dr inż. Tomasz Adamiak[1)*)]
ORCID: 0000-0001-9812-9782
mgr inż. Tomasz Chmurski[1)]

Effect of self-drilling screws on the airtightness of circular ventilation ducts

Wpływ wkrętów samogwintujących na szczelność przewodów wentylacyjnych o przekroju kołowym

DOI: 10.15199/33.2026.10.01

Abstract. This paper presents the effect of self-drilling screws on the airtightness of ventilation ducts operating under both positive and negative pressure. The leakage associated with these screws increased significantly with successive disassembly and reassembly cycles. For instance, at a positive pressure of 250 Pa, the use of one screw resulted in a leakage rate of 0.0043 m^3/h, increasing to 0.0090 m^3/h after successive disassembly and reassembly cycles. At the same negative pressure, the corresponding leakage rate increased from 0.0037 to 0.0080 m^3/h. Thread stripping in the duct wall was observed during installation, resulting in reduced mechanical strength of the joints. Already during the first installation, 22 threads were stripped. Each subsequent installation further intensified this effect, reaching 99 stripped threads during the fifth installation, which accounted for 88.4% of all connections. The study demonstrated that this type of connection is unsuitable for locations where disassembly is required, for example, removal of a ventilation fitting to inspect the internal cleanliness of the system or to gain access for cleaning. The effectiveness of self-adhesive aluminium tape as an additional sealing element was also confirmed.

Keywords: ductwork airtightness; ventilation; self-drilling screw.

Streszczenie. W artykule przedstawiono wpływ wkrętów samogwintujących na szczelność przewodów wentylacyjnych pracujących z nad- i podciśnieniem. Przeciek nimi wywołany znacznie zwiększał się wraz z kolejnymi procesami demontażu i montażu, np. w przypadku nadciśnienia 250 Pa użycie jednego wkrętu wywołało przeciek wynoszący 0,0043 m^3/h, zwiększając się po kolejnych demontażach i montażach do 0,0090 m^3/h. W przypadku takiej samej wartości podciśnienia relacja ta zmieniała się od 0,0037 do 0,0080 m^3/h. Podczas montażu stwierdzono zrywanie gwintów w ściance przewodu, co ogranicza wytrzymałość mechaniczną połączeń. Już podczas pierwszego montażu „zerwano" 22 gwinty. Każdy kolejny montaż pogłębiał to zjawisko, które przy 5. montażu osiągnęło wartość 99 szt. – 88,4% wszystkich połączeń. Wykazano nieprzydatność tego rodzaju połączeń w miejscach, gdzie jest wymagany demontaż, np. demontaż złączki wentylacyjnej w celu diagnostyki czystości wnętrza instalacji lub dostępu do jej czyszczenia. Potwierdzono skuteczność taśmy samoprzylepnej jako elementu doszczelniającego połączenia.

Słowa kluczowe: szczelność przewodów; wentylacja; wkręt samogwintujący.

Mechanical ventilation systems have become standard in public, industrial, and warehouse buildings and are increasingly common in residential buildings. An indispensable component of such systems is the ductwork that conveys air between the outdoor environment and the rooms served. Because positive or negative pressure is present in the ducts, these systems are a potential source of energy losses arising not only from pressure losses caused by airflow and heat transfer through the duct walls, but also from leakage of conditioned and filtered air. These losses are particularly costly when the air is cooled and dehumidified. The currently observed rise in outdoor air temperatures, combined with increasing expectations regarding indoor thermal comfort, suggests that these functions will become standard air-treatment processes across all climatic zones. Consequently, due consideration should be given to the airtightness of ductwork systems throughout the design, installation, and operational stages.

Instalacje wentylacji mechanicznej stały się standardem w obiektach: użyteczności publicznej, przemysłowych i magazynowych. Są także coraz popularniejsze w budynkach mieszkalnych. Ich nieodłącznym elementem są przewody transportujące powietrze między środowiskiem zewnętrznym a obsługiwanymi pomieszczeniami. Ze względu na panujące w przewodach nad- lub podciśnienie są potencjalnym źródłem strat energetycznych pochodzących nie tylko od strat ciśnienia wywołanego przepływem powietrza i przenikaniem ciepła przez ich ścianki, ale także z powodu przecieku uzdatnionego i oczyszczonego powietrza. Ubytki te są szczególnie kosztowne, gdy powietrze jest chłodzone i osuszane. Obserwowany obecnie wzrost temperatury zewnętrznej, rosnące oczekiwania dotyczące komfortu cieplnego w pomieszczeniach wskazują, że te funkcje staną się typowymi procesami obróbki powietrza we wszelkich strefach klimatycznych, stąd konieczność zwracania uwagi na szczelność instalacji na etapie projektowania, montażu i w trakcie eksploatacji. Nie należy zapominać, że badanie szczelności podczas odbiorów instalacji jest dość kłopotliwym zadaniem, szczególnie w rozległych instalacjach i z przewodami o przekrojach prosto-

[1)] Politechnika Łódzka, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska
[*)] Correspondence address: tomasz.adamiak@p.lodz.pl

Airtightness testing during system commissioning is a relatively troublesome task, especially in extensive installations and in systems with rectangular ducts. Identifying and removing detected leaks may be both capital- and time-intensive and requires experienced and reliable personnel. Furthermore, the airtightness of ductwork systems may deteriorate over time owing to leakage paths arising from duct cleaning operations, vibrations transmitted throughout the system, and ageing- and fatigue-related degradation of the materials employed. In the case of significant leakage, the basic function of ventilation and air-conditioning systems is also at risk, namely the controlled air exchange in rooms at the rate specified in the design. If the measured leakage is compensated for by increasing the rotational speed of a fan that was originally selected assuming no leakage and optimised for the system operating point, this entails an increase in fan power and, consequently, a permanent increase in operating costs.

When analysing the issue of system airtightness, aspects related to the operational safety of buildings must not be overlooked. Leaky systems may pose a hazard in the event of leakage of air contaminated with hazardous substances as well as during a fire. Escaping air may damage thermal and moisture insulation applied to the external surface of ducts. The influence of leakage on acoustic emission from the installation into rooms is also insufficiently investigated and potentially significant.

This paper presents the effect of using self-tapping screws with ST 4.2 threads on air leakage through a circular ventilation duct Ø200 under positive and negative pressure. The tests covered primary leakage associated with screw installation and secondary leakage resulting from repeated disassembly and reassembly in the same holes. In addition to leakage, the potential reduction in joint load-bearing capacity caused by thread stripping during screw installation and removal was also evaluated.

Circular ventilation ducts

Ventilation ducts are divided, according to cross-sectional shape, into two main categories: circular and rectangular. One of the principal advantages of circular ducts is the availability of convenient joining methods. Flanged joints are the most versatile. Flanges mounted on the ends of ducts and fittings are tightened with bolts or clamps uniformly distributed around the circumference. Such a connection provides high strength and separability; however, it is time-consuming to assemble, increases the external diameter and heat losses, and requires parallel flange faces.Sleeve joints are considerably easier to install. Installation work is limited to cutting a prefabricated duct – usually a spiral duct – to the required length, inserting the plain end of the fitting, mechanically fastening the joint, and, if necessary, additionally sealing it by wrapping it with self-adhesive polymer or aluminium tape.

It should be emphasised that in both systems components are required to connect flanges with ducts in flanged joints, or spiral ducts with fittings in sleeve-joint systems. These comkątnych. Identyfikacja i usunięcie wykrytych nieszczelności mogą być kapitało- i czasochłonne oraz wymagają doświadczonego i rzetelnego personelu. Dodatkowo, z upływem czasu mogą pojawić się nieszczelności spowodowane np. czyszczeniem przewodów, drganiami przenoszonymi instalacją i zmian starzeniowo-zmęczeniowych użytych materiałów. W przypadku znacznych przecieków zagrożona jest podstawowa funkcja wentylacji i klimatyzacji – kontrolowana i określona w projekcie wymiana powietrza w pomieszczeniach. Jeśli stwierdzony przeciek zostanie skorygowany przez zwiększenie prędkości obrotowej wentylatora, pierwotnie dobranego przy założeniu braku przecieku i zoptymalizowanego do punktu pracy instalacji, oznaczać to będzie zwiększenie jego mocy, czego konsekwencją jest trwały wzrost kosztów eksploatacyjnych.

Analizując zagadnienie szczelności instalacji, nie wolno także pominąć aspektów związanych z bezpieczeństwem eksploatacji obiektów budowlanych. Nieszczelne instalacje mogą stanowić zagrożenie w przypadku wycieku zanieczyszczonego substancjami niebezpiecznymi powietrza oraz podczas pożaru. Wypływające powietrze może spowodować uszkodzenie izolacji termicznych i przeciwwilgociowych nałożonych na zewnętrznej powierzchni przewodów. Mało zbadany, i potencjalnie groźny, jest także wpływ nieszczelności na emisję akustyczną z instalacji do pomieszczeń.

W artykule przedstawiono wpływ stosowania samogwintujących wkrętów z gwintem ST 4,2 na przeciek powietrza (nieszczelność) przez przewód wentylacyjny o przekroju kołowym Ø200 wywołany nad- i podciśnieniem. Badania obejmowały przeciek pierwotny związany z montażem wkrętów, oraz wtórny wynikający z ich ponownego, wielokrotnego demontażu i montażu. Oprócz przecieku oceniono potencjalne zmniejszenie nośności połączeń, wynikające ze zrywania gwintu podczas montażu i demontażu wkrętów.

Przewody wentylacyjne o przekroju kołowym

Przewody wentylacyjne dzielą się ze względu na kształt przekroju poprzecznego na dwie główne kategorie: o przekroju kołowym lub prostokątnym. Do podstawowych zalet przewodów o przekroju kołowym należy zaliczyć wygodne metody łączenia. Najwszechstronniejszymi są połączenia kołnierzowe, gdzie kołnierze osadzone na końcach przewodów i złączek ściąga się równomiernie rozłożonymi na obwodzie śrubami lub zaciskami. Połączenie takie zapewnia dużą wytrzymałość, rozłączność, jest jednak czasochłonne w wykonaniu, zwiększa średnicę zewnętrzną, straty ciepła i wymaga równoległości powierzchni czołowych kołnierzy. Znacznie łatwiejsze w montażu są połączenia wsuwkowe. Zakres prac montażowych ogranicza się do przycięcia na żądaną długość prefabrykowanego przewodu, przeważnie typu spiro, wsunięcia bosej końcówki kształtki, mechanicznego unieruchomienia połączenia i ewentualnego doszczelnienia przez owinięcie samoprzylepną taśmą polimerową lub aluminiową.

Należy podkreślić, że w obydwu systemach niezbędne są elementy łączące kołnierze z przewodami (w przypadku połączeń kołnierzowych lub przewodów spiro z kształtkami w systemie wsuwkowym). Przeważnie są to blachowkręty lub nity

ponents are usually sheet-metal screws or blind rivets. Their use disrupts the continuity of the duct wall and constitutes a potential source of leakage.

The use of self-tapping screws is possible due to the materials used in ventilation duct fabrication. Galvanised non-alloy steel is predominant. In typical environments characterised by low aggressiveness, guidelines [1, 2] recommend the use of steels compliant with EN 10346 [3]. A commonly used grade is DX51D. This is a low-carbon steel ($C_{m/m} \leq 0.18\%$). Its plastic and strength properties ($R_m = 270–500$ MPa; $A_{80min} = 22\%$) enable ducts and fittings to be produced by cold forming and joined by welding [4]. Its relatively low strength and high ductility make it easy to drill and tap holes in sheets made of this steel grade.

Airtightness of air-conditioning systems

At present, the main focus of researchers and practitioners is the testing of complete installations or larger parts of them. This approach is understandable. It provides a qualitative view of the technologies applied, the level of technical workmanship, and finally – and most importantly – the suitability of the tested installation for operation. Unfortunately, it limits the possibility of assessing the sources of leakage and their relative importance. A broad discussion of this problem, based on a dozen or so articles, is presented in [5]. That study points to the tendency to underestimate this phenomenon. For example, most installations tested in France did not meet even the minimum airtightness class A. Reducing leakage in an installation may reduce fan energy consumption by 30 to 75%. An analysis conducted in the United States in 2005 showed that 10 to 30% of the air treated in air-handling units escapes through leaks. Reference [6] reports that air leakage results in an increase in energy consumption from 8 to 38 kWh per 1 L/s of outdoor airflow. There is much less information on the influence of specific technical solutions. In [7], the author indicated risks to system airtightness associated with the use of blind rivets and screws with a drill point wider than the thread core diameter, but without providing a quantitative assessment. The use of sharp-pointed screws was recommended. Both rivets and screws were regarded as components ensuring joint durability.

System airtightness is influenced, among other factors, by the airtightness of ducts, fittings, seals, loads imposed on the installation by external forces, and the methods used to connect system components. The last of these factors is intensified by risks associated with installation conditions on construction sites. Understanding the sources of leakage and quantifying their effect on total leakage makes it possible to identify critical system defects whose elimination can readily improve quality. This approach has an additional advantage: sealing a system that does not meet the requirements is difficult, and sometimes impossible.

The consequences of air leakage from HVAC systems are significant; therefore, reasonable efforts should be made to mitigate such leakage. This is emphasised by construction law

zrywane. Ich zastosowanie narusza ciągłość ścian przewodów wentylacyjnych i stanowi potencjalne źródło nieszczelności.

Stosowanie wkrętów samogwintujących możliwe jest dzięki materiałom stosowanym w wykonawstwie przewodów wentylacyjnych. Dominuje stal niestopowa ocynkowana. W typowych, charakteryzujących się małą agresywnością środowiskach, wytyczne [1 i 2] zalecają stosowanie stali zgodnych z EN 10346 [3]. Popularnym gatunkiem jest DX51D, stal niskowęglowa ($C_{m/m} \leq 0{,}18\%$). Jej właściwości plastyczne i wytrzymałościowe ($R_m = 270÷500$ MPa; $A_{80min} = 22\%$) umożliwiają wykonywanie przewodów i kształtek, z zastosowaniem obróbki plastycznej na zimno i łączenia za pomocą zgrzewania [4]. Stosunkowo mała wytrzymałość i duża plastyczność pozwalają, w blachach z tego gatunku stali, na łatwe wiercenie otworów i ich gwintowanie.

Szczelność instalacji klimatyzacyjnych

Obecnie głównym zainteresowaniem naukowców i praktyków jest badanie całych instalacji lub ich dużych fragmentów. Takie podejście jest zrozumiałe. Daje jakościowy pogląd o stosowanych technologiach, poziomie kultury technicznej wykonawców i co najważniejsze, zdatności badanej instalacji do pracy. Niestety ogranicza możliwość oceny źródeł nieszczelności i ich wagi. Szerokie omówienie problemu, na podstawie kilkunastu artykułów, przedstawiono w opracowaniu [5]. Wskazano w nim na lekceważenie tego zjawiska, np. większość przebadanych we Francji instalacji nie spełnia minimalnej klasy szczelności A. Zmniejszenie przecieku w instalacji może ograniczyć zużycie energii przez wentylator o 30÷75%. Przeprowadzona w 2005 r. w USA analiza wykazała, że 10÷30% obrobionego w centralach klimatyzacyjnych powietrza ucieka przez nieszczelności. W [6] podano, że w związku z przeciekami powietrza następuje zwiększenie energii z 8 do 38 kWh na 1 l/s powietrza zewnętrznego. Informacji na temat wpływu szczegółowych rozwiązań technicznych jest znacznie mniej. W artykule [7] autor wskazał na zagrożenia dotyczące szczelności instalacji związane ze stosowaniem nitów zrywanych i wkrętów z końcówką wiercącą o szerokości większej od średnicy rdzenia gwintu, jednak bez ich oceny ilościowej. Polecał stosowanie wkrętów ostro zakończonych. Zarówno nity, jak i wkręty uznał za elementy zapewniające trwałość połączenia.

Na szczelność instalacji wpływają m.in.: szczelność przewodów, kształtek, uszczelnień, obciążenie instalacji siłami zewnętrznymi i metody łączenia elementów instalacji. Ten ostatni czynnik spotęgowany jest przez zagrożenia związane z warunkami montażu na placu budowy. Poznanie źródeł nieszczelności i ich ilościowy wpływ na całkowity przeciek pozwala wykryć krytyczne wady systemów, których wyeliminowanie pozwala na łatwe poprawienie ich jakości. Takie podejście ma dodatkową zaletę, ponieważ doszczelnienie instalacji niespełniającej wymagań jest trudne lub wręcz niemożliwe.

Konsekwencje nieszczelności instalacji są poważne i należy dążyć do ich racjonalnego ograniczania. Zwracają uwagę na to przepisy rozporządzenia [8], krajowe oceny techniczne [3]; normy dotyczące projektowania i eksploatacji wentylacji [9] oraz

regulations [8], national technical assessments [3], standards concerning ventilation design and operation [9], and finally guidelines relating to energy and environmental efficiency [10]. Achieving this goal is often hindered by installation problems and by the requirement, imposed by construction law, to inspect the cleanliness of the interior of the system [8]. These factors mean that the required airtightness must characterise not only the installation at handover for use, but also during the planned period of operation, taking into account scheduled maintenance activities.

The method for testing the airtightness of ventilation ducts is described in EN 12237 [11]. It includes procedures for testing both existing installations and manufactured system components as part of factory quality control. In the case of installation testing, the procedure consists of closing all terminal openings of the installation or its section, generating a test positive or negative pressure p_{test} in the tested area, and measuring the air leakage. The test pressure should not be lower than the design operating pressure p_{design}. Because atmospheric air parameters, even in laboratory rooms, vary in terms of pressure and temperature, the measured leakage result is normalised (leakage volume rate of air flow q_{vl}) to reference conditions defined by temperature t = 20 °C and pressure p = 101325 Pa, according to [11]:

$$q_{vl} = q_{vlmeasured} \cdot \frac{293}{273+t} \cdot \frac{p_a}{101\,325}\ [\mathrm{m^3/s}] \qquad (1)$$

where:
$q_{vl,measured}$ – measured air leakage rate [m³/s];
t – air temperature [°C];
p_a – atmospheric pressure [Pa].

In [11], the surface area of the tested installation is adopted as the basic factor characterising leakage; therefore, the air leakage factor, calculated using the following formula, is used as the assessment criterion:

$$f = \frac{q_v}{A_j}\left[\frac{m^3}{s \cdot m^2}\right] \qquad (2)$$

where:
q_v – air leakage rate [m³/s];
A_j – duct surface area [m²].

The air leakage factor calculated in this way is compared with the limit value f_{max}, which should be specified in the installation design documentation. The standard distinguishes five duct airtightness classes; the classification is presented in Table 1.

The values of the air leakage limit f_{max} (Table 1) are described by a power-law function of the form:

$$q = k \cdot p^n \qquad (3)$$

The power-law function is used not only to describe leakage in ventilation ducts, but also in windows and roofs, as well as in the entire building envelope. The power-law function is also used in the Polish standard PN-EN 1507 [12] for ventilation ducts with rectangular cross-sections, and in PN-EN 1751 [13] for ventilation terminal devices and valves.

Table 1. Classification of ductwork systems [11]
Tabela 1. Klasyfikacja sieci przewodów [11]

Air tightness class / Klasa szczelności przewodów	Static pressure limit [Pa] / Wartość graniczna ciśnienia statycznego [Pa]		Air leakage limit f_{max} [m³/(s·m²)] / Wartość graniczna wskaźnika nieszczelności f_{max} [m³/s·m²]
	positive / nadciśnienie	negative / podciśnienie	
A	500	500	$0.27 \cdot p^{0.65} \cdot 10^{-3}$
B	1000	1000	$0.009 \cdot p^{0.65} \cdot 10^{-3}$
C	2000	2000	$0.003 \cdot p^{0.65} \cdot 10^{-3}$
D	2000	2000	$0.001 \cdot p^{0.65} \cdot 10^{-3}$

wytyczne dotyczące efektywności energetycznej i ekologicznej [10]. Utrudnieniem w osiągnięciu tego celu są często spotykane problemy montażowe i wymagana przez rozporządzenie budowlane [8] konieczność kontroli czystości wnętrza instalacji. Czynniki te sprawiają, że wymagana szczelność musi charakteryzować nie tylko instalację w stanie przekazania do użytkowania, ale także podczas planowanego okresu eksploatacji, przy uwzględnieniu przewidzianych prac konserwacyjnych.

Metoda kontroli szczelności przewodów wentylacyjnych jest opisana w normie EN 12237 [11]. Zawarte są w niej procedury badań istniejących instalacji oraz produkowanych elementów instalacji w ramach realizacji zakładowej kontroli jakości. Kontrola instalacji polega na zamknięciu wszystkich zakończeń instalacji lub jej fragmentu, wytworzeniu w badanym obszarze nadciśnienia lub podciśnienia próbnego p_{test} i zmierzeniu przecieku powietrza. Ciśnienie próbne powinno być nie mniejsze niż obliczeniowe ciśnienie robocze p_{design}. Ponieważ parametry powietrza atmosferycznego, nawet w pomieszczeniach laboratoryjnych ulegają zmianie w zakresie ciśnienia i temperatury, wynik zmierzonego przecieku jest normalizowany (przeciek powietrza q_{vl}) do warunków określonych: temperaturą t = 20°C i ciśnieniem p = 101 325 Pa za pomocą wzoru [11]:

$$q_{vl} = q_{vlmeasured} \cdot \frac{293}{273+t} \cdot \frac{p_a}{101\,325}\ [\mathrm{m^3/s}] \qquad (1)$$

gdzie:
$q_{vlmeasured}$ – zmierzony przeciek powietrza [m³/s];
t – temperatura powietrza [°C];
p_a – ciśnienie atmosferyczne [Pa].

W normie [11] przyjęto, że podstawowym czynnikiem charakteryzującym nieszczelność jest powierzchnia badanej instalacji, dlatego jako kryterium oceny przyjęto wskaźnik nieszczelności przewodów obliczany wzorem:

$$f = \frac{q_v}{A_j}\left[\frac{m^3}{s \cdot m^2}\right] \qquad (2)$$

gdzie:
q_v – przeciek powietrza [m³/s];
A_j – pole powierzchni badanego fragmentu instalacji [m²].

Tak obliczony wskaźnik nieszczelności przewodów porównuje się z wartością graniczną f_{max}, która powinna być określona w dokumentacji projektowej instalacji. Norma wyróżnia 5 klas szczelności przewodów o klasyfikacji przedstawionej w tabeli 1.

Wartości graniczne wskaźnika nieszczelności f_{max} (tabela 1) opisano funkcją potęgową w postaci:

$$q = k \cdot p^n \qquad (3)$$

Funkcję potęgową stosuje się nie tylko do opisu nieszczelności w instalacjach wentylacyjnych, ale także w oknach i powło-

lation systems, but also in windows and building envelopes. The flow coefficient k depends on the size of the opening, whereas the flow exponent n describes the nature of the flow. The exponent ranges from 0.5 to 1; a value of 0.5 denotes fully turbulent flow, while the closer the value is to 1, the more laminar the flow becomes [12].

It should be noted that, according to the method presented in [11]:

- normalisation to reference assessment conditions (Eq. 1) does not take the test pressure into account;
- it is assumed that airflow through typical leaks in ventilation-system components is described by a power-law function with a constant exponent $n = 0.65$ and with a flow coefficient that varies between classes.

Description of the test rig and measurement method

The measurement methodology and construction of the test rig, shown in Figure 1 and Photograph 1, were developed by adapting the recommendations contained in EN 12237 [11]. The main difference relative to the standard, resulting from the different leakage source, was that the minimum required surface area of the tested duct specified in the standard as 10 m² was not maintained.

The basic component of the test rig (Figure 1, Photo 1) was a base duct (1), 1013 mm long, cut from a Ø200 ventilation duct with a wall thickness of 0.5 mm. One end of the base duct was closed with a blank end (2). On the other side, a Ø100 measuring duct (4) of sufficient length to enable correct airflow measurement with a vane anemometer (6) was connected to the base duct through a transition fitting (taper). All ventilation components of the rig, i.e. ducts and fittings, complied with EN 1506 [13]. The required pressure and airflow were provided by a centrifugal fan (3) with variable rotational speed, connected to the measuring duct (4) by a flexible metal ventilation duct. The following instruments were used: a manometer (5) measuring pressure in the base duct and used for fan control, a thermometer (7) measuring air temperature in the measuring duct, and, not shown in Figure 1, a barometer and a thermometer measuring air parameters in the laboratory. A detailed list of measuring instruments together with their metrological data is presented in Table 2. The airtightness of the connections between rig components was ensured by using ventilation fittings with lip rubber seals and additionally wrapping the joints with self-adhesive aluminium sealing tape (Photo 1).

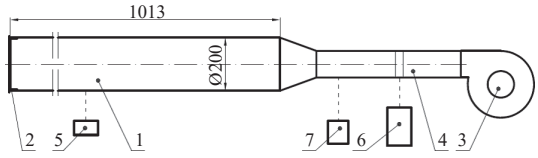


Fig. 1. Schematic diagram of experimental test rig; description in text
Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego; opis w tekście



Photo 1. Experimental test rig
Fot. 1. Stanowisko badawcze

kach budynków. Współczynnik przepływu k jest uzależniony od wielkości otworu, natomiast wykładnik przepływu n określa charakter przepływu. Wykładnik może wynosić 0,5÷1, a wartość 0,5 oznacza przepływ całkowicie turbulentny, zbliżając się do 1, przepływ staje bardziej laminarny [12].

Należy mieć na uwadze, że w metodzie podanej w [11]:

- normalizacja do warunków oceny (wzór 1) nie uwzględnia ciśnienia próbnego;
- przyjmuje się, iż przepływ powietrza przez typowe szczeliny w elementach instalacji wentylacyjnych opisuje funkcja potęgowa o stałym stopniu $n = 0,65$ i zmiennym dla poszczególnych klas współczynniku przepływu.

Opis stanowiska badawczego i metody pomiarowej

Metoda pomiarowa i konstrukcja stanowiska badawczego, przedstawiona na rysunku 1 i fotografii 1, powstały z adaptacji zaleceń zawartych w normie EN 12237 [11]. Główną różnicą w stosunku do normy, wynikającą z innego źródła nieszczelności, było niedotrzymanie wymaganej minimalnej powierzchni badanego przewodu określonej w normie na 10 m².

Podstawowym elementem stanowiska badawczego (rysunek 1, fotografia 1) był przewód bazowy (1) o długości 1013 mm odcięty z przewodu wentylacyjnego Ø200 o grubości ścianki 0,5 mm. Końcówka przewodu bazowego została zamknięta zaślepką (2). Z drugiej strony do przewodu bazowego podłączono, poprzez kształtkę przejściową (redukcję), przewód pomiarowy Ø100 (4) o długości umożliwiającej poprawny pomiar strumienia powietrza za pomocą anemometru skrzydełkowego (6). Wszystkie elementy wentylacyjne stanowiska, tj. przewody i złączki, spełniały standardy EN 1506 [13]. Wymagane ciśnienie oraz przepływ powietrza zapewniał wentylator promieniowy (3) o zmiennej prędkości obrotowej podłączony do przewodu pomiarowego (4) elastycznym metalowym przewodem wentylacyjnym. Do pomiarów wykorzystano następujące przyrządy: manometr (5) mierzący ciśnienie w przewodzie bazowym i służący do sterowania wentylatora, termometr (7) mierzący temperaturę powietrza w przewodzie pomiarowym oraz niepokazane na rysunku 1: barometr i termometr mierzące parametry powietrza w laboratorium. Szczegółowe zestawienie przyrządów pomiarowych wraz z ich danymi metrologicznymi przedstawiono w tabeli 2. Szczelność połączeń elementów stanowiska zapewniono przez zastosowanie złączek wentylacyjnych z wargowymi uszczelkami kauczukowymi i dodatkowe owinięcie połączeń samoprzylepną aluminiową taśmą uszczelniającą (fotografia 1).

Self-tapping screws (Photo 2) with ST 4.2 threads compliant with EN ISO 1478 [14] were used in the tests. The screws were driven into the base duct using a cordless drill-driver with adjustable torque, in four rows of 28 screws (Photo. 3), giving a total of 112 screws. To maintain repeatable installation conditions, the drill-driver was set to a constant torque. The torque value was determined during preliminary screw-in-sertion tests performed on a duct identical to the tested one. The positions of the screw heads after the "first installation" were marked with lines (Photo. 3). The number of screws resulted from the metrological properties of the measuring instruments used and also limited random errors associated with dimensional and material tolerances of the duct and screws. The screws were evenly distributed in the space between the sheet-metal seams (Photo. 3), at a distance of approximately 24 mm from one another and from the seam edges. The distance between rows was approximately 80 mm.

Table 2. Parameters of the measuring instruments used
Tabela 2. Parametry użytych przyrządów pomiarowych

No. in Fig. 1 / Nr na rys. 1	Name and type / Nazwa i typ	Measuring range / Zakres pomiarowy	Accuracy / Dokładność
5	TESTO 510 manometer / Manometr TESTO 510	1.01÷100 hPa	10 Pa +1,5% read value / 10 Pa +1,5% odczytanej wartości
6	IMG PAN µAS vane anemometer (Ø 16 mm probe) / Anemometr skrzydełkowy IMG PAN µAS (Sonda Φ 16 mm)	0.5÷20 m/s	±0,5%
7	DT-34 thermometer / Termometr DT-34	–100÷270°C	±0,1°C
–	Mercury barometer / Barometr rtęciowy	705÷795 mmHg	0,5 mmHg
–	Liquid-in-glass thermometer / Termometr cieczowy	0÷50°C	±0,2°C

Do badań użyto wkrętów wiercąco-gwintujących (fotografia 2) o gwincie ST 4,2 zgodnym z normą EN ISO 1478 [14], które wkręcono w przewód bazowy za pomocą wiertarko-wkrętarki akumulatorowej z regulowanym momentem obrotowym w czterech rzędach po 28 sztuk (fotografia 3), co dało sumarycznie 112 wkrętów. Aby zachować powtarzalność warunków montażu, wiertarko-wkrętarka została ustawiona na stały moment obrotowy. Wartość momentu ustalono podczas prób wkręcania wkrętów w przewód identyczny z badanym. Położenie łbów wkrętów ustalone po pierwszym montażu zaznaczono kreskami na fotografii 3. Liczba wkrętów wynikała z właściwości metrologicznych użytych przyrządów pomiarowych i pozwalała ograniczyć przypadkowe błędy związane z tolerancjami wymiarowymi i materiałowymi przewodu oraz wkrętów. Wkręty rozmieszczono równomiernie w przestrzeni między zamkami blacharskimi w odległości 24 mm od siebie i od krawędzi zamków. Odległość między rzędami wyniosła ok. 80 mm.

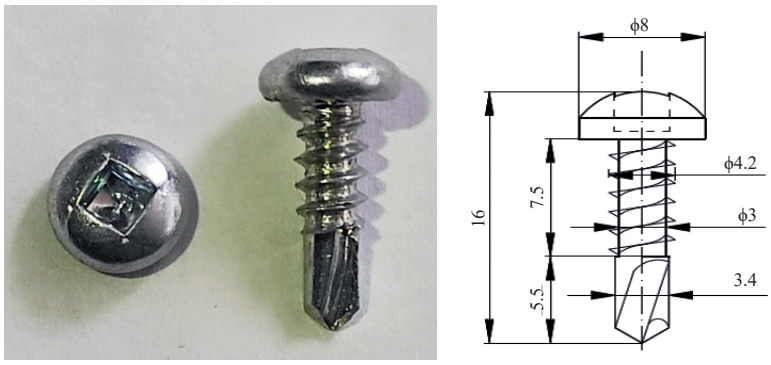


Photo. 2. Geometry and dimensions of the self-drilling screws tested
Fot. 2. Wygląd i wymiary badanych wkrętów

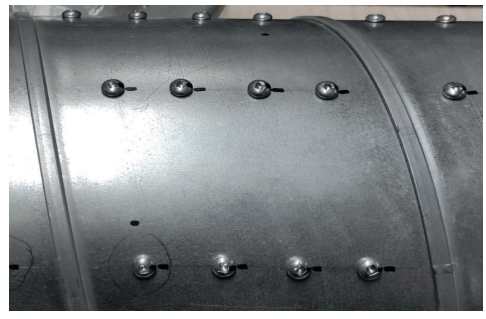


Photo 3. Distribution of self-drilling screws over the surface of the base duct; three rows are visible
Fot. 3. Rozmieszczenie wkrętów na powierzchni przewodu bazowego; widoczne trzy rzędy

Test procedure

The tests consisted in measuring air leakage rate (volumetric flow rate) through leaks formed as a result of driving ST 4.2 self-tapping screws into the sheet metal of a ventilation duct. Leakage was measured in the range from 250 to 2000 Pa, for both positive and negative pressure in the base duct. The test pressure was obtained by changing, using a frequency converter, the rotational speed of the electric motor driving the fan. After pressure stabilisation, measurements were repeated three times (three series). Each series

Przebieg badań

Badania polegały na pomiarze przecieku powietrza (strumienia objętościowego) przez nieszczelności powstałe w wyniku wkręcenia w blachę przewodu wentylacyjnego wkrętów samogwintujących o gwincie ST 4,2. Przeciek był mierzony w zakresie 250÷2000 Pa zarówno w przypadku nadciśnienia, jak i podciśnienia panującego w przewodzie bazowym. Ciśnienie badawcze uzyskiwano, zmieniając, za pomocą przekształtnika częstotliwości, prędkość obrotową silnika elektrycznego napędzającego wentylator. Po ustaleniu ciśnienia pomiary powtarza-

was preceded by a "pressure pulse", consisting in a step change generating a positive/negative pressure of 2000 Pa in the test rig. The actual tests were then carried out starting from 250 Pa, gradually increasing the pressure in 250 Pa steps up to 2000 Pa, and, after reaching this maximum, returning stepwise to 250 Pa. The following quantities necessary to determine leakage were recorded: the air velocity through the anemometer probe (w), pressure (p_{test}) and temperature (t) in the base duct, as well as barometric pressure (p_a) and ambient temperature (t_e). Measurements were taken after approximately 30 seconds, i.e. after the time at which measurement conditions were found to stabilise. The volumetric flow rate was calculated from the measured mean (90-second) air velocity through the anemometer measuring probe.

The study was divided into seven stages:

1 – Determination of the primary leakage of the test rig before screw installation, hereafter referred to as the "baseline measurement". The results of this stage were subtracted when processing the data.

2 – Leakage measurement after the first screw installation, referred to as the "first installation".

3÷6 – Four successive leakage measurement series preceded by screw removal and reinstallation in the existing holes, referred to as the "second installation" through the "fifth installation".

7. Leakage measurement of the test rig with screws covered by self-adhesive aluminium tape, referred to as "additional sealing" (Photo 4).

Because the volumetric airflow was measured in the region where the test pressure prevailed, Eq. (1) was modified during data processing to the following form:



Photo 4. Final stage of the airtightness tests: self-drilling screws sealed with aluminium tape

Fot. 4. Ostatni etap badania szczelności – wkręty uszczelnione taśmą aluminiową

$$q_{vl} = q_{vlmeasured} \cdot \frac{293}{273+t} \cdot \frac{p_a + p_{test}}{101\,325} [\text{Pa}] \quad (4)$$

where:

p_{test} – test pressure [Pa].

To facilitate evaluation, the test results are presented in m^3/h and were approximated with a power-law function (Eq. 3) using Microsoft Excel algorithms.

Results and discussion

The results, expressed as leakage corrected using Eq. (4), are presented in Figures 2 and 3. The plots also include, beside the curves connecting the measurement points, the approximation equations together with the obtained regression coefficients.

Because it is difficult to determine the opening area representative of a single screw, the unit leakage per screw was determined to quantitatively assess the effect of its use, according to:

no trzykrotnie (3 serie). Każda seria poprzedzona była „uderzeniem ciśnieniowym" polegającym na skokowym wytworzeniu w stanowisku badawczym nadciśnienia/podciśnienia 2000 Pa. Następnie prowadzono właściwe badania rozpoczynające się od ciśnienia 250, ze stopniowym jego zwiększaniem, z krokiem 250 Pa, do 2000 Pa, a po osiągnięciu tego maksimum ze skokowym powrotem do 250 Pa. Rejestrowano wielkości niezbędne do określenia przecieku: prędkość powietrza przepływającego przez sondę anemometru (w), ciśnienie (p_{test}) i temperaturę (t) w przewodzie bazowym, oraz ciśnienie barometryczne (p_a) i temperaturę otoczenia (t_e). Pomiarów dokonywano po ok. 30 s (czasie, po upływie którego stwierdzono stabilizację warunków pomiarowych). Strumień objętościowy obliczano ze zmierzonej średniej (90-sekundowej) prędkości powietrza przepływającego przez sondę pomiarową anemometru.

Badanie podzielono na siedem etapów:

1 – określenie pierwotnego (przed montażem wkrętów) przecieku stanowiska badawczego – dalej określany terminem „wzorcowanie". Wyniki tego badania uwzględniano, poprzez odjęcie, przy opracowywaniu wyników.

2 – pomiar przecieku po pierwszym montażu wkrętów – „1. montaż".

3÷6 – etapy kolejnych czterech serii pomiarowych przecieku poprzedzonych demontażem wkrętów i ich ponownym montażem w istniejących otworach – „2. montaż" do „5. montaż";

7 – pomiar przecieku stanowiska badawczego z wkrętami zaklejonymi aluminiową taśmą samoprzylepną – „doszczelnienie" (fotografia 4).

Z racji pomiaru strumienia objętościowego powietrza w obszarze panowania ciśnienia pomiarowego, przy opracowywaniu wyników, wzór 1 zmodyfikowano do postaci:

$$q_{vl} = q_{vlmeasured} \cdot \frac{293}{273+t} \cdot \frac{p_a + p_{test}}{101\,325} [\text{Pa}] \quad (4)$$

gdzie:

p_{test} – ciśnienie próbne [Pa].

Wyniki badań, przedstawione w celu ułatwienia oceny w m^3/h, poddano aproksymacji funkcją potęgową (wzór 3) za pomocą algorytmów programu MS Excel.

Wyniki badań i ich omówienie

Wyniki badań w postaci przecieku skorygowanego za pomocą wzoru 4, przedstawiono na rysunkach 2 i 3. Na rysunkach, przy krzywych łączących punkty pomiarowe, dodatkowo podano wzory aproksymacyjne wraz z osiągniętymi współczynnikami regresji.

Istnieje trudność określenia reprezentatywnego dla wkrętu pola otworu, w związku z tym w celu oceny ilościowej jego zastosowania, określono jednostkowy przeciek za pomocą wzoru:

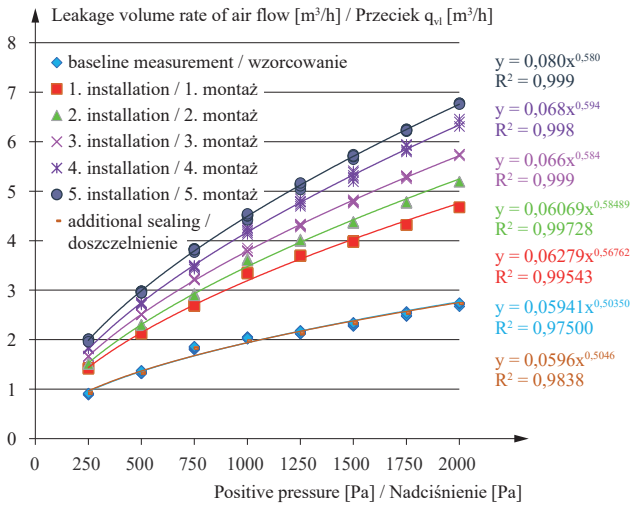


Fig. 2. Leakage rate as a function of positive pressure
Rys. 2. Zależność przecieku od nadciśnienia

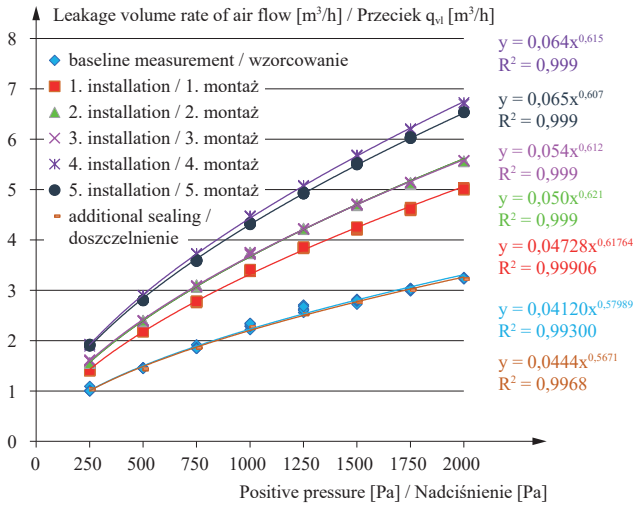


Fig. 3. Leakage rate as a function of negative pressure
Rys. 3. Zależność przecieku od podciśnienia

$$q_j = \frac{q_{ax} - q_{aw}}{112}\left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}\right] \quad (5)$$

where:
q_{ax} – leakage volume rate for the "x-th installation", calculated using the approximation equations [m³/h];
q_{aw} – leakage volume rate corresponding to the "baseline measurement", calculated using the approximation equation [m³/h].

The influence of disassembly and reassembly operations was assessed by the percentage increase in leakage volume rate relative to the "baseline measurement" (Figures 4 and 5). Approximation equations were again used, and the results were referred to a single screw using:

$$q_{j\%} = \frac{q_{ax} - q_{aw}}{q_{aw}} \cdot \frac{100}{112}[\%] \quad (6)$$

Figures 2 to 5 show that disrupting the integrity of the duct shell by drilling and tapping holes leads to an increase in leakage. In the baseline measurement, the rig was characterised by leakage under positive pressure from 250 to 2000 Pa (Figure 2) in the range of 0.958 to 2.73 m³/h. The gross leakage increased after the first installation to a range of 1.44–4.69 m³/h, and after the fifth installation to 1.97–6.57 m³/h. Sealing with self-adhesive tape reduced leakage to 0.967–2.76 m³/h, close to the value determined during the baseline measurement.

Under negative pressure, the rig was characterised by leakage from 250 to 2000 Pa (Figure 3) in the range of 1.01 to 3.38 m³/h. The gross leakage increased after the first installation to 1.43–5.17 m³/h. In contrast to positive pressure, no continuously increasing leakage trend associated with the sequence of disassembly and reassembly operations was observed. Leakage results for the second and third installations almost coincided, whereas the leakage for the fourth installation (1.90–6.85 m³/h) was higher than for the fifth installation. Sealing with self-adhesive tape reduced leakage to 0.967–2.76 m³/h, close to that recorded during the baseline measurement.

$$q_j = \frac{q_{ax} - q_{aw}}{112}\left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{h}}\right] \quad (5)$$

gdzie:
q_{ax} – przeciek „x. montażu" obliczony za pomocą wzorów aproksymacyjnych [m³/h];
q_{aw} – przeciek odpowiadający „wzorcowaniu" obliczony za pomocą wzoru aproksymacyjnego [m³/h].

Wpływ prac demontażowo-montażowych oceniono przez procentowy przyrost przecieku względem „wzorcowania" (rysunki 4 i 5). W tym przypadku także posłużono się wzorami aproksymacyjnymi i wyniki odniesiono do pojedynczego wkrętu za pomocą wzoru:

$$q_{j\%} = \frac{q_{ax} - q_{aw}}{q_{aw}} \cdot \frac{100}{112}[\%] \quad (6)$$

Na rysunkach 2÷5 widać, że naruszenie integralności powłoki przewodu przez wiercenie otworów i ich gwintowanie prowadzi do zwiększenia przecieku. Stanowisko charakteryzowało (wzorcowanie) się przeciekiem w przypadku nadciśnienia 250÷2000 Pa (rysunek 2) w zakresie 0,958÷2,73 m³/h. Przyrost brutto po „1. montażu" zwiększył się do przedziału 1,44÷4,69 m³/h, a po „5. montażu" 1,97÷6,57 m³/h. Doszczelnienie folią samoprzylepną zredukowało przeciek do wartości 0,967÷2,76 m³/h, zbliżonej do stwierdzonej podczas wzorcowania.

W przypadku podciśnienia przeciek wyniósł 250÷2000 Pa (rysunek 3), w zakresie 1,01÷3,38 m³/h. Przyrost brutto po „1. montażu" zwiększył się do 1,43÷5,17 m³/h. W odróżnieniu od nadciśnienia nie stwierdzono stałego zwiększającego się trendu przecieku związanego z kolejnością prac montażowo-demontażowych. Wyniki przecieku w przypadku „2. i 3. montażu" prawie się pokrywają, zaś przeciek w przypadku „4. montażu" (1,90÷6,85 m³/h) był większy niż przy „5. montażu". Doszczelnienie folią samoprzylepną zredukowało przeciek do wartości 0,967÷2,76 m³/h, zbliżonej do stwierdzonej podczas wzorcowania.

Analysis of leakage referred to a single screw (Eq. 5) is considerably more informative. For example, at a positive pressure of 250 Pa (Figure 4), after the first installation the leakage q_j was 0.0043 m³/h per screw. This may seem small, as 232 screws would correspond to a loss of 1 m³/h. Naturally, this relationship becomes less favourable at 2000 Pa. At q_j = 0.018 m³/h per screw, only 55 screws are sufficient for the system to lose 1 m³/h of air. This phenomenon is intensified by subsequent disassembly and reassembly operations. After the fifth installation, the number of screws corresponding to a leakage of 1 m³/h at positive pressures of 250 and 2000 Pa was 111 and 29, respectively. During the first installation, a single screw was responsible for a percentage increase in leakage relative to the "baseline measurement" at 250 Pa positive pressure of 0.45% (Eq. 6; Figure 4). Subsequent disassembly and reassembly operations increased this relationship to 0.54, 0.65, 0.79, and 1.2%. At 2000 Pa positive pressure, $q_{j\%}$ increased as follows: 0.64, 0.80, 0.94, 1.14, and 1.25%.

At a negative pressure of 250 Pa (Figure 5), after the first installation the leakage q_j was 0.0037 m³/h per screw, reaching a maximum value of 0.0080 m³/h per screw after the fourth installation. At a negative pressure of 2000 Pa, the corresponding values changed from 0.016 to 0.031 m³/h per screw. A single screw was responsible for a percentage increase in leakage relative to the "baseline measurement" at a negative pressure of 250 Pa of 0.37% (Figure 5) after the first installation. Subsequent disassembly and reassembly operations changed this relationship to 0.47, 0.50, 0.79, and 0.74%. At 2000 Pa positive pressure, $q_{j\%}$ changed as follows: 0.47, 0.59, 0.60, 0.91, and 0.84%.

The unit leakage q_j may also be compared with the corresponding surface area of an installation meeting the air tightness classes (Table 1). At 250 Pa positive pressure, one screw with a thread diameter of 4.2 mm corresponds, in terms of leakage, to installation surface areas for classes A, B, C, and D after the first installation of 12, 37, 111, and 331 cm², respectively. For the fifth-installation variant, these values increase to 26, 77, 231, and 691 cm². At 2000 Pa positive pressure, the corresponding areas after the first installation were 13, 39, 116,

Znacznie pożyteczniejsza jest analiza przecieku odniesionego do pojedynczego wkrętu (wzór 5). Przykładowo dla nadciśnienia 250 Pa (rysunek 4) po „1. montażu" przeciek q_j wyniósł 0,0043 m³/h·szt. Wydawać się to może niewiele (za ubytek 1 m³/h odpowiadają 232 wkręty). Oczywiście relacja ta wygląda gorzej w przypadku ciśnienia 2000 Pa. Przy q_j = 0,018 m³/h·szt. wystarczy 55 wkrętów, aby instalacja traciła 1 m³/h powietrza. Zjawisko to pogłębiają kolejne czynności demontażowo-montażowe. Po „5. montażu" liczba wkrętów odpowiadająca za przeciek 1 m³/h przy nadciśnieniu 250 i 2000 Pa wynosi odpowiednio 111 i 29. Pojedynczy wkręt w przypadku „1. montażu" odpowiada za procentowy przyrost przecieku względem „wzorcowania" przy nadciśnieniu 250 Pa o 0,45% (wzór 6; rysunek 4). Kolejne prace demontażowo-montażowe zwiększały tę relację do: 0,54; 0,65; 0,79; 1,2%. W przypadku nadciśnienia 2000 Pa $q_{j\%}$ zwiększał się następująco: 0,64; 0,80; 0,94; 1,14; 1,25%.

W przypadku podciśnienia 250 Pa (rysunek 5) po „1. montażu" przeciek q_j wyniósł 0,0037 m³/h·szt., osiągając maksymalną wartość 0,0080 m³/h·szt. po „4. montażu". W przypadku podciśnienia 2000 Pa wartości zmieniają się odpowiednio 0,016 i 0,031 m³/h·szt. Pojedynczy wkręt odpowiada za procentowe zwiększenie przecieku względem „wzorcowania", w przypadku podciśnienia 250 Pa i „1. montażu" jest to o 0,37% (rysunek 5) . Kolejne prace demontażowo-montażowe zmieniały tę relację do: 0,47; 0,50; 0,79; 0,74%. W przypadku nadciśnienia 2000 Pa $q_{j\%}$ zmieniał się następująco: 0,47; 0,59; 0,60; 0,91; 0,84%.

Można też porównać przeciek jednostkowy q_j z odpowiadającą mu powierzchnią instalacji spełniającą klasy szczelności (tabela 1). W przypadku nadciśnienia 250 Pa, pojedynczemu wkrętowi o średnicy gwintu 4,2 mm, pod względem przecieku odpowiada powierzchnia instalacji, dla klasy A; B, C i D po „1. montażu": 12; 37, 111 i 331 cm². W przypadku „5. montażu" zwiększa się odpowiednio do 26; 77, 231 i 691 cm². W przypadku nadciśnienia 2000 Pa powierzchnie te po „1. montażu" wyniosły odpowiednio: 13, 39, 116 i 349 cm², a po „5. mon-

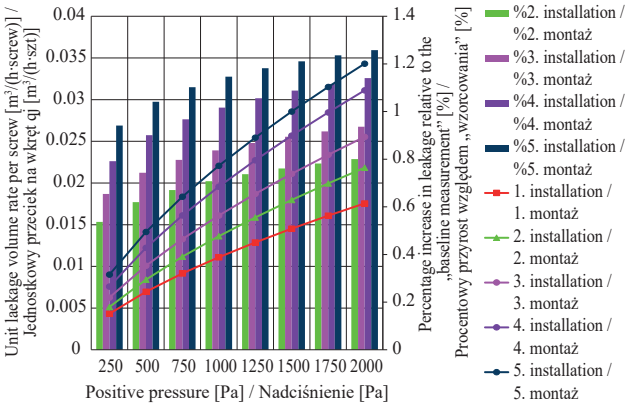


Fig. 4. Unit leakage per screw and percentage increase in leakage relative to the „baseline measurement" – positive pressure

Rys. 4. Jednostkowy przeciek w odniesieniu do pojedynczego wkrętu i procentowy przyrost przecieku względem „wzorcowania" – nadciśnienie

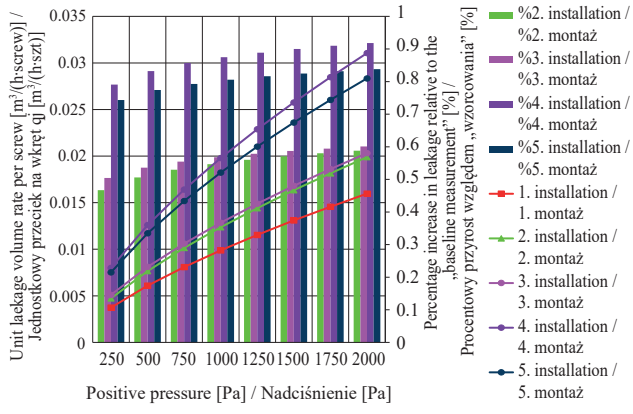


Fig. 5. Unit leakage per screw and percentage increase in leakage relative to the „baseline measurement" – negative pressure

Rys. 5. Jednostkowy przeciek w odniesieniu do pojedynczego wkrętu i procentowy przyrost przecieku względem „wzorcowania" – podciśnienie

and 349 cm^2. After the fifth installation, at 2000 Pa positive pressure, they increased to 25, 76, 227, and 682 cm^2.

At 250 Pa negative pressure, one screw corresponds, in terms of leakage, to installation surface areas for classes A, B, C, and D after the first installation of 11, 32, 96, and 289 cm^2, respectively. For the fourth-installation variant, these values increase to 23, 68, 205, and 615 cm^2. At 2000 Pa negative pressure, the corresponding areas after the first installation were 12, 35, 106, and 317 cm^2. After the fourth installation, at 2000 Pa negative pressure, these areas increased to 23, 69, 206, and 617 cm^2.

The mathematical relationships describing the flow character also differ depending on the pressure sign. The presence of screws causes the curves to have a different slope than that of the "undisturbed" duct. The flow exponents (Eq. 3) for the "baseline measurement" and "additional sealing" stages (Figures 2 and 3) are approximately $n \approx 0.51$ for positive pressure and $n \approx 0.57$ for negative pressure. Under the influence of the screws, the values of n change to 0.57–0.59 for positive pressure and 0.61–0.62 for negative pressure.

One of the most important causes of the increase in leakage was the observed enlargement of holes and thread stripping during screw installation (Table 3).

Already during the first installation, 22 threads were stripped. Each subsequent installation intensified this phenomenon, which reached 99 stripped threads during the fifth installation, i.e. 88.4% of all connections. Of course, when installing a duct with the end of a fitting, the thickness of the sheared steel is doubled by the fitting wall thickness, so the rate of joint degradation should be lower. However, under construction-site conditions, it should not be expected that the installer will maintain such particular care or work in the convenient position provided during the tests. Problems with centring the holes in the duct and fitting should also be expected.

In "non-stripped" connections, rotation of the screw heads relative to their previous position was observed, indicating progressing plastic deformation in the duct material or initiation of the thread in a different location. The result of this process, in addition to increased leakage, is reduced joint strength. Screw fallout cannot be excluded.

The anomalous behaviour of the rig during measurements under positive and negative pressure may also be explained by the head of a loose screw being pressed against and sealing the gap under the action of suction caused by negative pressure inside the duct.

Table 3. Number of stripped threads during screw insertion and their relative proportion

Tabela 3. Liczba zerwanych gwintów podczas wkręcania wkrętów i ich względny udział

Stage / Etap	Number of stripped threads / Liczba zerwanych gwintów
First installation / 1. montaż	22 (19.6%)
Second installation / 2. montaż	55 (49.1%)
Third installation / 3. montaż	75 (67.0%)
Fourth installation / 4. montaż	94 (83.9%)
Fifth installation / 5. montaż	99 (88.4%)

Conclusions

The measured leakage is slightly higher under positive pressure, despite the higher leakage under negative pressure recorded during the baseline measurement. During the

tażu" dla nadciśnienia 2000 Pa zwiększyły się do: 25, 76, 227 i 682 cm^2.

W przypadku podciśnienia 250 Pa, pojedynczemu wkrętowi, odpowiada pod względem przecieku powierzchnia instalacji, dla klasy A, B, C i D po „1. montażu": 11, 32, 96 i 289 cm^2, a po „4. montażu" odpowiednio: 23, 68, 205 i 615 cm^2. W przypadku podciśnienia 2000 Pa powierzchnie te po „1. montażu" wyniosły odpowiednio: 12, 35, 106 i 317 cm^2, a po „4. montażu" zwiększyły się do: 23, 69, 206 i 617 cm^2.

Zależności matematyczne opisujące charakter przepływu także różnią się od znaku ciśnienia. Obecność wkrętów powoduje inne nachylenie krzywych w stosunku do „nienaruszonego" przewodu. Wykładniki przepływu (wzór 3) dla etapów „wzorcowanie" i „doszczelnienie" (rysunki 2 i 3) wynoszą dla nadciśnienia $n \approx 0{,}51$, a podciśnienia $n \approx 0{,}57$. Pod wpływem wkrętów wartości n zmieniają się dla nadciśnienia 0,57÷0,59, zaś dla podciśnienia 0,61÷0,62.

Jedną z najważniejszych przyczyn zwiększenia przecieku było „rozbijanie" otworów i „zrywanie gwintów" zaobserwowane podczas montażu wkrętów (tabela 3).

Już podczas „1. montażu" zerwano 22 gwinty. Każdy kolejny montaż pogłębiał to zjawisko, po „5. montażu" liczba zerwanych gwintów wynosi 99 szt. – 88,4% wszystkich połączeń. Oczywiście w przypadku montażu przewodu z końcówką złączki mamy do czynienia z podwojoną (o grubość blachy złączki) grubością ścinanej stali, czyli szybkość niszczenia połączeń powinna być mniejsza. Jednak w warunkach budowy nie należy oczekiwać, że monter zachowa szczególną staranność i będzie pracował w wygodnej pozycji, jaka była zapewniona podczas badań. Także należy się spodziewać problemów z centrowaniem otworów w przewodzie i złączce.

W połączeniach niezerwanych zaobserwowano obrót łbów wkrętów w stosunku do ich wcześniejszego położenia, co wskazywało na postępujące odkształcenia plastyczne w materiale przewodu lub rozpoczynanie gwintu w innym miejscu. W rezultacie oprócz zwiększonego przecieku, następuje zmniejszenie wytrzymałości połączeń. Nie można wykluczyć także wypadania wkrętów.

Efekt anomalii zachowania stanowiska podczas pomiarów przy nadciśnieniu i podciśnieniu można także wytłumaczyć przyciskaniem i doszczelnianiem szczeliny przez łeb luźnego wkrętu zasysany podciśnieniem panującym w przewodzie.

Wnioski

Zmierzony przeciek jest nieznacznie większy w przypadku nadciśnienia pomimo większego przecieku dla podciśnienia stwierdzonego podczas „wzorcowania". Przeciek stanowiska

baseline measurement, leakage of the rig at 250 Pa positive pressure was 0.96 m^3/h, while at 250 Pa negative pressure it was 1.01 m^3/h. At 250 Pa positive pressure, leakage per single screw changed during successive tests from 0.0043 to 0.0090 m^3/h, whereas at 250 Pa negative pressure it changed from 0.0037 to 0.0080 m^3/h.

Under negative pressure, anomalies were observed in the trend of leakage variation with the sequence of disassembly and reassembly operations. For positive pressure, leakage increased with successive disassembly and reassembly operations, whereas for negative pressure the highest leakage was measured after the fourth screw insertion.

The use of screws has a noticeable effect on leakage. At the lowest tested positive pressure of 250 Pa, a single screw accounted for approximately 0.45% of the net leakage of the test rig after the first installation; after the fifth installation, this value increased to 1.2%. For negative pressure, the contribution of one screw to leakage varied from 0.37 to 0.74%.

Self-adhesive aluminium tape is an inexpensive and highly effective additional sealing element for joints. Covering the screws with tape practically eliminated their influence on leakage.

A mathematical description of leakage phenomena different from that given in the standard [12] was obtained; the functions differ for positive and negative pressure. The current state of knowledge regarding the mathematical description of ventilation-system airtightness should therefore be regarded as insufficient and in need of further research.

Thread stripping accompanying disassembly and reassembly operations, reaching 88.4%, may, in addition to affecting system airtightness, reduce system strength, increase acoustic emission, and cause other adverse effects. The use of screws in locations where cyclic disassembly of the installation is expected should therefore be regarded as inadvisable.

The use of screws requires particular attention in systems for which higher airtightness classes, i.e. C and D, are required. For these classes, the installation surface areas corresponding to a single screw after the first installation are, at 250 Pa positive pressure, 111 and 331 cm^2, respectively, and under negative pressure 96 and 287 cm^2. At 2000 Pa, which is more representative of higher airtightness classes, these areas vary from 116 to 349 cm^2 for positive pressure and from 106 to 317 cm^2 for negative pressure. Subsequent disassembly and reassembly operations increased the representative surface area for classes C and D to 227 and 681 cm^2 under positive pressure, and to 205 and 616 cm^2 under negative pressure.

The airtightness of ducts and ventilation-system components obtained during their manufacture is a necessary but insufficient condition for the airtightness of the installation. Practical experience indicates an important, and often decisive, influence of installation quality, which is frequently hindered by insufficient space allocated for the installation and by construction-site conditions.

All photo: autors

Received: 18.05.2026
Revised: 06.07.2026
Published: 21.10.2026

podczas wzorcowania w przypadku ciśnieniu 250 Pa wyniósł 0,96 m^3/h, a podciśnienia 250 Pa – 1,01 m^3/h. W przypadku nadciśnienia 250 Pa przeciek dotyczący pojedynczego wkrętu zmieniał się podczas kolejnych badań z 0,0043 do 0,0090 m^3/h, podczas gdy w przypadku podciśnienia 250 Pa wyniósł 0,0037÷ 0,0080 m^3/h.

W przypadku podciśnienia stwierdzono anomalie w zachowaniu trendu zmiany przecieku wraz z kolejnością prac montażowo-demontażowych. W przypadku nadciśnienia trend był rosnący wraz z kolejnymi pracami demontażowo-montażowymi, natomiast w przypadku podciśnienia największy przeciek zmierzono po 4. wkręceniu wkrętów.

Stosowanie wkrętów daje zauważalny wpływ na przeciek. W przypadku najniższego badanego nadciśnienia (250 Pa), pojedynczy wkręt odpowiadał za ok. 0,45% nieszczelności stanowiska badawczego netto po „1. montażu", po „5. montażu" wartość ta zwiększyła się do 1,2%. W przypadku podciśnienia udział w przecieku zmieniał się od 0,37 do 0,74%.

Folia samoprzylepna jest tanim i doskonałym elementem doszczelniającym połączenia. Pokrycie wkrętów folią praktycznie wyeliminowało ich wpływ.

Uzyskano odmienny, od podawanego w normie [12], matematyczny opis zjawisk przecieku. Funkcje różną się w przypadku nadciśnienia i podciśnienia. Stan wiedzy dotyczącej opisu matematycznego szczelności instalacji wentylacyjnych należy uznać za niewystarczający.

Towarzyszące pracom demontażowo-montażowym zrywanie gwintów dochodzące do 88,4%, oprócz wpływu na szczelność instalacji, grozi zmniejszeniem wytrzymałości instalacji, zwiększeniem emisji akustycznej itp. Należy uznać, że niewskazane jest użycie wkrętów w miejscach, w których przewiduje się cykliczny demontaż instalacji.

Stosowanie wkrętów wymaga szczególnej uwagi w instalacjach, od których wymaga się wyższych klas szczelności, tj. C i D, dla których odpowiadające pojedynczemu wkrętowi po „1. montażu" powierzchnie instalacji w przypadku nadciśnienia 250 Pa wynoszą: 111 i 331 cm^2, zaś podciśnienia – 96 i 287. W przypadku ciśnienia 2000 Pa, bardziej reprezentatywnego dla wyższych klas szczelności, powierzchnie te zmieniały się w przypadku nadciśnienia od 116 cm^2 (klasa C) do 349 cm^2 (klasa D). W przypadku podciśnienia 2000 Pa relacja między klasami C i D wyglądała następująco: 106 i 317 cm^2. Kolejne prace montażowo-demontażowe zwiększyły reprezentatywną powierzchnię w przypadku klas C i D dla nadciśnienia do 227 i 681 cm^2, a dla podciśnienia do 205 i 616 cm^2.

Szczelność przewodów i elementów instalacji wentylacyjnych uzyskana w trakcie ich produkcji jest koniecznym, lecz niewystarczającym warunkiem szczelności instalacji. Praktyka wskazuje na ważny, jeśli nie wręcz decydujący, wpływ poprawności prac montażowych, które często są utrudnione przez zbyt małą przestrzeń przewidzianą dla instalacji.

Wszystkie fotografie: autorzy

Artykuł wpłynął do redakcji: 18.05.2026 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 06.07.2026 r.
Opublikowano: 21.10.2026 r.

▶

Literature

[1] DW/144 Specification for Sheet Metal Ductwork. Low, medium and high pressure/velocity air systems. Second edition. Building & Engineering Services Association; 2013.

[2] Warunki Oceny Właściwości Użytkowych Wyrobu Budowlanego WO -KOT/36/01 Wydanie 3. Warszawa; 2023.

[3] PN-EN 10346:2011 Wyroby płaskie stalowe powlekane ogniowo w sposób ciągły. Warunki techniczne dostawy.

[4] https://www.thyssenkrupp-materials-processing-europe.com/de/c-stahl/schmelztauchveredeltes-feinblech/dx51d-dx57d/dx51d data dostępu 18.05.2026.

[5] Ductwork airtightness. A review. INIVE EEIG; 2020.

[6] Modera M, Gord MF. Leakage in large-building ducts: modelling the savings for various applications. International Journal of Ventilation, 24:4, 574-585; DOI: 10.1080/14733315.2025.2513182.

[7] Luft J. Mangelfrei geplant und ausgeführt. Anforderungen an die Dichtigkeit von Luftleitungsnetzen. IKZ-Fachplaner Juni 2014.

[8] Rozporządzenie w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Rok 2002 Dz. U. 75. Poz. 690 z późn. zm.

[9] PN-EN 16798-3:2025-10 Charakterystyka energetyczna budynków. Wentylacja budynków. Część 3: Wentylacja budynków niemieszkalnych. Wymagania dotyczące właściwości systemów wentylacji i klimatyzacji pomieszczeń (moduły M5-1, M5-4).

[10] BREEAM International New Construction 2016 Technical Manual; 2017.

[11] EN 12237:2005 Wentylacja budynków. Sieć przewodów Wytrzymałość i szczelność przewodów z blachy o przekroju kołowym.

[12] Liddament M. Air Infiltration Calculation Techniques. An Applications Guide. The Air Infiltration and Ventilation Centre, University of Warwick Science Park; 1986.

[13] EN 1506:2007 Wentylacja budynków. Przewody proste i kształtki wentylacyjne z blachy o przekroju kołowym. Wymiary.

[14] PN-EN ISO 1478:2000 Gwinty wkrętów samogwintujących.