

## ANALIZA METOD POMIARU ROZKŁADU PRĘDKOŚCI STRUMIENI POWIETRZA W KABINACH LAKIERNICZYCH

### Streszczenie

W artykule przedstawiono analizę metod pomiaru rozkładu prędkości strumieni powietrza w pomieszczeniach. Analiza koncentruje się na przykładzie kabin lakierniczych, ze względu na charakter procesu lakierniczego wymagana jest wymiana powietrza z utrzymaniem odpowiednich reżimów. Oprócz analizy istniejących metod przedstawiono koncepcyjną metodę pomiaru wykorzystującą obrazy termowizyjne. Wyniki pomiarów pozwalają również na weryfikację numerycznych modeli CFD obrazujących obieg powietrza w modelowanych pomieszczeniach.

### WSTĘP

W branży klimatyzacji i wentylacji bardzo często pojawiają się potrzeby pomiar i analiz rozkładu prędkości strumieni powietrza w przekrojach wentylowanych lub klimatyzowanych pomieszczeniach. Oprócz branży klimatyzacji i wentylacji w budynkach, duże zapotrzebowanie na techniki pomiarów rozkładu prędkości strumieni powietrza można zauważyć również w procesach przemysłowych. Przykładem takiego zapotrzebowania jest branża lakiernicza, gdzie ze względu na bezpieczeństwo człowieka [5,8] oraz utrzymanie wysokiej jakości procesu wymagana jest ciągła wymiana powietrza. Parametry wymiany powietrza obarczone są reżimami prędkości oraz jednorodności pola prędkości opadu powietrza wewnątrz przestrzeni roboczej. Kabin lakiernicze kojarzą się przede wszystkim z lakiernictwem samochodowym, jednak drugą znaczącą gałęzią przemysłu dla lakiernictwa jest przemysł drzewny. Procesy malarskie obecne są również w wielu przedsiębiorstwach, gdzie nieodłącznym elementem procesu produkcyjnego jest etap nakładania powłok ozdobnych lub ochronnych. Podobne zapotrzebowanie można również zauważyć w branży małych stoczni jachtowych, zarówno przy budowie jak i renowacji niewielkich jednostek pływających. Prowadzi się badania i modelowanie rozkładu strumieni powietrza w kabinach lakierniczych [1, 2,3,4,6].

### 1. ANALIZA ISTNIEJĄCYCH METOD POMIARU ROZKŁADU PRĘDKOŚCI STRUMIENI POWIETRZA

Pomiar jednorodności pola prędkości strumieni powietrza w danym przekroju pomieszczenia kabiny lakierniczej jest dość utrudniony. W obecnej chwili najprostszym sposobem badania rozkładu prędkości powietrza wewnątrz kabin lakierniczych jest metoda wykorzystująca wytwornicę dymu. Rysunek 1 przedstawia wykorzystanie wytwornicy dymu do weryfikacji rozkładu strumienia wymienianego powietrza wokół pojazdu umieszczonego wewnątrz kabiny lakierniczej. Metoda ta nie daje jednak pełnego obrazu rozkładu pola prędkości a jedynie pokazuje, czy w danym rejonie odbywa się wymiana powietrza.



Rys. 1 badanie opływu powietrza wokół pojazdu umieszczonego w kabine lakierniczej[10]

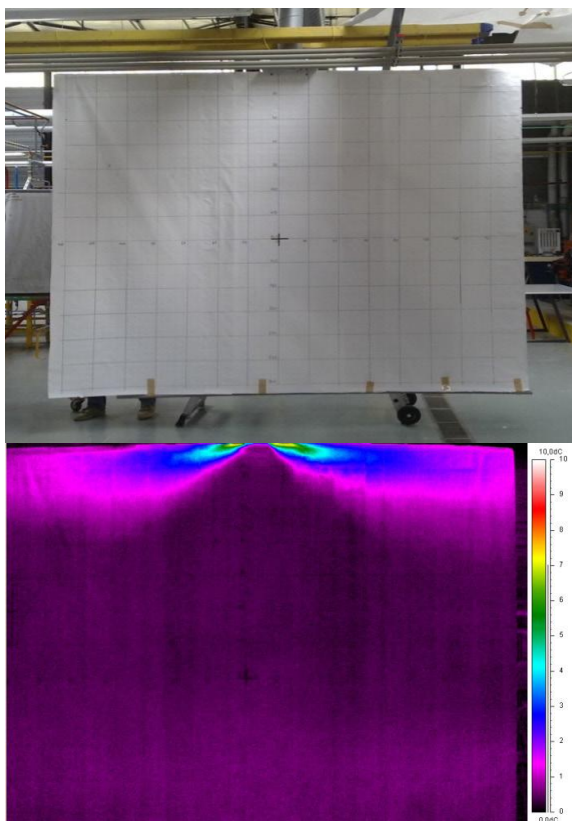
Dym z wytwornicy wykorzystywany jest również do analizy obiegu strumieni powietrza wewnątrz przestrzeni roboczej dla innych procesów niż lakiernicze. Rysunek 2 przedstawia przeprowadzenie badań wymiany powietrza z wykorzystaniem wytwornicy dymu wewnątrz wydzielonej części laboratorium.



Rys. 2 badanie obiegu powietrza wewnątrz laboratorium [11]

Badanie i wizualizacja wymiany powietrza w kabinach lakierniczych i innych pomieszczeniach z wykorzystaniem wytwornicy dymu nie umożliwia jednoczesnego zobrazowania rozkładu prędkości w całym przekroju poprzecznym. Trudno jest również rejestrować wyniki pomiarów w wartościach liczbowych.

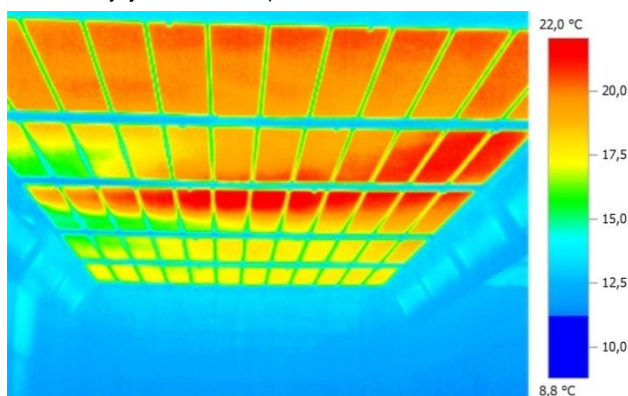
Istnieją również inne metody wizualizacji rozkładu strumienia powietrza w przekroju poprzecznym z wykorzystaniem kamery termowizyjnej. Rysunek 3 przedstawia ideę pomiaru i wizualizacji strumienia powietrza pochodzącego z nawiewnika instalacji wentylacyjnej [9]. Metoda ta polega na umieszczeniu arkusza papieru lub innego materiału w przekroju poprzecznym, prostopadłym do powierzchni części nawiewnej. Na podstawie obrazu termowizyjnego umieszczonego arkusza, można wnioskować o rozkładzie prędkości powietrza pochodzącego z nawiewnika. Rysunek 3 przedstawia powyższą metodę. Rozkład temperatur wyraźnie jest skojarzony z polem prędkości strumienia powietrza z nawiewnika.



**Rys. 3** Metoda wizualizacji strumienia powietrza z wykorzystaniem kamery termowizyjnej [9]

W kabinach lakierniczych zróżnicowanie prędkości przepływu powietrza jest zauważalne już w części nawiewnej. Można to wnioskować na podstawie rozkładu temperatur na filtrze nawiewnym. Rysunek 4 przedstawia obraz termograficzny filtra nawiewnego w kabine lakierniczej.

Jak wynika z rysunku 4 rozkład prędkości nawiewanego powietrza jest zróżnicowany już na filtrze powietrza. Przedstawiona na



**Rys.4** Obraz termograficzny filtra sufitowego wewnątrz kabiny lakierniczej

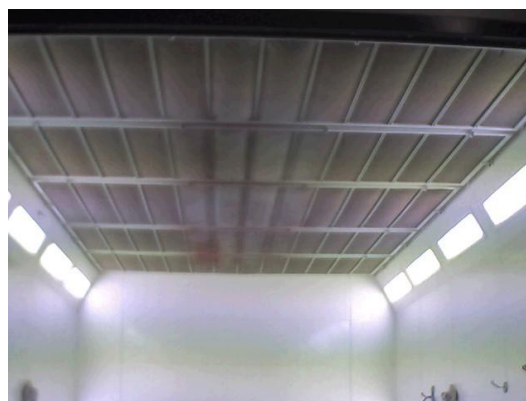
rysunku 3 metoda z umieszczonym arkuszem w polu przekroju poprzecznego lub wzdłużnego może dać pozytywne efekty. Metoda ta może mieć jednak kilka wad. Główną wadą jest fakt, że umieszczenie arkusza w przekroju poprzecznym może zmienić obieg powietrza w stosunku do obiegu rzeczywistego. Wynika to z faktu, że znajdujący się arkusz nie pozwoli na swobodny obieg powietrza w kierunku poprzecznym do jego powierzchni. Może to powodować różnice ciśnień po obu stronach arkusza, co może wpłynąć na zmianę uzyskanych wyników w stosunku do rzeczywistości. Powyższa metoda pomiarów rozkładu strumienia przestaje być użyteczna, gdy temperatura powietrza nawiewanego jest zbliżona do temperatury pomieszczenia.

## 2. KONCEPCJA METODYKI POMIARU ROZKŁADU STRUMIENI POWIETRZA PRZY UŻYCIU KAMERY TERMOWIZYJNEJ

Sugerując się opisanymi powyżej zjawiskami można opracować metodę pomiaru rozkładu prędkości powietrza z użyciem kamery termowizyjnej [7]. Kamery termowizyjne są coraz szerzej wykorzystywane są do pomiarów wielu parametrów oraz identyfikacji uszkodzeń. Ogólne założenie metody opiera się na umieszczeniu w przekroju poprzecznym kabiny lakierniczej matrycy składającej się z elementów, o dobrych właściwościach konwekcyjnego przejmowania ciepła od przepływającego powietrza. Na rysunku 5 przedstawiono ideę matrycy pomiarowej umieszczonej w przekroju poprzecznym kabiny lakierniczej. Przestrzenie pomiędzy poszczególnymi elementami matrycy pozwalają na swobodny przepływ powietrza w kierunku poprzecznym do powierzchni matrycy. Taka konstrukcja matrycy nie powinna zakłócić rzeczywistego obiegu powietrza. Przesuwając wzdłużnie matrycę ustawioną w przekroju poprzecznym z jednoczesną rejestracją obrazów termograficznych można utworzyć model rozkładu prędkości powietrza w całej przestrzeni roboczej kabiny lakierniczej.

Aby zapewnić szybkie ustalanie się temperatury elementów (węzłów) pomiarowych, należy dążyć do minimalizacji ich masy przy relatywnie dużej powierzchni wymiany ciepła. Należy jednak uwzględnić fakt, że minimalizacja rozmiarów pojedynczych węzłów zwiększa rozdzielczość pomiarową proponowanej metody.

Aby zapobiec wymianie ciepła pomiędzy poszczególnymi węzłami pomiarowymi, połączenia pomiędzy nimi powinny być minimalnego przekroju. Materiał połączeń powinien charakteryzować się niskim współczynnikiem przewodności cieplnej. Oprócz rozmiarów węzłów pomiarowych należy również odpowiednio dobrać odległość

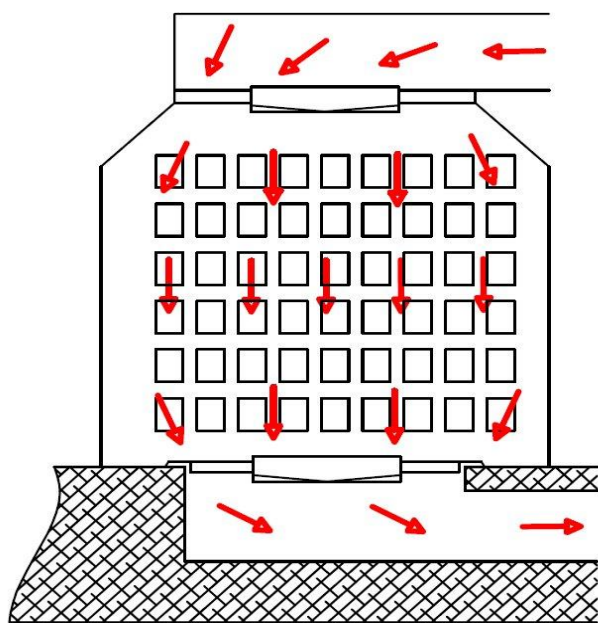




między nimi.

Wykonane w podczerwieni zdjęcie powyższej macierzy elementów zobrazuje rozkład temperatur w poszczególnych jej węzłach. Ponieważ temperatura związana jest z masą przepływającego powietrza, można będzie określić natężenia strumieni powietrza w przekroju poprzecznym kabiny lakierniczej. Dla zapewnienia odpowiedniej dokładności odczytu temperatury za pomocą kamery termowizyjnej, należy uprzednio wyznaczyć współczynnik emisyjności materiału węzłów. Ze względu na zależność współczynnika emisyjności zarówno od materiału jak i jego chropowatości powierzchni najlepiej wyznaczyć go metodą eksperymentalną. Błędy pomiarowe temperatury można wyznaczyć na podstawie klasy pomiarowej kamery termowizyjnej podane przez producenta lub dostawcę.

Pomiarów można dokonać za pomocą dwóch metod: pasywnej i aktywnej. Metoda pasywna wzorowana jest na wspomnianej technice pomiarowej wykorzystującej przejmowanie ciepła od powietrza nawiewanego do przestrzeni roboczej kabiny lakierniczej. Poszczególne elementy matrycy przejmując temperaturę od nawiewanego powietrza utworzą obraz rozkładu strumienia w przekroju poprzecznym. Wadą tej metody jest wymagana różnica temperatur pomiędzy temperaturą panującą wewnątrz kabiny lakierniczej a temperaturą nawiewanego powietrza. Można się spodziewać, że w trakcie trwania pomiarów nawiewane ciepła powietrze będzie podnosiło temperaturę wewnątrz kabiny lakierniczej. Taka sytuacja spowoduje zakłócenie wyników pomiarów.



**Rys. 5** Matryca pomiarowa umieszczona w przekroju poprzecznym kabiny lakierniczej

Metoda aktywna wzoruje się na działaniu termoanemometru. Polega ona na tym, że poszczególne elementy matrycy umieszczonej w przekroju poprzecznym są ogrzewane. Nawiewane powietrze nie musi być ogrzewane. W takiej sytuacji powietrze odbiera ciepło od rozgrzanych elementów. Wszystkie elementy matrycy są jednakowej konstrukcji i do ogrzewania ich dostarczana jest jednakowa moc. Obraz termowizyjny pozwoli ustalić ilość ciepła przekazanego z termoelementów do powietrza. Ilość ciepła przekazanego jest uzależniona od temperatury i natężenia strumienia powietrza odbierającego ciepło. Metoda taka nie powoduje oraz nie jest narażona na zakłócenia związane ze wzrostem temperatury wewnątrz kabiny lakierniczej w trakcie pomiarów.

## PODSUMOWANIE

Pomiary rozkładu natężenia strumieni powietrza z wykorzystaniem kamery termowizyjnej pozwoli na szybką wizualizację stanu bieżącego. Wyniki analizy rozkładu strumieni powietrza pozwolą również na weryfikację numerycznych modeli CFD. Pozwoli to również na prace związane z analizą przyczyn różnic pomiędzy stanem rzeczywistym a modelem numerycznym oraz przeprowadzanie korekty modeli.

Prezentowana metoda bazuje na jednym przyrządzie pomiarowym – kamerze termowizyjnej. Nie wymaga rozszerzania o dodatkowe czujniki pomiarowe, a jedynie utworzeniu matrycy pomiarowej składającej się węzłów wykonanych z materiału o dobrych właściwościach wymiany ciepła.

Przedstawiona w artykule propozycja metodyki pomiarów natężenia strumieni powietrza dotyczy kabin lakierniczych, jednak może być stosowana również w wielu innych miejscach.

Proponowana metoda pomiaru rozkładu prędkości strumienia powietrza pozwoli na poprawę wyników badań, co może mieć wpływ na rozwój technologii szczególnie związanych z systemami wentylacyjnymi. Wyniki pomiarów z wykorzystaną metodą pozwolą na optymalizację i ujednoczenie rozkładu prędkości powietrza również w różnych pomieszczeniach co może wpłynąć na minimalizację zużycia energii oraz tworzenie obrazów termograficznych wspomagających edukację ekologiczną.

W obecnej chwili powyższa metodyka pomiaru jest w fazie koncepcyjnej. Dalsze prace nad metodą pomiaru obejmują przede wszystkim rozważania nad materiałem węzłów matrycy (punktów przejmujących ciepło), materiałem i wykonaniem połączeń pomiędzy węzłami, ich kształtem, ilością oraz poprawnym rozmieszczeniem.

Na wybranych elementach można wykonać wstępne badania na uproszczonym modelu. Celem badań jest weryfikacja poprawności metody pomiaru.

Metoda wymaga również poszukiwania odpowiedniego aparatu matematycznego, który będzie operował na dużej ilości wyników pomiarowych przy uwzględnieniu współzależności ich względem siebie.

## LITERATURA

1. Akafuah N. K., Automotive Paint Spray Characterization and Visualization, Automotive Painting Technology A Monozuruki-Hitozuruki Perspective, Springer Netherlands 2013 121-165,
2. Flynn M. R. and Sills E. D., On the Use of Computational Fluid Dynamics in the Prediction and Control of Exposure to Airborne Contaminants - an Illustration Using Spray Painting, Ann. occup. Hyg., Vol. 44, No. 3, p. 191-202, 2000,
3. Jia Li, Rohan G. Uttarwar, and Yinlun Huang, CFD-Based Modeling and Design for Energy-Efficient VOC Emission Reduction in Surface Coating Systems,
4. Nikończuk P., Królikowski T., Rypina Ł., Sugalski K., Ogólne założenia modelu symulacyjnego kabiny lakierniczej, Logistyka 09/2014; 3(2014), str.4673-4678,
5. Nikończuk P., Wstępna analiza zagrożeń w eksploatacji kabin lakierniczych wyposażonych w rekuperatory, Logistyka 5/2014 1183-1188,
6. Nikończuk P., Królikowski T., Rypina Ł., Wstępne wyniki modelowania przepływów w kabynie lakierniczej, Logistyka 6/2014 7838-7842,
7. Nikończuk P., Królikowski T., Rypina Ł., Koncepcja pomiaru rozkładu prędkości strumieni powietrza w kabynie lakierniczej z wykorzystaniem kamery termowizyjnej, Logistyka3/2015 3536:3541

8. Ubowska A., Niewińska E. Bezpieczeństwo w lakierniach samochodowych – zagrożenie ze strony substancji chemicznych. *Logistyka* 2014(5): 1596-1606.
9. Visualization of Air Flows with an Infrared Camera: Presentation of a Simple Technique and Examples of Data Analysis - FLIR Technical Series
10. <https://www.youtube.com/watch?v=xMreqX4I7DE>
11. <http://www.indiamart.com/aero-biotechniques/cleanroom-validation.html>

## ANALYSIS OF MEASUREMENT METHODS OF AIR STREAMS VELOCITY DISTRIBUTION INSIDE SPRAY BOOTHS

### *Abstract*

*The paper presents analysis of current measurement methods of air streams distribution inside closed spaces. Analysis is focused on measurement inside spray booths. In case of specific nature of finishing process the air exchange in workspace is obligatory. The quality of air exchange is regulated with many requirements including air balance. Measurement will also help to verify numerical CFD models of air streams distribution.*

Autorzy:

dr inż. **Piotr Nikończuk** – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Techniki Morskiej i Transportu, e-mail: [piotr.nikonczuk@zut.edu.pl](mailto:piotr.nikonczuk@zut.edu.pl)

dr hab. inż. prof. Nadzw. PK **Tomasz Królikowski** - Politechnika Koszalińska, Wydział Technologii i Edukacji, 75-453 Koszalin, ul. Śniadeckich 2, e-mail: [Tomasz.Krolikowski@tu.koszalin.pl](mailto:Tomasz.Krolikowski@tu.koszalin.pl)

mgr inż. **Łukasz Rypina** - Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, 75-620 Koszalin, ul. Raławicka 15-17, e-mail: [Łukasz.Rypina@tu.koszalin.pl](mailto:Łukasz.Rypina@tu.koszalin.pl)