varnothing$  32 mm,
- ambient pressure: 101325 Pa,
- value of the gap with the filtercover open: 10 mm.

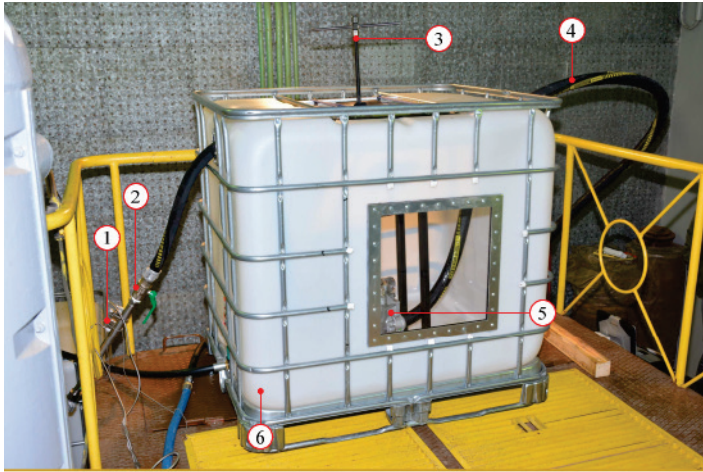
### 3. Experimental research on a special research stand

Experimental studies were carried out using a stand designed for this purpose. The diagram of the stand with the detailed elements is shown in Fig. 4. The constructed system allowed to map the fuel flow parameters occurring during the flight of the aircraft.



**Fig. 4.** Diagram of the stand for determining the amount of fuel drain with the fuel filter cover open: 1 – fuel system, 2 – pump unit No. 1, 3 – pump unit No. 2, 4 – one-way valve H186, 5 – overflow valve H/G4-0054, 6 – KATflow 200 ultrasonic flowmeter, 7 – temperature sensor, 8 – sensor PXXG 16 Peltron, 9 – mechanical clamping of the tested filter cover, 10 – tested fuel filter, 11 – MAUZER type tank, 12 – KATflow 200 ultrasonic flowmeter, 13 – throttle valve, 14 – buffer tank, 15 – VYB-70A pump unit, 16 – main fuel tank

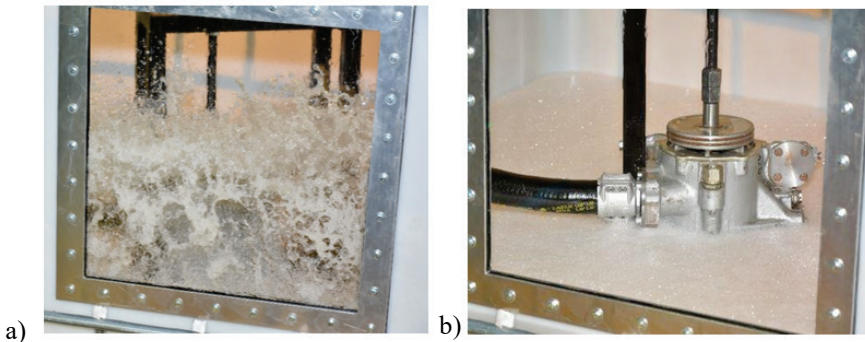
The tested fuel filter was placed and sealed in a MAUZER tank with a capacity of 1000 dm<sup>3</sup> (Fig. 5). The fuel drain tests with the fuel filter cover open were carried out at a temperature of 289,15 K – 293,15 K. The pressure values from the TPXG 16 pressure sensor (manufacturer: Peltron) were transferred online to the computer, where they were recorded and archived. The fuel flow rate in the filter supply channel and in the engine supply channel was measured with KATflow 200 ultrasonic flowmeters and recorded and archived in a special recorder. The source of the fuel stream supplying the test stand with fuel filter (Fig. 5) was the fuel system of the turbine engine dynamometer of aircraft engines. During the tests, the flow rate in the supply channel (before the filter)  $\dot{Q}_{V1}$  and the flow rate after the filter in the engine supply channel  $\dot{Q}_{V2}$  were measured for two different supply streams  $\dot{Q}_{V1} = 200 \text{ dm}^3/\text{min}$  and  $\dot{Q}_{V1} = 280 \text{ dm}^3/\text{min}$ . During the test, the pressure value in the supply channel p1 was also measured.



**Fig. 5.** Stand for measuring the amount of fuel drain with the fuel filter cover open: 1 – KATflow 200 ultrasonic flowmeter, 2 – throttle valve, 3 – screw of the filter cover clamping mechanism, 4 – power cable, 5 – tested filter, 6 – MAUZER 1000 dm<sup>3</sup> tank

## 4. Results of experimental and simulation studies

Experimental tests consisted in feeding the fuel filter with an open cover with a gap value of 10 mm (see Fig. 6b) and feeding the fuel stream to the filter with the flow rate  $\dot{Q}_{V1} = 200 \text{ dm}^3/\text{min}$  and  $280 \text{ dm}^3/\text{min}$  (see Fig. 6a).



**Fig. 6.** View through the sight glass window of the protective tank: a) fuel bleed stream, b) filter with the filter cover open just after switching off the supply pump

While supplying the filter with a stream of fuel under a given pressure, the flow rate in the supply channel (before the filter)  $\dot{Q}_{V1}$  and the flow rate behind the filter in the engine supply channel  $\dot{Q}_{V2}$  were measured. The flow rate through the gap (bleed) between the cover

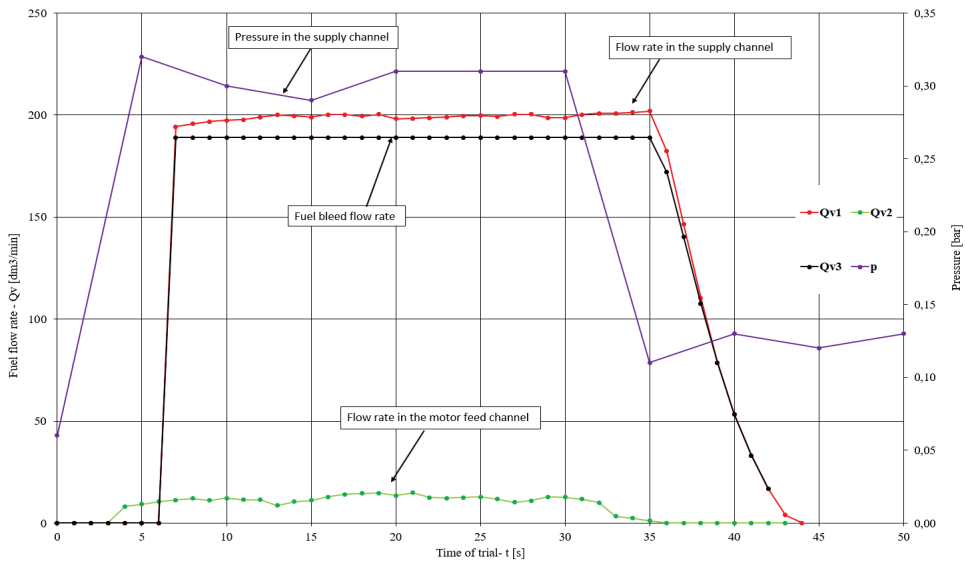
and the throat of the  $\dot{Q}_{V3}$  filter was calculated as the difference of the flow rates  $\dot{Q}_{V1} - \dot{Q}_{V2}$ . The results of experimental tests of fuel flow rates (bleeds) in the fuel filter with an open cover with a gap value of 10 mm are summarized in in Table 1.

**Table 1**

**Results of experimental tests of fuel flow rates (bleeds) in a fuel filter with an open cover with a gap value of 10 mm**

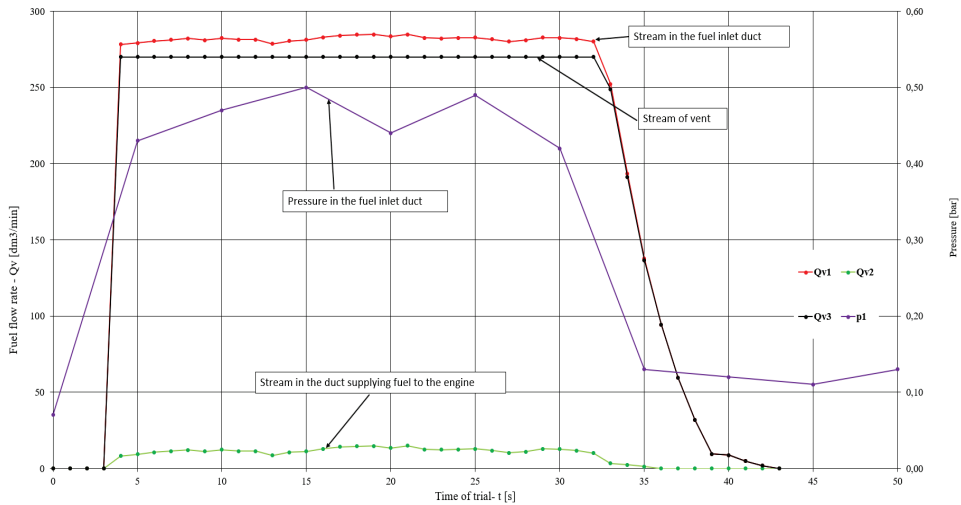
Ambient pressure p	Pressure in the supply channel $p_1$	The flow rate in the		Fuel bleed flow rate $\dot{Q}_{V3}=(\dot{Q}_{V1} - \dot{Q}_{V2})$	Fuel flow rate ratio	
		supply channel $\dot{Q}_{V1}$	motor feed channel $\dot{Q}_{V2}$		$\dot{Q}_{V2}/\dot{Q}_{V1}$	$\dot{Q}_{V3}/\dot{Q}_{V1}$
Pa	Pa	dm <sup>3</sup> /min	dm <sup>3</sup> /min	dm <sup>3</sup> /min	%	%
101325	105545	280	14,77	265,23	5,23	94,77
101325	103957	200	8,98	191,02	4,45	95,55

Figures 7 and 8 show the characteristics of the fuel flow rate in the supply channel (before the filter)  $\dot{Q}_{V1}$ , after the filter in the engine supply channel  $\dot{Q}_{V2}$ , the calculated flow rate  $\dot{Q}_{V3}$  (leakage through the gap between the cover and the filter throat), and pressure changes in front of the filter p1. Figure 7 shows the characteristics when the stand is supplied with fuel with a flow rate of 200 dm<sup>3</sup>/min, while Fig. 8 shows the characteristics when supplied with fuel with a flow rate of 280 dm<sup>3</sup>/min.



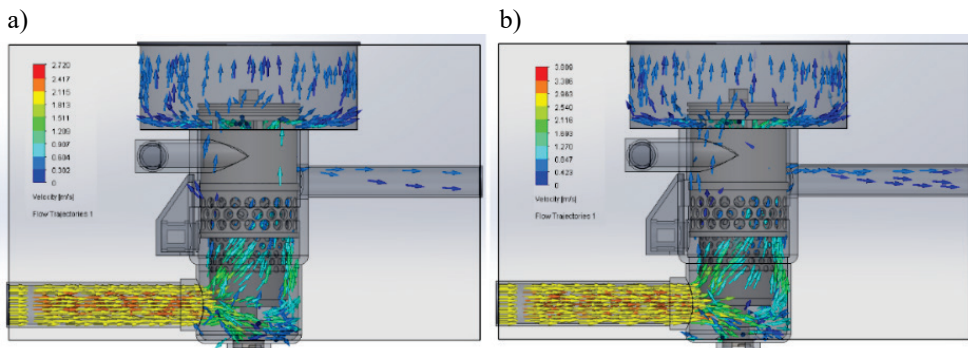
**Fig. 7.** Characteristics of the flow rate through the fuel filter when it is supplied with fuel with a flow rate of 200 dm<sup>3</sup>/min





**Fig. 8.** Characteristics of the flow rate through the fuel filter when it is supplied with fuel with a flow rate of 280 dm<sup>3</sup>/min

Figure 9 shows the quantitative visualization of the fuel stream in the tested filter with the filter cover open in the Solidworks Flow Simulation software environment for the fuel flow rate of 200 dm<sup>3</sup>/min and 280 dm<sup>3</sup>/min. From simulation tests in the Solidworks Flow Simulation software environment, for the assumed boundary conditions of the test, distributions of the flowing fuel stream velocity and distributions of its pressures were obtained. Figure 10 shows the fuel stream velocity distributions in the cross-sectional plane of the filter supply duct and the turbine engine supply duct. Figure 11 presents pressure distributions in the same cross-sectional planes of the filter supply duct and the turbine engine supply duct.



**Fig. 9.** Visualization of the fuel stream line in the tested filter and in the supply and discharge channels of the filter for: a)  $\dot{Q}_{V1} = 200 \text{ dm}^3/\text{min}$ , b)  $\dot{Q}_{V1} = 280 \text{ dm}^3/\text{min}$

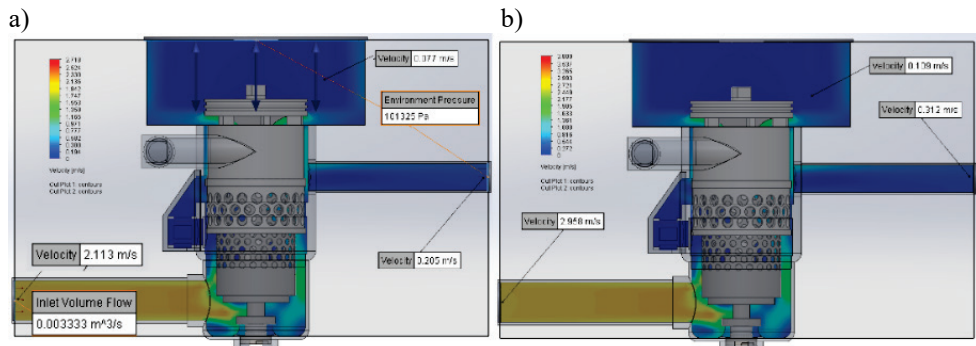


Fig. 10. Velocity distribution of the flowing fuel stream in the filter and in the supply and discharge channels of the filter for: a)  $\dot{Q}_{V1} = 200 \text{ dm}^3/\text{min}$ , b)  $\dot{Q}_{V1} = 280 \text{ dm}^3/\text{min}$

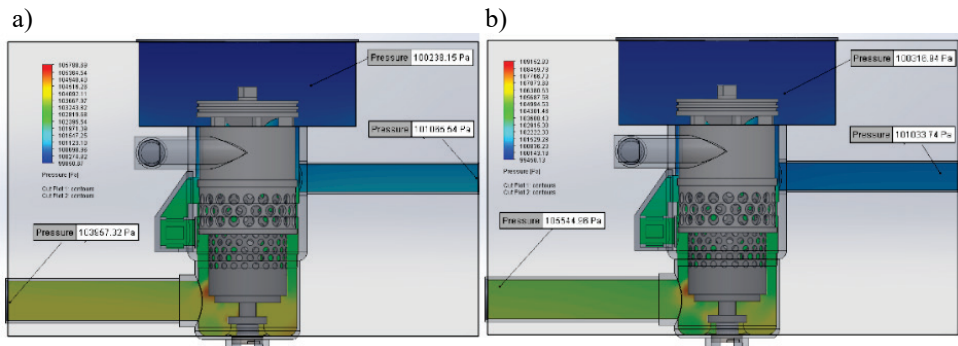


Fig. 11. Distribution of pressure in the cross-sectional plane of the supply and discharge ducts of the filter in the fuel filter for: a)  $\dot{Q}_{V1} = 200 \text{ dm}^3/\text{min}$ , b)  $\dot{Q}_{V1} = 280 \text{ dm}^3/\text{min}$

On the basis of the speed distribution of the flowing fuel stream in the cross-sectional plane of a given flow channel determined in the Solidworks Flow Simulation software environment (Fig. 10), the fuel flow rate in the engine supply channel (behind the filter)  $\dot{Q}_{V2}$  and in the gap between the cover and the filter throat  $\dot{Q}_{V3}$  was determined. The results of simulation estimation of the fuel flow rate in the engine supply duct (behind the filter)  $\dot{Q}_{V2}$  and in the gap between the cover and the filter throat  $\dot{Q}_{V3}$ , in the fuel filter with an open cover with a gap height of 10 mm and experimental bench tests for the fuel flow rate in the duct with the values of  $200 \text{ dm}^3/\text{min}$  and  $280 \text{ dm}^3/\text{min}$  are listed in Table 2.

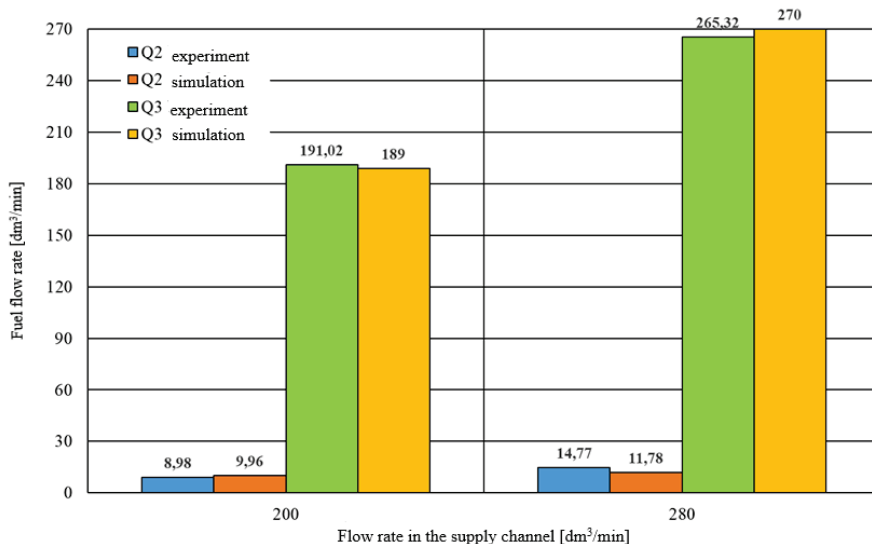
Figure 12 shows the results of simulation tests and experimental bench tests of the values of flow rates  $\dot{Q}_{V2}$  and  $\dot{Q}_{V3}$  as a function of the supply flow rate  $\dot{Q}_{V1}$ , for the fuel flow rate in the supply channel with the values of  $200 \text{ dm}^3/\text{min}$  and  $280 \text{ dm}^3/\text{min}$ . Figure 13 shows a summary of the ratios of the flow rates  $\dot{Q}_{V2}/\dot{Q}_{V1}$  and  $\dot{Q}_{V3}/\dot{Q}_{V1}$  as a function of the supply flow rate  $\dot{Q}_{V1}$ . The analysis of data from experimental bench tests and simulation tests shows that the fuel flow rate in the engine supply channel after opening the filter cover is, respectively, for the fuel flow rate in the supply channel  $200 \text{ dm}^3/\text{min}$  and  $280 \text{ dm}^3/\text{min}$ ,

about 9 dm<sup>3</sup>/min and 12 dm<sup>3</sup>/min. The difference between the results of numerical calculations and the values of the stationary measurements of the flow rate, when unsealing the filter to the environment, is at the level of 17%. The dynamic opening of the filter cover causes a constant fuel flow in the engine supply channel (behind the filter). The ratio of the flow rate in the motor channel to the flow rate in the supply channel of the  $\dot{Q}_{V2}/\dot{Q}_{V1}$  filter, in the dynamic test just after opening the cover, is 1:20. The flow rate through the gap between the cover and the filter throat (fuel release to the environment) is about 95% of the value of the feed stream.

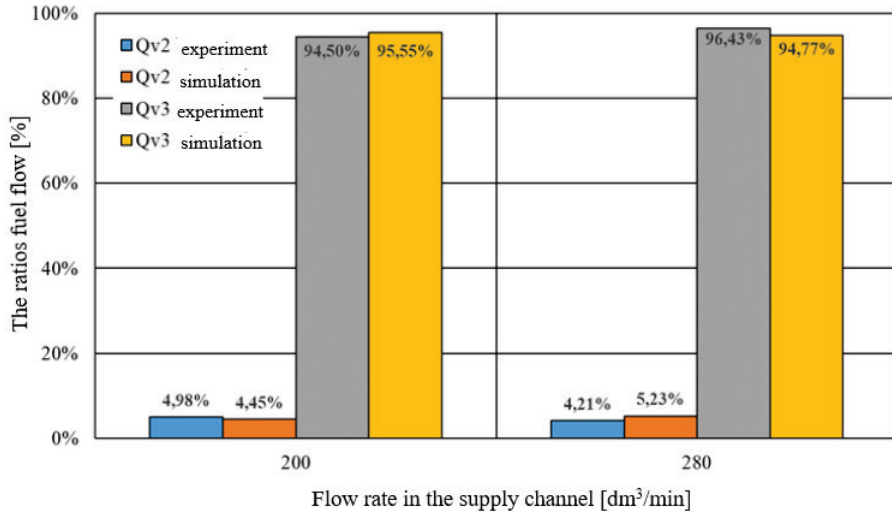
**Table 2**

**Results of simulation tests and stand-based experimental tests**

Parameter	Fuel flow rate in the filter feed channel			
	200 dm <sup>3</sup> /min		280 dm <sup>3</sup> /min	
	simulation	experiment	simulation	experiment
Pressure in the supply channel p <sub>1</sub> [Pa]	103957,32	103225	105544,96	105320
Fuel flow rate in the engine feed channel $\dot{Q}_{V2}$ [dm <sup>3</sup> /min]	8,98	9,96	14,77	11,78
Fuel Flow Rate (bleed) $\dot{Q}_{V3} = (\dot{Q}_{V1} - \dot{Q}_{V2})$ [dm <sup>3</sup> /min]	191,02	189	265,23	270
Fuel flow ratio $\dot{Q}_{V2}/\dot{Q}_{V1}$ [%]	4,45	4,98	5,23	4,21
Fuel flow ratio $\dot{Q}_{V3}/\dot{Q}_{V1}$ [%]	95,55	94,50	94,77	96,43



**Fig. 12.** Summary of the values of  $\dot{Q}_{V2}$  and  $\dot{Q}_{V3}$  streams as a function of the  $\dot{Q}_{V1}$  feed stream for the results of simulation tests and bench tests



**Fig. 13.** Summary of the ratios of the  $\dot{Q}_{V2}/\dot{Q}_{V1}$  and  $\dot{Q}_{V3}/\dot{Q}_{V1}$  streams as a function of the  $\dot{Q}_{V1}$  feed stream

## 5. Summary

Simulation tests using the Solidworks environment and experimental bench tests enable estimation of the fuel flow rate at the filter outlet, in the aircraft engine supply channel, when it is unsealed to the environment. To describe the flow phenomena in the inflow and outflow channels of the fuel filter when it is unsealed to the environment, the CFD computer modeling method was used, verified by experimental research.

Fuel flow simulation tests were carried out in the Solidworks 2019 environment using the dedicated "Flow Simulation" module. Based on a three-dimensional geometric model of a real fuel filter created in the Solidworks application, the flow velocity distribution at the exit of the fuel filter and into the environment through the gap created by the open filter cover was simulated using the Flow Simulation environment's internal software algorithm. The simulation carried out allowed to obtain information about the velocity and pressure distributions of the flowing fuel in the inlet and outlet channels of the fuel filter and, based on them, to determine the flow rate in these channels. Ultrasonic flowmeters were used to determine the fuel flow rate in experimental stand tests.

The use of software based on the CFD method supported by bench-based experimental research allows for obtaining reliable values characterizing the fuel flow through the fuel filter with an open cover without the need to carry out tests and measurements on a real object. The estimated fuel flow rate in the engine supply channel, with the fuel flow rate in the filter supply channel of 200 dm<sup>3</sup>/min, is 8,98 dm<sup>3</sup>/min, and 9,96 dm<sup>3</sup>/min measured on the test stand. The estimated fuel flow rate in the engine supply channel, with the fuel flow

rate in the filter supply channel of 280 dm<sup>3</sup>/min, is 14,77 dm<sup>3</sup>/min, and 11,78 dm<sup>3</sup>/min measured on the test stand. The estimated fuel flow rate through the gap formed by the open filter cover, with the fuel flow rate in the filter supply channel of 200 dm<sup>3</sup>/min, is 191 dm<sup>3</sup>/min, and 918 dm<sup>3</sup>/min measured on the test stand. The estimated fuel flow rate through the gap formed by the open filter cover, with the fuel flow rate in the filter supply channel of 280 dm<sup>3</sup>/min, is 265 dm<sup>3</sup>/min, and 270 dm<sup>3</sup>/min measured on the test stand. The difference between the results of numerical calculations and the values of stationary measurements of the flow rate in the filter, with its unsealing to the environment, is at the level of 17%.

Based on the analysis of the simulation results and experimental stand tests, it can be concluded that the simulation model fulfills its task. It can also be used to assess leaks in fluid systems in conditions that are difficult to verify experimentally.

Estimating the flow parameters using the CFD method is cheaper and requires much less time and money than the classical method of experimental bench tests.

## 6. References

1. Balac M., Grbovic A., Petrovic A., Popovic V.: FEM analysis of pressure vessel with an investigation of crack growth on cylindrical surface. *Maintenance and Reliability* 2018, 20 (3), 378–386. <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2018.3>.
2. Baranowski P., Damaziak K., Małachowski J.: Brake system studies using numerical methods. *Maintenance and Reliability* 2013, 15 (4), 337–342.
3. Behbani-Pour M.J., Radice G.: Leak Detection on Large Transport Airplanes. *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering* 2016, 5 (4), 1-10.
4. Feyzullahoğlu E. Abrasive wear, thermal and viscoelastic behaviors of rubber seal materials used in different working conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 2015, 229 (1), 64-73.
5. Guzman L., Chen Y., Landry H.: Coupled CFD-DEM Simulation of Seed Flow in an Air Seeder Distributor Tube. *Processes* 2020, 8 (12), 1597.
6. Hamid M.F., Idroas M.Y., Mohamed M., Sa'ad S., Yew Heng T., Che Mat S., Miskam M.A., Abdullah M.K.: Numerical Investigation of the Characteristics of the In-Cylinder Air Flow in a Compression-Ignition Engine for the Application of Emulsified Biofuels. *Processes* 2020, 8 (11), 1517. <https://doi.org/10.3390/pr8111517>.
7. He Q., Xu Z., Li A., Wang J., Zhang J., Zhang Y.: Study on hydrophobic properties of fluororubber prepared by template method under high temperature conditions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2021, 612, 125837.
8. Jayanti S.: *Computational Fluid Dynamics for Engineers and Scientists*. Springer Verlag, Dordrecht, The Netherlands, 2018, ISBN 978-94-024-1215-4 ISBN 978-94-024-1217-8 (eBook). <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1217>.

9. Junhong Z., Weidong L., Jiewei L., Yongbo Q., Yi Y., Tianyi Z.: Failure analysis of a high-pressure fuel pipe of engine. *Engineering Failure Analysis* 2019, 103, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.04.040>.
10. Lasek M., Sibilski K., Żurek J.: Aviation accidents aetiology from catastrophe theory point of view. *Proceedings of the 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2010)*, Nice, France, 19–24 September 2010; ICAS 2010-707TP. ISBN 978-0-9565333-0-2. Available online: [http://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2010/ABSTRACTS/707](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2010/ABSTRACTS/707). HTM (accessed on 23 January 2020).
11. Lichota P., Jacewicz M., Szulczyk J.: Spinning gasodynamic projectile system identification experiment design. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 2020, 92 (3), 452 – 459. doi: 10.1108/AEAT-06-2019-0124.
12. Lisowski F., Panek M.: CFD modeling of vane pump vanes operation. *Maintenance and Reliability* 2004, 22 (2), 36–41.
13. Marzuoli A., Boidot E., Feron E., Paul van Erp B.C., Ucko A., Bayen A., Hansen M.: Multimodal Impact Analysis of an Airside Catastrophic Event: A Case Study of the Asiana Crash. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 2016, 17 (2), 587-604.
14. Mohan A., Poobal S.: Crack detection using image processing: A critical review and analysis. *Alexandria Engineering Journal* 2018, 57 (2), 787-798.
15. Szczepaniak P., Jastrzebski G., Sibilski K., Bartosiewicz A.: The study of aircraft accidents causes by computer simulations. *Aerospace* 2020, 7 (4), 41.
16. Yu C, Xue X, Shi K, Shao M, Liu Y. Comparative Study on CFD Turbulence Models for the Flow Field in Air Cooled Radiator. *Processes* 2020, 8 (12), 1687. <https://doi.org/10.3390/pr8121687>.
17. Zeng, Y.; Luo, R. Numerical Analysis of Incompressible Flow Leakage in Short Pipes. *Journal of Applied Fluid Mechanics* 2019, 12 (2), 485 - 494. DOI: 10.29252/jafm.12.02.28612.
18. Technical Reference Solidworks Flow Simulation. Dassault Systemes SolidWorks Corporation, Waltham, MA02451 U.S.A., 2019. <https://docplayer.net/124197062-Solidworks-solidworks-flow-simulation-dassault-systemes-solidworks-corporation-175-wyman-street-waltham-ma-u-s-a.html>.

## **BADANIE PRZEPIYU PALIWA PRZEZ NIESZCZELNY ZESPÓŁ PALIOWY**

### **1. Wprowadzenie**

Jednym z kluczowych czynników wpływających na bezpieczeństwo i zdolność do lotu statku powietrznego jest szczelność lotniczego układu paliwowego [3, 10, 13]. Wystąpienie nieszczelności zewnętrznej w lotniczym układzie paliwowym prowadzi zazwyczaj do wystąpienia katastroficznego zdarzenia lotniczego. Lasek i inni [10] opisują niebezpieczny w skutkach wyciek paliwa ze zbiornika samolotu w czasie jego lotu. Przyczyną wystąpienia nieprawności było eksploatacyjne uszkodzenie wlewu paliwa do zbiornika. Marzuole i inni [13] opisali uszkodzenie i wyciek paliwa z metalowego przewodu instalacji samolotu w wyniku występowania w nim erozji kawitacyjnej. Erozja spowodowała duże miejscowe przesiąkanie przewodu. Zhang i inni [9] przedstawili analizę awarii wysokociśnieniowego filtra paliwowego na samolocie Boeing 747.

Jednym z głównych zespołów instalacji paliwowych statków powietrznych jest filtr paliwowy. W czasie eksploatacji lotniczego filtra paliwowego na statku powietrznym dość częstym przypadkiem jest występowanie jego nieszczelności zewnętrznej. Powodem wycieku paliwa z filtra są zazwyczaj: nieciągłość struktury jego korpusu w postaci pęknięć [14], starzeniowe zużycie gumowych uszczelnień [4, 7] oraz uszkodzenie elementów utrzymujących jego więź kinematyczną (gwintowane trzpienie pokrywy filtra) [15]. Dlatego też podejmowane są prace mające na celu ocenę skutków nieszczelności lotniczego zespołu paliwowego na wydajność instalacji paliwowej i w efekcie na pracę silnika lotniczego.

Z analizy literatury naukowo-technicznej wynika, że do projektowania i badań urządzeń płynowych wykorzystywane są metody symulacyjne oparte na równaniach mechaniki płynów i zaawansowanych technikach komputerowych. W ostatniej dekadzie do symulacji przepływów cieczy roboczych wykorzystywana jest numeryczna mechanika płynów, oznaczana CFD od Computational Fluid Dynamics. Jayanti [8] wykorzystał równania mechaniki płynów do badania wycieków z pęknięcia o określonych wymiarach. Określił wpływ uszkodzenia na takie parametry jak natężenie przepływu przez pęknięcie, czy zmianę ciśnienia w miejscu wycieku. Z kolei Zeng [17] dokonał analizy numerycznej nieściśliwego przecieku w krótkich rurach w różnych warunkach przepływu. Oceniał, że zależność między zmianą ciśnienia w miejscu wycieku a masowym natężeniem przepływu jest w przybliżeniu liniowa, z dominującym wpływem masowego natężenia przepływu na wlocie i pomijalnym wpływem długości rury. Baranowski i inni [2] wykorzystali do opisu przepływu paliwa w układzie paliwowym, pompie paliwowej, przewodach i zaworach nieliniowe równania

różniczkowe. Balac i inni [1] przedstawili wyniki analizy MES zbiornika ciśnieniowego z badaniem wzrostu pęknięć na powierzchni cylindrycznej. W najbardziej krytycznym obszarze zbiornika inicjowano pęknięcie, a następnie symulowano rozwój uszkodzenia przy użyciu rozszerzonej metody elementów skończonych (XFEM). Wyniki analizy numerycznej modelu elementów skończonych porównano z wartościami eksperymentalnymi. Lisowski [12] zaprezentował modelowanie metodą CFD pracy łopatek w pompie łopatkowej. Do opisu przepływu między łopatką a statorem pompy wykorzystano program Fluent. Celem pracy było określenie najbardziej korzystnych warunków pracy pompy, jakimi są występowanie płynnego tarcia i szczelność układu. Wykorzystując metodę CFD, określono wzorcową siłę docisku, jaką powinien realizować układ hydrauliczny dla uzyskania wysokiej sprawności i trwałości pompy. Lichota i inni [11] oraz Hamid i inni [6] przedstawili analizę numeryczną trzech różnych konstrukcji łopatek pomp paliwowych z wykorzystaniem programu ANSYS CFX wersja 15. Lichota [11] program ANSYS wykorzystał do przeprowadzenia analizy 3D instalacji paliwowej silnika z przepływem na zimno, natomiast Hamid [6] do oceny szybkości ruchu wirowego przepływu poza łopatką pompy. W obu przypadkach uzyskano informacje o identyfikowalnych obszarach pochodnych stabilności przepływu. Podsumowując, można stwierdzić, że komputerowe modelowania CFD można wykorzystać do symulowania ustalonych lub przejściowych dwuwymiarowych, osiowo-symetrycznych lub trójwymiarowych nieściśliwych przepływów płynu w złożonych geometriach, w tym (jeśli jest to wymagane) skutków wymiany ciepła. Analizie można poddać wiele różnych klas problemów, w tym izotermiczne przepływy newtonowskie i nienewtonowskie, problemy naturalnej i/lub wymuszonej konwekcji. Modelowanie CFD umożliwia tworzenie wykresów wektora prędkości, konturu ciśnienia, linii przepływu, konturu wirowości, konturu temperatury.

Z przeprowadzonej powyżej analizy literaturowej wynika, że procedura postępowania w procesie modelowania numerycznego jest identyczna dla wszystkich tego typów programów, tj.: sformułowanie problemu przepływu, wykonanie modelu geometrycznego obiektu za pomocą programu CAD, przypisanie warunków brzegowych, wygenerowanie siatki, rozwiązanie i analiza zbieżności, interpretacja wyników. Proces modelowania numerycznego można podzielić zasadniczo na trzy etapy: *preprocessing*, *solving*, *postprocessing*.

Z analizy literatury wynika również, że przy pomocy programów typu CFD można uzyskać informacje na temat zjawisk zachodzących w badanym zespole i układzie płynowym, tj.:

- rozkład wybranych wielkości przepływowych przez badany zespół, np. ciśnienie, prędkość przepływu [16],
- przepustowość badanego zespołu [5],
- miejsca występowania zaburzeń przepływu [2, 5].

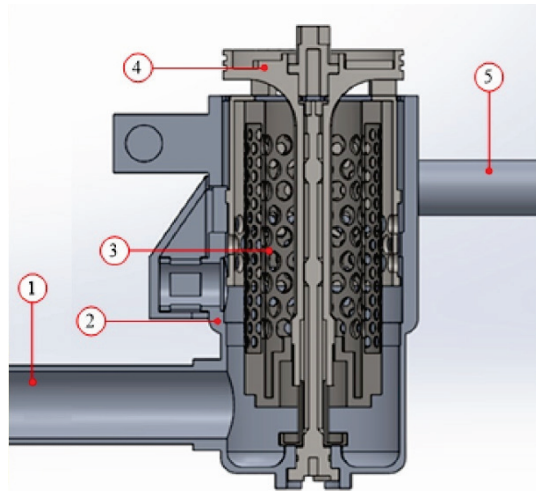
Zdaniem autorów niniejszego artykułu równania matematyczne mechaniki płynów mają charakter nieliniowy, co utrudnia uzyskanie dokładnego wyniku ilościowego. Dlatego też właściwym podejściem w numerycznym modelowaniu przepływu jest weryfikacja modelu matematycznego badaniami eksperymentalnymi.



Podjęta w artykule tematyka dotyczy zagadnienia modelowania szczególnego przypadku przepływu paliwa przez komorę typu filtr paliwowy z zakładanym jej rozszczelnieniem do otoczenia. Głównym celem badań było oszacowanie natężenia przepływu paliwa na wyjściu z filtra, w kierunku silnika lotniczego, przy jego rozszczelnieniu do otoczenia. Natężenie przepływu paliwa na wyjściu z filtra określano pośrednio poprzez wielkość upustu paliwa przy otwartej pokrywie filtra paliwa. Do opisu zjawisk przepływowych w komorze typu filtr paliwowy przy jego rozszczelnieniu do otoczenia wykorzystano metodę komputerowego modelowania CFD zweryfikowaną badaniami eksperymentalnymi. Kompletne badania symulacyjne przepływu paliwa przez filtr zostały przeprowadzone w środowisku Solidworks 2019 [18] z wykorzystaniem dedykowanego modułu „Flow Simulation”.

## 2. Przygotowanie do obliczeń w środowisku CFD

Przy wykorzystaniu aplikacji Solidworks [18], wykonano geometrię obliczeniową modelu 3D rzeczywistego lotniczego filtra paliwowego. Komputerowy model bryłowy filtra paliwa przedstawiono na rys. 1. Model 3D zaimportowano do środowiska obliczeniowego CFD. Wygenerowano siatkę obliczeniową elementów skończonych w objętości rozpatrywanego modelu, czyli model dyskretny filtra paliwa oraz zdefiniowano warunki brzegowe, ograniczenia oraz pozostałe parametry niezbędne do obliczeń. Model dyskretny siatki obliczeniowej wygenerowano metodą elementów skończonych (MES), to znaczy, że siatka zbudowana jest z komórek elementów w MES. Domena obliczeniowa zawiera obszar filtra oraz przewody doprowadzające i odprowadzające strumień paliwa.

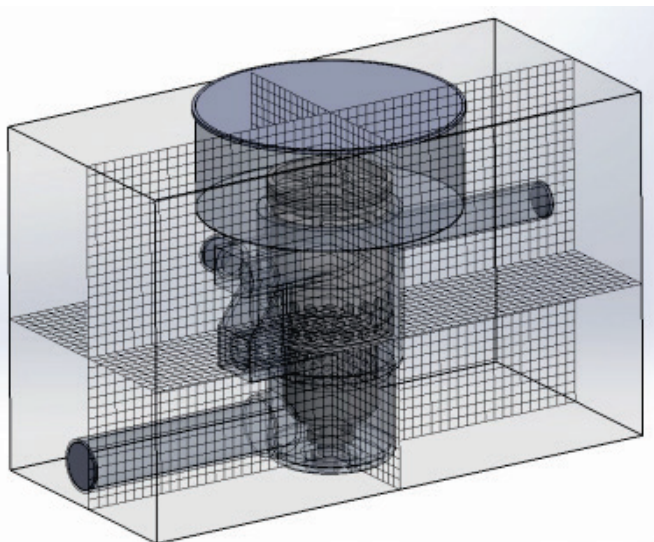


**Rys. 1.** Komputerowy model bryłowy filtra paliwa: 1 – kanał zasilający, 2 – korpus filtra, 3 – wkład filtracyjny, 4 – pokrywa filtra, 5 – kanał zasilania silnika

Widok modelu bryłowego filtra paliwa w domenie obliczeniowej i z widokiem siatki globalnej w środowisku oprogramowania Solidworks - Flow Simulation zaprezentowano na rys. 2. Oprogramowanie Solidworks Flow Simulation automatycznie dobiera odpowiednią metodę obliczeń w zależności od przyjętych warunków brzegowych [18]. Zastosowano dwa rodzaje solverów. Solver implicit dla przepływów nieściśliwych lub lekko ściśliwych (liczba Macha mniejsza niż 3,0) oraz Solver hybrydowy do przepływu cieczy, w których występuje kawitacja. Dziedzina obliczeniowa to: oś X – 0,249 m, Y – 0,339 m, Z – 0,542 m. Całkowita liczba elementów w utworzonej siatce: 42 252. Typ przepływu: laminarny i turbulentny. Warunki początkowe: temperatura: 293,2 K, ciśnienie statyczne: 101 325,0 Pa, typ analizy: przepływ wewnętrzny.

Warunki brzegowe użyte do przeprowadzenia symulacji zostały zaimplementowane z danych katalogowych pompy pokładowej oraz z możliwości przepływu paliwa przez stanowisko badawcze. Warunki brzegowe badania:

- natężenie przepływu paliwa na wejściu do kanału zasilającego filtra  $\dot{Q}_{V1} = 200$  [dm<sup>3</sup>/min] i 280 [dm<sup>3</sup>/min],
- ciśnienie na wyjściu z kanału zasilania silnika w obu przypadkach 101325 [Pa],
- ciśnienie otoczenia dla obydwu przypadków 101325 [Pa].



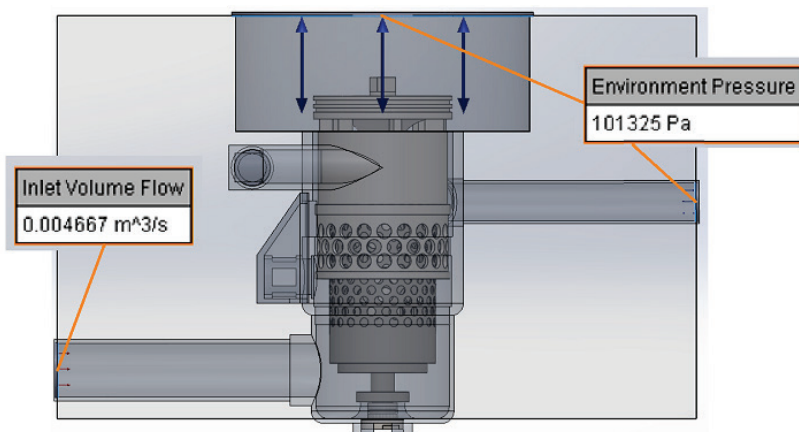
**Rys. 2.** Widok modelu bryłowego filtra paliwowego wraz z siatką w domenie obliczeniowej

Widok modelu bryłowego ze wskazaniem warunków brzegowych pokazano na rys. 3.

Przeprowadzone badania symulacyjne dotyczyły wyznaczenia wartości natężenia przepływu paliwa przez 10 mm szczelinę przy otwartej pokrywie filtra. Do obliczeń symulacyjnych w środowisku oprogramowania Solid Works FLOW 2019 przyjęto następujące parametry:

- ciecz robocza: nafta lotnicza JET A1,

- średnica wewnętrzna kanału zasilającego:  $\varnothing 45$  mm,
- średnicy wewnętrzna kanału zasilania silnika:  $\varnothing 32$  mm,
- ciśnienie otoczenia: 101325 Pa,
- wartość szczeliny przy otwartej pokrywie filtra: 10 mm.

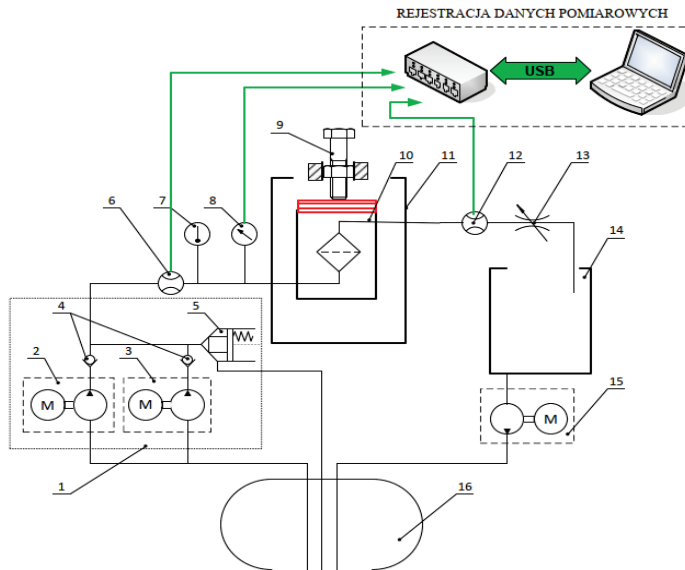


Rys. 3. Widok modelu bryłowego filtra paliwowego z oznaczeniem warunków brzegowych

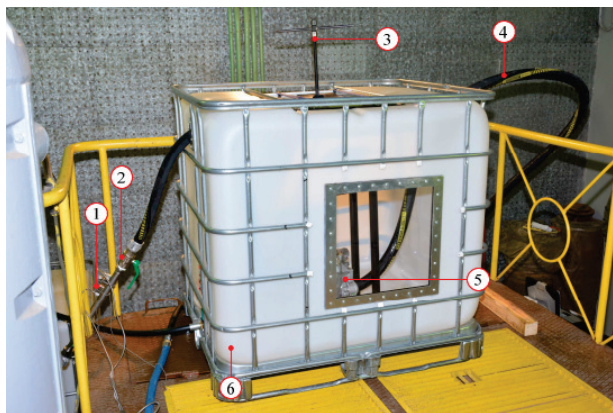
### 3. Badania doświadczalne na specjalnym stanowisku badawczym

Badania doświadczalne przeprowadzono z wykorzystaniem zaprojektowanego do tego celu stanowiska. Schemat stanowiska wraz z wyszczególnionymi elementami przedstawiono na rys. 4. Zbudowany układ pozwolił odwzorować parametry przepływu paliwa występujące podczas lotu statku powietrznego.

Badany filtr paliwowy został umieszczony oraz szczelnie zamknięty w zbiorniku typu MAUZER o pojemności 1000 dm<sup>3</sup> (rys. 5). Badania upustu paliwa przy otwartej pokrywie filtra paliwowego prowadzono w temperaturze 289,15 K – 293,15K. Wartości ciśnienia z czujnika ciśnienia TPXG 16 (producent: Peltron) przekazywano w trybie on-line do komputera, gdzie go rejestrowano i archiwizowano. Natężenie przepływu paliwa w kanale zasilania filtra i w kanale zasilania silnika mierzono przepływomierzami ultradźwiękowymi KATflow 200 i rejestrowano i archiwizowano w specjalnym rejestratorze. Źródłem strumienia paliwa zasilającego stanowisko badawcze z filtrem paliwowym (rys. 5) była instalacja paliwowa hamowni turbinowych silników lotniczych. W czasie badań wykonano pomiary wartości natężenia przepływu w kanale zasilania (przed filtrem)  $\dot{Q}_{V1}$  oraz natężenia przepływu za filtrem w kanale zasilania silnika  $\dot{Q}_{V2}$  dla dwóch różnych strumieni zasilania  $\dot{Q}_{V1} = 200$  dm<sup>3</sup>/min i  $\dot{Q}_{V1} = 280$  dm<sup>3</sup>/min. W trakcie badania dokonywano również pomiaru wartości ciśnienia w kanale zasilania  $p_1$ .



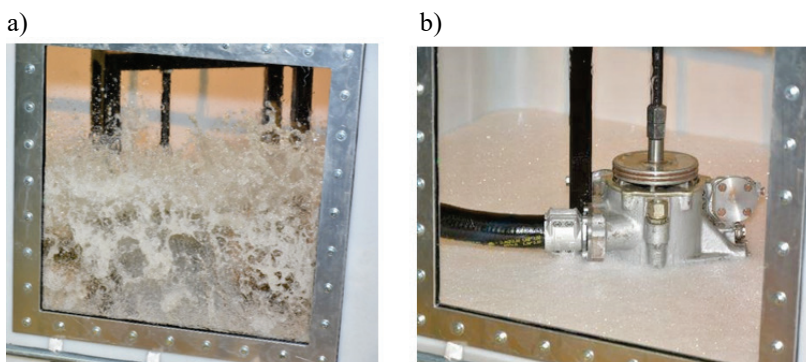
**Rys. 4.** Schemat stanowiska do określania wielkości upustu paliwa przy otwartej pokrywie filtra paliwowego: 1 – układ paliwowy, 2 – zespół pompy nr 1, 3 – zespół pompy nr 2, 4 – zawór jednokierunkowy, 5 – zawór przelewowy H/G4-0054, 6 – przepływomierz ultradźwiękowy KATflow 200, 7 – czujnik temperatury, 8 – czujnik ciśnienia PWXG 16, 9 – mechaniczny docisk pokrywy badanego filtra, 10 – badany filtr paliwowy, 11 – zbiornik typu MAUZER z badanym filtrem, 12 – przepływomierz ultradźwiękowy KATflow 200, 13 – zawór dławiący, 14 – zbiornik buforowy, 15 – zespół pompy odpompowującej VYB-70A, 16 – główny zbiornik paliwa



**Rys. 5.** Stanowisko do pomiaru wielkości upustu paliwa przy otwartej pokrywie filtra paliwowego: 1 – przepływomierz ultradźwiękowy KATflow 200, 2 – zawór dławiący, 3 – śruba mechanizmu docisku pokrywy filtra, 4 – przewód zasilający, 5 – badany filtr, 6 – zbiornik MAUZER o pojemności 1000 dm<sup>3</sup>

## 4. Wyniki badań doświadczalnych i symulacyjnych

Badania doświadczalne polegały na zasilaniu filtra paliwowego z otwartą pokrywą o wartości szczeliny 10 mm (patrz rys. 6b) i podaniu strumienia paliwa do filtra o natężeniu  $\dot{Q}_{V1} = 200 \text{ dm}^3/\text{min}$  i  $280 \text{ dm}^3/\text{min}$  (patrz rys. 6a).



**Rys. 6.** Widok przez okno wziernika zbiornika ochronnego: a) strumienia upustu paliwa, b) filtra z uchyloną pokrywą tuż po wyłączeniu pompy zasilającej

W czasie zasilania filtra strumieniem paliwa pod zadaniem ciśnieniem dokonywano pomiaru wartości natężenia przepływu w kanale zasilania (przed filtrem)  $\dot{Q}_{V1}$  i natężenia przepływu za filtrem w kanale zasilania silnika  $\dot{Q}_{V2}$ . Natężenie przepływu przez szczelinę (upust) pomiędzy pokrywą a gardzielią filtra  $\dot{Q}_{V3}$  obliczano jako różnicę natężenia przepływów  $\dot{Q}_{V1} - \dot{Q}_{V2}$ . Wyniki badań doświadczalnych natężeń przepływu (upustu) paliwa w filtrze paliwowym z otwartą pokrywą o wartości szczeliny 10 mm zestawiono w tabeli 1.

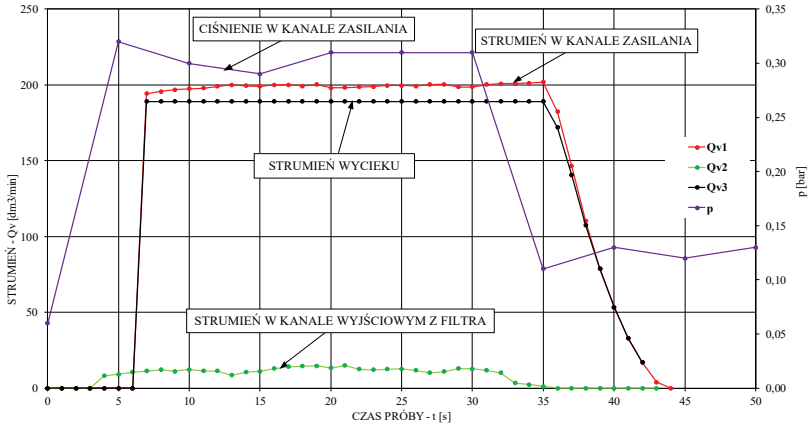
**Tabela 1**

**Wyniki badań doświadczalnych natężeń przepływu (upustu) paliwa w filtrze paliwowym z otwartą pokrywą o wartości szczeliny 10 mm**

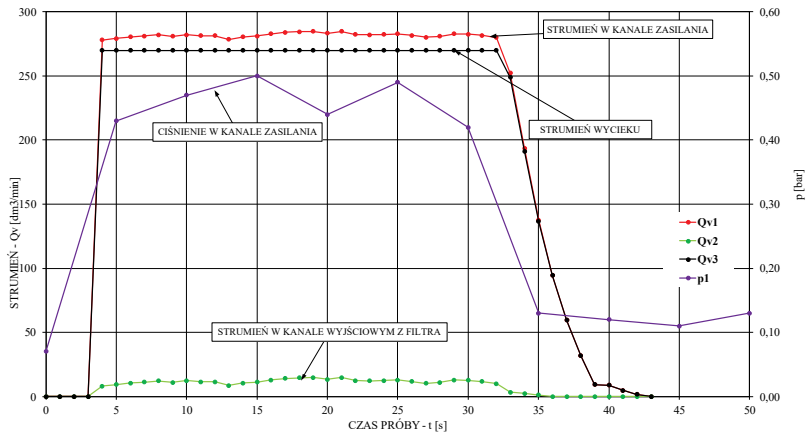
Ciśnienie otoczenia p	Ciśnienie w kanale zasilania $p_1$	Strumień w kanale		Strumień upustu $\dot{Q}_{V3} = (\dot{Q}_{V1} - \dot{Q}_{V2})$	Stosunek strumieni	
		zasilania $\dot{Q}_{V1}$	zasilania silnika $\dot{Q}_{V2}$		$\dot{Q}_{V2}/\dot{Q}_{V1}$	$\dot{Q}_{V3}/\dot{Q}_{V1}$
Pa	Pa	$\text{dm}^3/\text{min}$	$\text{dm}^3/\text{min}$	$\text{dm}^3/\text{min}$	%	%
101325	105544,96	280	14,77	265,23	5,23	94,77
101325	103957,32	200	8,98	191,02	4,45	95,55

Na rys. 7 i 8 przedstawiono charakterystyki natężenia przepływu paliwa w kanale zasilania (przed filtrem)  $\dot{Q}_{V1}$ , za filtrem w kanale zasilania silnika  $\dot{Q}_{V2}$ , obliczone natężenie przepływu  $\dot{Q}_{V3}$  (upust przez szczelinę pomiędzy pokrywą a gardzielią filtra), oraz zmiany ciśnienia przed filtrem  $p_1$ . Na rys. 7 zaprezentowano charakterystyki przy zasilaniu

stanowiska paliwem o natężeniu przepływu  $200 \text{ dm}^3/\text{min}$ , natomiast na rys. 8 przy zasilaniu paliwem o natężeniu przepływu  $280 \text{ dm}^3/\text{min}$ .



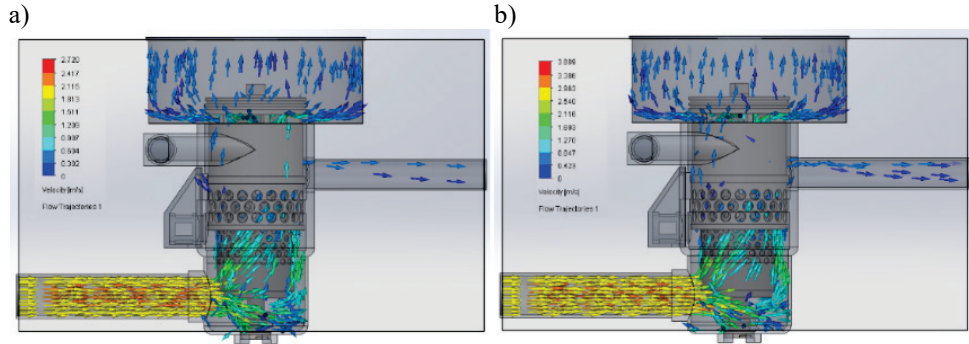
**Rys. 7.** Charakterystyki natężenia przepływu przez filtr paliwowy przy jego zasilaniu paliwem o natężeniu przepływu  $200 \text{ dm}^3/\text{min}$



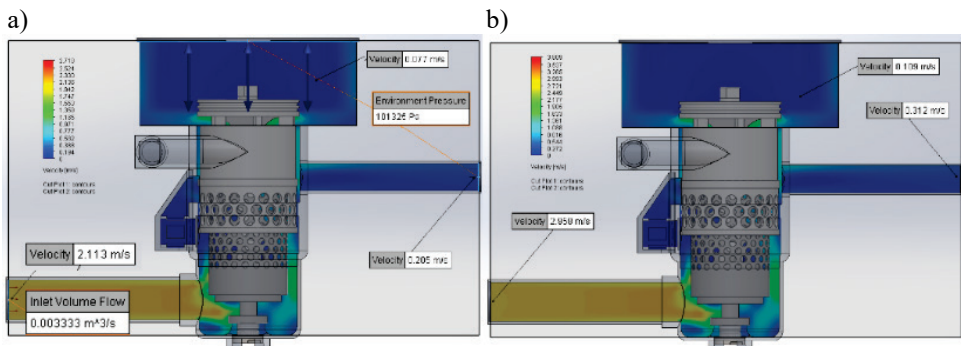
**Rys. 8.** Charakterystyki natężenia przepływu przez filtr paliwowy przy jego zasilaniu paliwem o natężeniu przepływu  $280 \text{ dm}^3/\text{min}$

Na rys. 9 przedstawiono wizualizację ilościową strumienia paliwa w badanym filtrze przy otwartej pokrywie filtra w środowisku oprogramowania Solidworks Flow Simulation dla zasilającego natężenia przepływu paliwa o wartościach  $200 \text{ dm}^3/\text{min}$  i  $280 \text{ dm}^3/\text{min}$ . Z badań symulacyjnych w środowisku oprogramowania Solidworks Flow Simulation, dla przyjętych warunków brzegowych badania otrzymano rozkłady prędkości strumienia przepływającego paliwa i rozkłady jego ciśnień. Na rys. 10 przedstawiono rozkłady prędkości strumienia paliwa w płaszczyźnie przekroju kanału zasilającego filtr i kanału

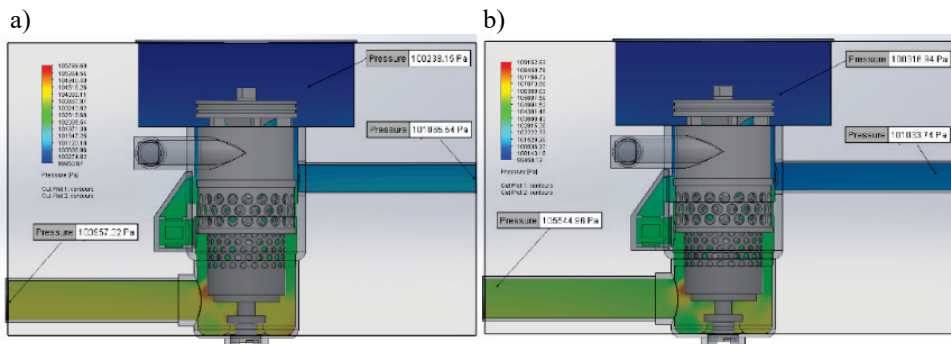
zasilającego silnik turbinowy. Na rys. 11 zaprezentowano rozkłady ciśnienia w tych samych płaszczyznach przekroju kanału zasilającego filtr i kanału zasilającego silnik turbinowy.



Rys. 9. Wizualizacja linii strumienia paliwa w badanym filtrze oraz w kanałach zasilającym i wypływowym filtra dla: a)  $\dot{Q}_{V1} = 200 \text{ dm}^3/\text{min}$  oraz b)  $\dot{Q}_{V1} = 280 \text{ dm}^3/\text{min}$



Rys. 10. Rozkład prędkości strumienia przepływającego paliwa w filtrze oraz w kanałach zasilającym i wypływowym filtra dla: a)  $\dot{Q}_{V1} = 200 \text{ dm}^3/\text{min}$  oraz b)  $\dot{Q}_{V1} = 280 \text{ dm}^3/\text{min}$



Rys. 11. Rozkład ciśnienia w płaszczyźnie przekroju kanału zasilającego i wypływowego filtra w filtrze paliwa dla: a)  $\dot{Q}_{V1} = 200 \text{ dm}^3/\text{min}$  oraz b)  $\dot{Q}_{V1} = 280 \text{ dm}^3/\text{min}$

Na podstawie wyznaczonego w środowisku oprogramowania Solidworks Flow Simulation rozkładu prędkości strumienia przepływającego paliwa w płaszczyźnie przekroju danego kanału przepływowego (rys. 10) wyznaczono natężenia przepływu paliwa w kanale zasilającym silnik (za filtrem)  $\dot{Q}_{V2}$  i w szczelinie pomiędzy pokrywą a gardzielą filtra  $\dot{Q}_{V3}$ . Wyniki szacowania symulacyjnego natężenia przepływu paliwa w kanale zasilającym silnik (za filtrem)  $\dot{Q}_{V2}$  i w szczelinie pomiędzy pokrywą a gardzielą filtra  $\dot{Q}_{V3}$ , w filtrze paliwa z otwartą pokrywą o wysokości szczeliny 10 mm i stanowiskowych badań eksperymentalnych dla natężenia przepływu paliwa w kanale zasilającym o wartościach 200 dm<sup>3</sup>/min i 280 dm<sup>3</sup>/min zestawiono w tabeli 2.

**Tabela 2****Wyniki badań symulacyjnych i stanowiskowych badań eksperymentalnych**

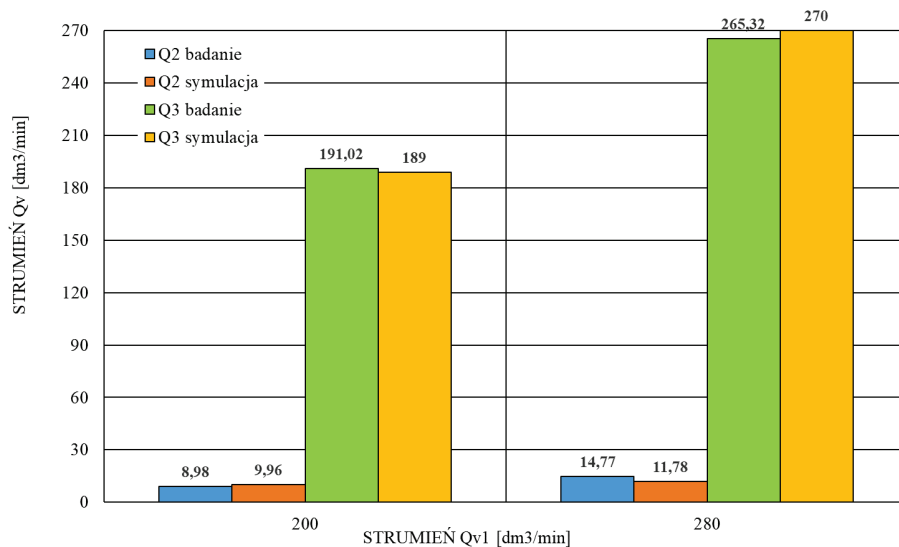
Parametr	Natężenie przepływu paliwa w kanale zasilania filtra			
	200 dm <sup>3</sup> /min		280 dm <sup>3</sup> /min	
	symulacja	eksperyment	symulacja	eksperyment
Ciśnienie w kanale zasilania $p_1$ [Pa]	103957,3	103225	105544,9	105320
Natężenie przepływu paliwa w kanale zasilania silnika $\dot{Q}_{V2}$ [dm <sup>3</sup> /min]	8,98	9,96	14,77	11,78
Natężenie przepływu paliwa (upustu) $\dot{Q}_{V3} = (\dot{Q}_{V1} - \dot{Q}_{V2})$ [dm <sup>3</sup> /min]	191,02	189	265,23	270
Stosunek natężeń przepływu paliwa $\dot{Q}_{V2}/\dot{Q}_{V1}$ [%]	4,45	4,98	5,23	4,21
Stosunek natężeń przepływu paliwa $\dot{Q}_{V3}/\dot{Q}_{V1}$ [%]	95,55	94,50	94,77	96,43

Na rys. 12 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i stanowiskowych badań eksperymentalnych wartości natężenia przepływu  $\dot{Q}_{V2}$  i  $\dot{Q}_{V3}$  w funkcji natężenia przepływu zasilającego  $\dot{Q}_{V1}$ , dla natężenia przepływu paliwa w kanale zasilającym o wartościach 200 dm<sup>3</sup>/min i 280 dm<sup>3</sup>/min. Na rys. 13 przedstawiono zestawienie stosunków natężenia przepływu  $\dot{Q}_{V2}/\dot{Q}_{V1}$  i  $\dot{Q}_{V3}/\dot{Q}_{V1}$  w funkcji natężenia przepływu zasilającego  $\dot{Q}_{V1}$ .

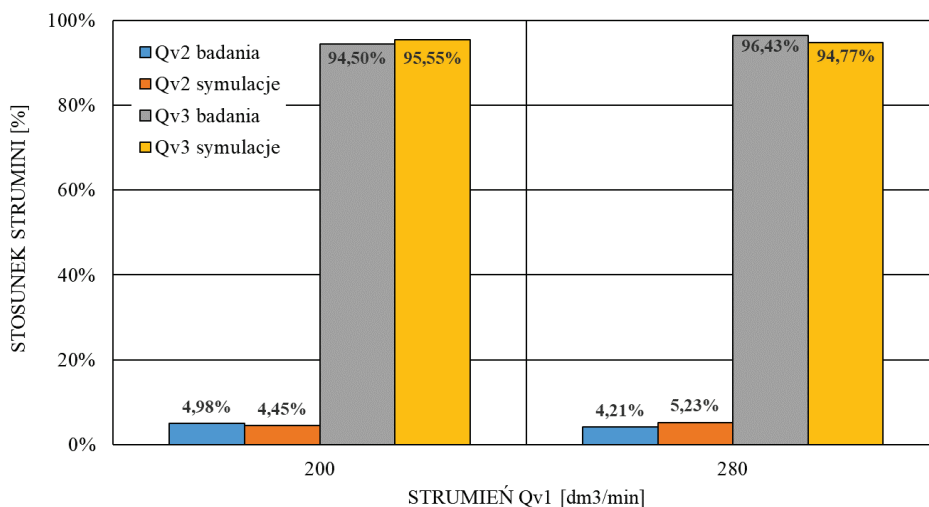
Z analizy danych z eksperymentalnych badań stanowiskowych i badań symulacyjnych wynika, że natężenie przepływu paliwa w kanale zasilania silnika po otwarciu pokrywy filtra wynosi odpowiednio, dla natężenia przepływu paliwa w kanale zasilającym 200 dm<sup>3</sup>/min i 280 dm<sup>3</sup>/min, ok. 9 dm<sup>3</sup>/min i 12 dm<sup>3</sup>/min. Różnica wyników obliczeń numerycznych z wartościami pomiarów stanowiskowych natężenia przepływu, przy rozszczelnieniu filtra do otoczenia, jest na poziomie 17%. Dynamiczne otwarcie pokrywy filtra powoduje stały co do wartości przepływ paliwa w kanale zasilania silnika (za filtrem). Stosunek natężenia przepływu w kanale silnika do natężenia przepływu w kanale zasilania filtra  $\dot{Q}_{V2}/\dot{Q}_{V1}$ , w badaniu dynamicznym tuż po otwarciu pokrywy, wynosi 1:20. Wielkość



natężenia przepływu przez szczelinę pomiędzy pokrywą a gardzielą filtra (upust paliwa do otoczenia) wynosi ok. 95% w odniesieniu do wartości strumienia zasilającego.



Rys. 12. Zestawienie wartości strumieni  $\dot{Q}_{V2}$  i  $\dot{Q}_{V3}$  w funkcji strumienia zasilającego  $\dot{Q}_{V1}$  dla wyników badań symulacyjnych i badań stanowiskowych



Rys. 13. Zestawienie stosunków strumieni  $\dot{Q}_{V2}/\dot{Q}_{V1}$  i  $\dot{Q}_{V3}/\dot{Q}_{V1}$  w funkcji strumienia zasilającego  $\dot{Q}_{V1}$

## **5. Podsumowanie**

Badania symulacyjne z wykorzystaniem środowiska Solidworks i eksperymentalne badania stanowiskowe umożliwiają szacowanie natężenia przepływu paliwa na wyjściu z filtra, w kanale zasilania silnika lotniczego, przy jego rozszczelnieniu do otoczenia. Do opisu zjawisk przepływowych w kanałach dopływowych i odpływowych filtra paliwowego przy jego rozszczelnieniu do otoczenia wykorzystano metodę komputerowego modelowania CFD zweryfikowaną badaniami eksperymentalnymi.

Badania symulacyjne przepływu paliwa zostały przeprowadzone w środowisku Solidworks 2019 z wykorzystaniem dedykowanego modułu „Flow Simulation”. Opierając się na trójwymiarowym modelu geometrycznym rzeczywistego filtra paliwowego utworzonym w aplikacji Solidworks, dokonano symulacji rozkładu prędkości przepływu na wyjściu z filtra paliwowego oraz do otoczenia przez szczelinę utworzoną przez otwartą pokrywę filtra z wykorzystaniem wewnętrznego algorytmu oprogramowania środowiska Flow Simulation. Przeprowadzona symulacja pozwoliła uzyskać informacje o rozkładach prędkości i ciśnienia przepływającego paliwa w kanałach dopływowych i odpływowych filtra paliwowego i na ich podstawie określić natężenie przepływu w tych kanałach. Do określenia natężenia przepływu paliwa w eksperymentalnych badaniach stanowiskowych wykorzystano przepływomierze ultradźwiękowe zabudowane w stanowisku badawczym.

Wykorzystanie oprogramowania bazującego na metodzie CFD wspartego stanowiskowymi badaniami eksperymentalnymi pozwala na uzyskanie wiarygodnych wartości charakteryzujących przepływ paliwa przez filtr paliwowy z otwartą pokrywą bez konieczności przeprowadzania badań i pomiarów na rzeczywistym obiekcie. Oszacowane natężenie przepływu paliwa w kanale zasilania silnika, przy natężeniu przepływu paliwa w kanale zasilania filtra o wartości  $200 \text{ dm}^3/\text{min}$  wynosi  $8,98 \text{ dm}^3/\text{min}$ , a zmierzone na stanowisku badawczym  $9,96 \text{ dm}^3/\text{min}$ . Oszacowane natężenie przepływu paliwa w kanale zasilania silnika, przy natężeniu przepływu paliwa w kanale zasilania filtra o wartości  $280 \text{ dm}^3/\text{min}$  wynosi  $14,77 \text{ dm}^3/\text{min}$ , a zmierzone na stanowisku badawczym  $11,78 \text{ dm}^3/\text{min}$ . Oszacowane natężenie przepływu paliwa przez szczelinę utworzoną przez otwartą pokrywę filtra, przy natężeniu przepływu paliwa w kanale zasilania filtra o wartości  $200 \text{ dm}^3/\text{min}$  wynosi  $191 \text{ dm}^3/\text{min}$ , a zmierzone na stanowisku badawczym  $918 \text{ dm}^3/\text{min}$ . Oszacowane natężenie przepływu paliwa przez szczelinę utworzoną przez otwartą pokrywę filtra, przy natężeniu przepływu paliwa w kanale zasilania filtra o wartości  $280 \text{ dm}^3/\text{min}$  wynosi  $265 \text{ dm}^3/\text{min}$ , a zmierzone na stanowisku badawczym  $270 \text{ dm}^3/\text{min}$ . Różnica wyników obliczeń numerycznych z wartościami pomiarów stanowiskowych natężenia przepływu w filtrze, przy jego rozszczelnieniu do otoczenia, jest na poziomie 17%.

Na podstawie analizy wyników symulacji i eksperymentalnych badań stanowiskowych można uznać, że model symulacyjny spełnia swoje zadanie. Może zostać użyty również do oceny nieszczelności układów płynowych w warunkach trudno weryfikowalnych doświadczalnie.

Szacowanie parametrów przepływu metodą CFD jest tańsze oraz wymaga znacznie mniejszego nakładu czasu i środków finansowych w stosunku do klasycznej metody stanowiskowych badań doświadczalnych.

## 6. Literatura

1. Balac M., Grbovic A., Petrovic A., Popovic V.: FEM analysis of pressure vessel with an investigation of crack growth on cylindrical surface. *Maintenance and Reliability* 2018, 20 (3), 378–386. <http://dx.doi.org/10.17531/ein.2018.3>.
2. Baranowski P., Damaziak K., Małachowski J.: Brake system studies using numerical methods. *Maintenance and Reliability* 2013, 15 (4), 337–342.
3. Behbani-Pour M.J., Radice G.: Leak Detection on Large Transport Airplanes. *Journal of Aeronautics & Aerospace Engineering* 2016, 5 (4), 1-10.
4. Feyzullahoğlu E. Abrasive wear, thermal and viscoelastic behaviors of rubber seal materials used in different working conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology* 2015, 229 (1), 64-73.
5. Guzman L., Chen Y., Landry H.: Coupled CFD-DEM Simulation of Seed Flow in an Air Seeder Distributor Tube. *Processes* 2020, 8 (12), 1597.
6. Hamid M.F., Idroas M.Y., Mohamed M., Sa'ad S., Yew Heng T., Che Mat S., Miskam M.A., Abdullah M.K.: Numerical Investigation of the Characteristics of the In-Cylinder Air Flow in a Compression-Ignition Engine for the Application of Emulsified Biofuels. *Processes* 2020, 8 (11), 1517. <https://doi.org/10.3390/pr8111517>.
7. He Q., Xu Z., Li A., Wang J., Zhang J., Zhang Y.: Study on hydrophobic properties of fluororubber prepared by template method under high temperature conditions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 2021, 612, 125837.
8. Jayanti S.: *Computational Fluid Dynamics for Engineers and Scientists*. Springer Verlag, Dordrecht, The Netherlands, 2018, ISBN 978-94-024-1215-4 ISBN 978-94-024-1217-8 (eBook). <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1217-8>.
9. Junhong Z., Weidong L., Jiewei L., Yongbo Q., Yi Y., Tianyi Z.: Failure analysis of a high-pressure fuel pipe of engine. *Engineering Failure Analysis* 2019, 103, 70–81. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.04.040>.
10. Lasek M., Sibilski K., Żurek J.: Aviation accidents aetiology from catastrophe theory point of view. *Proceedings of the 27th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS 2010), Nice, France, 19–24 September 2010; ICAS 2010-707TP*. ISBN 978-0-9565333-0-2. Available online: [http://www.icas.org/ICAS\\_ARCHIVE/ICAS2010/ABSTRACTS/707.HTM](http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2010/ABSTRACTS/707.HTM) (accessed on 23 January 2020).
11. Lichota P., Jacewicz M., Szulczyk J.: Spinning gasodynamic projectile system identification experiment design. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* 2020, 92 (3), 452 – 459. doi: 10.1108/AEAT-06-2019-0124.
12. Lisowski F., Panek M.: CFD modeling of vane pump vanes operation. *Maintenance and Reliability* 2004, 22 (2), 36–41.

13. Marzuoli A., Boidot E., Feron E., Paul van Erp B.C., Ucko A., Bayen A. and Hansen M.: Multimodal Impact Analysis of an Airside Catastrophic Event: A Case Study of the Asiana Crash. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems* 2016, 17 (2), 587-604.
14. Mohan A., Poobal S.: Crack detection using image processing: A critical review and analysis. *Alexandria Engineering Journal* 2018, 57 (2), 787-798.
15. Szczepaniak P., Jastrzebski G., Sibilski K., Bartosiewicz A.: The study of aircraft accidents causes by computer simulations. *Aerospace* 2020, 7 (4), 41.
16. Yu C, Xue X, Shi K, Shao M, Liu Y. Comparative Study on CFD Turbulence Models for the Flow Field in Air Cooled Radiator. *Processes* 2020, 8 (12), 1687. <https://doi.org/10.3390/pr8121687>.
17. Zeng, Y.; Luo, R. Numerical Analysis of Incompressible Flow Leakage in Short Pipes. *Journal of Applied Fluid Mechanics* 2019, 12 (2), 485 - 494. DOI: 10.29252/jafm.12.02.28612.
18. Technical Reference Solidworks Flow Simulation. Dassault Systemes SolidWorks Corporation, Waltham, MA02451 U.S.A., 2019. <https://docplayer.net/124197062-Solidworks-solidworks-flow-simulation-dassault-systemes-solidworks-corporation-175-wyman-street-waltham-ma-u-s-a.html>.