Systemy wentylacji zakładów stolarskich – studium przypadku

Rafał ŁUCZAK[1)], Piotr WIEJA[2)], Zbigniew KUCZERA[3)], Klaudia ZWOLIŃSKA-GLĄDYS[4)], Piotr ŻYCZKOWSKI[5)], Marek BOROWSKI[6)]

[1)] AGH Akademia Górniczo-Hutnicza; ORCID: 0000-0001-6897-8679
[2)] WENT-KOMPLEX
[3)] AGH Akademia Górniczo-Hutnicza; ORCID: 0000-0001-8130-5102
[4)] AGH Akademia Górniczo-Hutnicza; ORCID: 0000-0003-4581-3489
[5)] AGH Akademia Górniczo-Hutnicza; ORCID: 0000-0003-1573-9943
[6)] AGH Akademia Górniczo-Hutnicza; ORCID: 0000-0003-4736-4824

http://doi.org/10.29227/IM-2024-02-91

Submission date: 22-11-2024 | Review date: 23-12-2024

Abstrakt

W przypadkach, gdy wentylacja grawitacyjna nie zapewnia skutecznej wymiany powietrza, niezbędnym rozwiązaniem jest wdrożenie systemu wentylacji mechanicznej. Konieczność stosowania wentylacji mechanicznej w zakładach obróbki drewna uzależniona jest od wielu aspektów, w tym możliwości występowania w stolarni czynników szkodliwych dla zdrowia, wielkości powierzchni pomieszczenia i jego przeznaczenia, rodzaju i częstotliwości wykonywanych prac (obróbka drewna – cięcie, szlifowanie; montaż mebli), stosowania i skuteczności używanych odciągów miejscowych oraz sposobu rozprzestrzeniania się zanieczyszczenia powietrza w pomieszczeniu. W artykule przedstawiono możliwości zastosowania systemów wentylacji mechanicznej mającej na celu zapewnienie pracownikom warunków bezpieczeństwa i higieny pracy, bezpieczeństwa przeciwpożarowego oraz bieżącego oczyszczania stanowisk z wiórów, trocin i odpadów, powstających w trakcie obróbki drewna. Podstawą analizy jest instalacja wywiewna odpylająca (pneumatycznego odwiórowania maszyn stolarskich) pomieszczeń mechanicznej obróbki drewna oraz instalacja nawiewna kompensacyjna, która doprowadza powietrze do pomieszczeń, w których zastosowano odciągi miejscowe, jak również instalacja wentylacyjna nawiewno-wywiewna pomieszczeń montażowych. W artykule przedstawiono również analizę wariantową (100% i 50% pracy obrabiarek), która wskazuje na możliwość znacznych oszczędności energetycznych i kosztowych przy jednoczesnym zachowaniu wysokiej skuteczności odpylania i jakości powietrza.

Słowa kluczowe: *wentylacja miejscowa, odciągi miejscowe, instalacja nawiewno-wywiewna, cyklon, odpylanie*

1. Wstęp

W przemyśle drzewnym, wykorzystującym urządzenia i różnego rozmiaru obrabiarki do cięcia, szlifowania, heblowania, oklejania obrzeży, wiercenia otworów pod kołki itp., powstają duże ilości zanieczyszczeń takich jak: pył drzewny, trociny, wióry czy inne odpady. Zanieczyszczenia te są w wielu przypadkach szkodliwe dla zdrowia (kancerogenne) i mogą wywoływać objawy alergiczne (np. astma). Pył drzewny jest łatwopalny i posiada właściwości wybuchowe, dlatego ważne jest zwrócenie uwagi w zakładach mechanicznej obróbki drewna na ochronę przeciwpożarową, w tym czystość na stanowiskach pracy. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury w sprawie warunków jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [1], wentylacja powinna zapewniać odpowiednią jakość środowiska wewnętrznego, w tym wielkość wymiany powietrza, jego czystość, temperaturę, wilgotność względną, prędkość ruchu w pomieszczeniu, przy zachowaniu przepisów odrębnych i wymagań polskich norm dotyczących wentylacji, a także warunków bezpieczeństwa pożarowego i wymagań akustycznych określonych w rozporządzeniu. Wentylację mechaniczną należy zapewnić w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi, w pomieszczeniach bez otwieranych okien, a także w innych pomieszczeniach, w których ze względów zdrowotnych, technologicznych lub bezpieczeństwa konieczne jest zapewnienie wymiany powietrza. W przypadku zakładu obróbki drewna, system wentylacyjny ma za zadanie stworzyć odpowiednie środowisko pracy oraz separację cząstek stałych wytwarzanych przy obróbce drewna w celu dalszego przetwarzania na nowe materiały (np. płyty MDF) albo na energię, kiedy stosowane są jako biopaliwo.

Odpylanie w stolarni to jeden z najważniejszych elementów organizacji pracy w warsztacie stolarskim. Pył drzewny, powstający podczas cięcia, szlifowania czy frezowania drewna, nie tylko wpływa na jakość powietrza, ale także na zdrowie pracowników, bezpieczeństwo przeciwpożarowe oraz wydajność maszyn. W artykule omówiono istotność odpylania i wentylacji zakładów stolarskich oraz rozwiązania stosowane w systemach odpylania.

Celem niniejszego artykułu jest analiza systemów wentylacyjnych w zakładach stolarskich, ich wpływu na jakość powietrza oraz opracowanie optymalnych rozwiązań w zakresie odpylania.

2. Jakość i stan powietrza w zakładzie obróbki drewna

Na jakość powietrza w pomieszczeniach mogą wpływać zanieczyszczenia fizyczne, chemiczne oraz biologiczne. W wielu branżach emitowane są zanieczyszczenia pyłowe, gazowe, a także ciepło zagrażające zdrowiu pracowników. Pył drzewny jest uznawany za szkodliwy dla zdrowia. Może powodować alergię, astmę, a długotrwała ekspozycja na pył drobnoziarnisty może prowadzić do poważniejszych schorzeń, takich jak przewlekłe choroby układu oddechowego, a nawet raka. Dobrze zaprojektowany system odpylania redukuje te zagrożenia, zapewniając obniżenie zapylenia po-

(a) (b) (c) (d)

Rys. 1. Maszyny do obróbki drewna: (a) wyrówniarko-grubościówka, strugarka; (b) piła taśmowa pionowa; (c) piła do drewna;(d) frezarka [22-25]
Fig. 1. Woodworking machines: (a) planer-thicknesser, planer; (b) vertical band saw; (c) vood saw machine; (d) milling machine [22-25]

(a) (b)

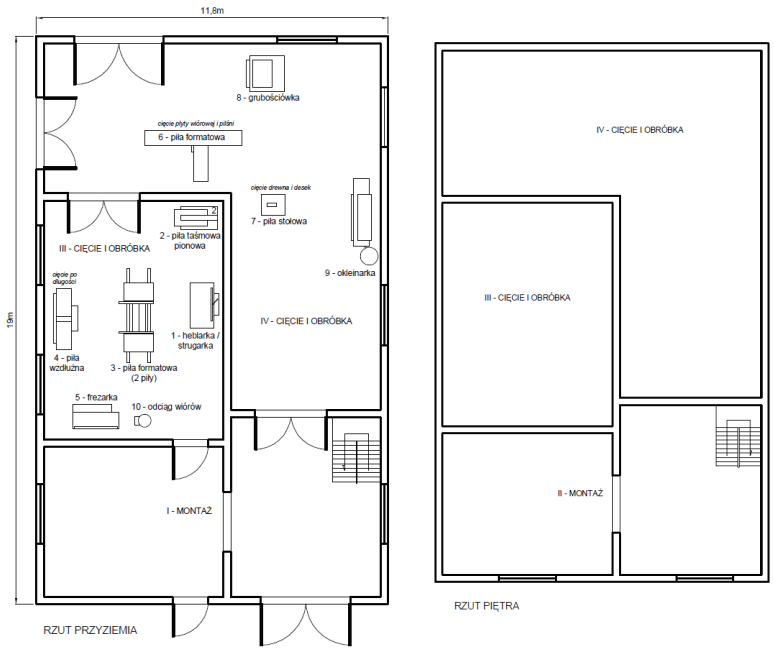
Rys. 2. Piła formatowa do drewna: (a) piła formatowa; (b) piła formatowa – 2 piły, 2 silniki [26, 27]
Fig. 2. Sliding table saw for wood: (a) sliding table saw; (b) sliding table saw – 2 saws, 2 motors [26, 27]

wietrza poniżej NDS (najwyższe dopuszczalne stężenie). Nagromadzony pył drzewny jest wysoce łatwopalny i może stanowić przyczynę pożaru lub nawet wybuchu. Dlatego regularne odpylanie przestrzeni roboczych i instalacja odpowiednich systemów filtracyjnych są kluczowe w celu zapewnienia bezpiecznych stanowisk pracy. Pył osiadający na maszynach i narzędziach może obniżać ich wydajność oraz powodować szybsze ich zużycie.

Rewolucja higieniczna w latach 50. XIX wieku spowodowała znaczne zainteresowanie czystością powietrza w pomieszczeniach. Z kolei w latach 60 ubiegłego wieku zwiększono nacisk na jakość powietrza zewnętrznego, a później także na zużycie energii [2]. Obecnie temat zapewnienia odpowiednich warunków pracy bardzo często pojawia się w pracach badawczych i publikacjach naukowych [3-5]. Wpływ warunków na stanowisku pracy, w tym także jakości powietrza, na zdrowie pracowników jest szeroko analizowane zwłaszcza w odniesieniu do układu oddechowego [6,7]. Wiele prac skupiło się na temacie efektywności wychwytywania zanieczyszczeń. Najlepsze efekty można osiągnąć stosując lokalne urządzenia wyciągowe w pobliżu źródła zanieczyszczeń. Analizę wpływu poszczególnych parametrów na skuteczność odciągów miejscowych zamieszczono w pracy Huang i in. [8]. Zhang i in. [9] wykazali, że zastosowanie strumienia promieniowego na zewnętrznej krawędzi okrągłego okapu wyciągowego może znacząco zwiększyć efektywność i energooszczędność pracy urządzeń. Wiele badań skupia się także na współpracy wentylacji miejscowej i ogólnej. Jak zauważyli He i in. [10] odpowiednia współpraca może zapewnić wysoką skuteczność wychwytywania zanieczyszczeń przy znacząco niższych kosztach. Z kolei w swojej pracy Liu i in. [11] podkreślili, że znaczenie ma nie tylko odpowiednie indywidualne ukształtowanie pojedynczego okapu, ale także odpowiedni profil dla okapów pracujących wspólnie. W pracy Chen i in. [12] zaproponowano wzmocniony wyciąg z wieloma niezależnymi wlotami ograniczający stężenie zanieczyszczeń i koszty pracy.

Jednym z najczęściej występujących zagrożeń w przemyśle są zanieczyszczenia związane z obróbką drewna. Międzynarodowa Agencja Badań nad Rakiem (International Agency for Research on Cancer) jednoznacznie uznała pył drzewny jako rakotwórczy dla ludzi [13]. Osadzanie się pyłu drzewnego w jamie nosowej zależy od jego typu i wielkości cząstek [14]. Wiele prac szczegółowo wykazało niekorzystny wpływ pyłu drzewnego na zdrowie i życie pracowników [15-17]. Stąd autorzy skupili się nie tylko na obniżeniu kosztów systemów odpylania, ale przede wszystkim na zapewnieniu wysokiej jakości powietrza w miejscu pracy. W artykule Inthavong i in. [18], autorzy analizowali pięć systemów wentylacji uwzględniając stężenie pyłów na wysokości oddychania pracownika, co ma decydujące znaczenie w aspekcie zdrowia pracownika. W literaturze znaleźć można liczne propozycje odpowiednich rozwiązań, między innymi indywidualne rozwiązania ograniczające emisję pyłu dla szlifierek ręcznych [19] i innych maszyn ręcznych do obróbki drewna [20]. Analizowano także najlepsze rozwiązania filtrów stosowanych w obróbce drewna [21].

Celem artykułu jest zwrócenie uwagi na wymagania jakości powietrza w zakładzie stolarskim, które uzyskać można przy użyciu właściwie działającego systemu wentylacji mechanicznej. Dobrze zaprojektowana instalacja wentylacyjna spełnia wymagania dotyczące warunków bezpieczeństwa i higieny pracy, bezpieczeństwa przeciwpożarowego oraz bieżącego oczyszczania stanowisk z wiórów, trocin i odpadów, powstających w trakcie obróbki drewna. W zakres projektu wchodzi instalacja wywiewna (instalacja pneumatycznego odwiórowania maszyn stolarskich), nawiewna kompensacyjna pomieszczeń cięcia i obróbki drewna oraz system wentylacji nawiewno-wywiewnej pomieszczeń montażu. Zadaniem instalacji pneumatycznego odwiórowania maszyn stolarskich jest usuwanie powstających podczas ich pracy zanieczyszczeń i przesyłanie ich do zbiornika poza pomieszczenia produkcyjne. Elementy instalacji to: ssawki, przewody transportujące zanieczyszczenia, łuki, trójniki, zasuwy regulacyjne i odcinające, urządzenia oddzielające transportowany materiał od powietrza (chwytacz klocków, odpylacz cyklonowy) oraz wentylator transportowy. Frezarka posiada indywidualne urządzenie oczyszczające powietrze. W celu zrównoważenia



Rys. 3. Rzut pomieszczeń warsztatu stolarskiego: (a) rzut przyziemia z lokalizacją maszyn stolarskich; (b) rzut piętra

Fig. 3. Plan of the carpentry workshop rooms: (a) ground floor plan with the location of carpentry machines; (b) first floor plan

ubytków powietrza w pomieszczeniach mechanicznej obróbki drewna zastosowano nawiew kompensacyjny w ilości odpowiadającej ilości odciąganego powietrza. W pomieszczeniach montażowych zastosowano wentylację mechaniczną nawiewno-wywiewną z odzyskiem ciepła.

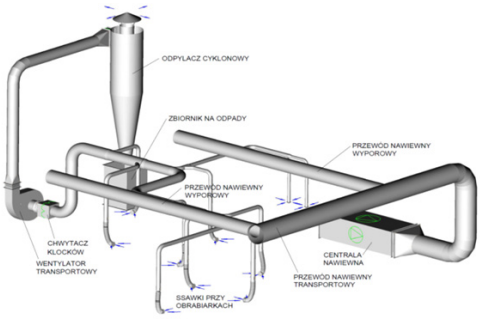
3. Systemy wentylacji i odpylania zakładów stolarskich

Wentylacja w zakładach stolarskich odgrywa kluczową rolę w zapewnieniu odpowiednich warunków pracy. Wentylacja naturalna to najprostszy sposób wymiany powietrza, polegający na otwieraniu okien, drzwi lub stosowaniu otworów wentylacyjnych. System taki jest skuteczny w małych warsztatach, gdzie poziom zanieczyszczenia powietrza jest niski. Wentylacja mechaniczna polega na wymuszonym przepływie powietrza za pomocą wentylatorów. System ten obejmuje instalację nawiewną i wywiewną, które wymieniają powietrze w całym pomieszczeniu. W zakładach, w których stosowane są odciągi miejscowe do kompensacji strumieni powietrza (powietrza wywiewanego) stosuje się odpowiednio zaprojektowane układy nawiewne lub otwory kompensacyjne. Wydajność odciągów miejscowych i otworów kompensacyjnych musi być tak dobrana, aby w obiekcie/pomieszczeniu utrzymane było podciśnienie, które zapobiega wydostawaniu się zanieczyszczeń na zewnętrz budynku. Wentylacja miejscowa to najbardziej efektywny sposób usuwania zanieczyszczeń bezpośrednio w miejscu ich powstawania. W skład takiego systemu wchodzą okapy miejscowe, ssawki i kołnierze umieszczone na ramionach odciągowych oraz systemy odciągowe dla maszyn, które podłączone bezpośrednio do pił, frezarek i innych urządzeń odbierają pyły i trociny bezpośrednio podczas obróbki drewna. Na rysunku 1 i 2 przedstawiono maszyny stolarskie z przykładowymi rozwiązaniami przyłączy odciągów miejscowych.

W zakładach przemysłowych bardzo często stosowane są instalacje wentylacyjne łączące wentylację ogólną z wentylacją miejscową. Zakłady stolarskie na ogół wyposażone są w centralne systemy odciągu pyłów połączone z wentylacją mechaniczną ogólną, co zapewnia kompleksowe oczyszczanie powietrza i wymianę powietrza w przestrzeni roboczej. Skuteczna wentylacja w zakładach stolarskich to nie tylko kwestia spełnienia wymagań prawnych, ale przede wszystkim inwestycja w zdrowie pracowników i bezpieczeństwo pracy. Wybór odpowiedniego systemu wentylacyjnego zależy od skali wielkości zakładu, rodzaju wykonywanych prac, rozmieszczenia urządzeń, pił, strugarek i stanowisk pracy. Odpowiednio zaplanowana wentylacja – czy to naturalna, mechaniczna, czy miejscowa – przyczynia się do stworzenia środowiska pracy, które sprzyja zdrowiu, bezpieczeństwu i efektywności produkcji.

Systemy odpylania w zakładach stolarskich są kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa pracy, ochrony zdrowia pracowników oraz efektywności produkcji. Cyklony jako tradycyjne rozwiązanie, skutecznie separują większe cząstki pyłu i wiórów dzięki wykorzystaniu siły odśrodkowej, lecz ich efektywność spada w przypadku drobnych cząstek pyłu, co ogranicza ich zastosowanie w bardziej wymagających środowiskach. Filtry workowe, choć bardziej efektywne w usuwaniu drobnego pyłu, są droższe w eksploatacji, ponieważ wymagają częstej konserwacji i wymiany worków filtracyjnych. Nowoczesne multicyklony, będące połączeniem wielu cyklonów w jednej jednostce, oferują znacznie wyższą sprawność separacji przy zachowaniu niskich strat ciśnienia. Dzięki temu są bardziej energooszczędne i wydajne w środowiskach o dużym zapyleniu. Badania wykazały, że multicyklony mogą redukować stężenie drobnych pyłów o ponad 90%, co czyni je odpowiednimi dla zakładów, gdzie precyzyjna obróbka drewna generuje dużą ilość drobnych cząstek. Wybór odpowiedniego systemu odpylania zależy od specyfiki procesów produkcyjnych oraz wymagań dotyczących jakości powietrza w zakładzie.

Zadaniem odciągów miejscowych jest uchwycenie zanieczyszczonego powietrza u źródła powstawania zanieczysz-



Rys. 4. Widok instalacji nawiewnej oraz wywiewnej – wariant I
Fig. 4. View of the supply and exhaust installation – variant I

czeń, w jak najbardziej skoncentrowanej postaci, następnie doprowadzenie go do urządzeń oczyszczających lub usunięcie na zewnątrz w miejscu, gdzie nie będzie oddziaływać w sposób szkodliwy na otoczenie. W tym celu w strefie wydobywania się zanieczyszczeń wytwarzany jest taki ruch powietrza pod względem kierunku i prędkości, który pozwoli na ujęcie jak największej ilości zanieczyszczonego powietrza.

Projektowanie ssawek odciągowych wymaga uwzględnienia specyfiki maszyn i narzędzi, a brak danych technicznych można uzupełniać, korzystając z norm zawartych w [28-30].

W pomieszczeniach pracy powinna być zapewniona wymiana powietrza wynikająca z potrzeb użytkowych i przeznaczenia pomieszczeń, bilansu ciepła i wilgotności oraz zanieczyszczeń stałych i gazowych. W pomieszczeniach pracy, w których wydzielają się substancje szkodliwe powinna być zapewniona taka wymiana powietrza, aby średnie stężenie czynnika szkodliwego dla zdrowia nie przekraczało ustalonych poziomów NDS [31]. Co więcej instalacje wentylacji mechanicznej ogólnej i wyciągów miejscowych, znajdujące się w pomieszczeniu pracy, w którym wykorzystuje się obrabiarki, powinny być wykonane z materiałów niegromadzących ładunków elektrycznych.

Projektowanie i wdrażanie systemów wentylacyjnych w zakładach stolarskich musi uwzględniać normy i regulacje prawne, takie jak Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. dotyczące warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki [1], oraz Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych w środowisku pracy [31]. Normy te wymagają zapewnienia odpowiedniej wymiany powietrza, kontroli zapylenia oraz ochrony pracowników przed substancjami szkodliwymi. Ich wpływ na projektowanie systemów widoczny jest w doborze urządzeń spełniających określone limity emisji, takich jak cyklony o wysokiej efektywności separacji pyłów, czy w konieczności stosowania materiałów konstrukcyjnych ograniczających ryzyko iskier i wybuchów. Regulacje dotyczą także wymaganych prędkości transportowych powietrza w kanałach oraz precyzyjnego monitorowania stężeń pyłów, co zmusza projektantów do uwzględniania zaawansowanych systemów kontroli i pomiaru. Analiza tych norm podkreśla ich rolę jako narzędzi zapewniających bezpieczeństwo pracy, ale również wskazuje na potrzebę elastycznych i nowoczesnych rozwiązań technicznych, które pozwolą na optymalizację kosztów przy jednoczesnym zachowaniu zgodności z przepisami.

4. Instalacja wentylacji mechanicznej w zakładzie stolarskim – studium przypadku

4.1 Opis zakładu stolarskiego

Zakład stolarski, dla którego poddano pod analizę możliwości zabudowy systemu wentylacji znajduje się w województwie małopolskim. Jest to budynek wolnostojący z pustaków ceramicznych, po termomodernizacji, z dachem dwuspadowym. Wymiary zewnętrzne budynku to: szerokość 11,8 m, natomiast długość 19 m. Wysokość pomieszczeń w części produkcyjnej 4 m, a w części montażowej 2,6 m. W warsztacie pracuje 8 osób w trybie jednozmianowym. Dla analizowanego budynku zaprojektowano instalację składającą się z:

- instalacji wywiewnej odpylającej (instalacja pneumatycznego odwiórowania maszyn stolarskich) pomieszczeń mechanicznej obróbki drewna;
- instalacji nawiewnej – kompensacyjnej pomieszczeń mechanicznej obróbki drewna;
- wentylacji nawiewno-wywiewnej pomieszczeń montażowych.

Na rysunku 3 przedstawiono rzuty pomieszczeń na parterze i na piętrze wraz z lokalizacją maszyn stolarskich. W pomieszczeniach mechanicznej obróbki drewna znajdują się maszyny stolarskie takie jak: heblarka / strugarka (1), piła taśmowa pionowa (2), piła formatowa z dwoma piłami (3), piła wzdłużna (4), frezarka (5), piła formatowa (6), piła stołowa (7), grubościówka (8) i okleinarka (9). Strugarka (heblarka) jest maszyną stolarską przeznaczoną do wstępnej obróbki drewna. Piły formatowe umożliwiają przecinanie litego drewna i płyt z bardzo wysoką precyzją. Jest to spowodowane efektem zaprojektowanego systemu prowadzenia stołu formatowego. Frezarka to narzędzie, które pozwala na precyzyjne wykańczanie krawędzi czy robienie wpustów. Zadaniem grubościówki jest nadanie elementowi drewnianemu (desce, belce) określonej grubości. Okleiniarki to specjalistyczne urządzenia przeznaczone do precyzyjnego, szybkiego i bardzo dokładnego oklejania bocznych powierzchni płyt obrzeżami wykonanymi z tworzywa sztucznego [32].

4.2 Techniczne aspekty systemu wentylacyjnego

Projekt systemu wentylacji przedstawionego zakładu obejmuje układ instalacji pneumatycznego odwiórowania maszyn stolarskich oraz instalacji nawiewu kompensacyjnego, w tym umiejscowienie urządzeń wentylacyjnych, wytyczenie przebiegu przewodów wentylacyjnych, zdefiniowanie sposobu podłączenia obrabiarek do instalacji odciągowej i sposobu doprowadzenia powietrza kompensacyjnego do pomieszczeń

Tab. 1. Dane techniczne obrabiarek i systemu wywiewnego - wariant 1
Tab. 1. Technical data of the machine tools and exhaust system - variant 1

ZESTAWIENIE MASZYN I URZĄDZEŃ	Charakterystyka obrabiarki	Rodzaj powstających odpadów	Strumień odciąganego powietrza przez ssawki	Minimalna prędkość odciągowa (transportowa)	Średnica przyłącza wg typoszeregu	Rzeczywista prędkość przepływu	Współczynnik oporu miejscowego ssawki	Uwagi
			[m³/h]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[-]	
1 – heblarka/strugarka	szerokość strugania 400 mm	wióry	1000	17	140	18,1	1,0	Ssawka czołowa z kołnierzem
2 – piła taśmowa pionowa	średnica koła taśm. 800 mm	trociny	1000	15	140	18,1	2,0	Wspólny odciąg z ssawki górnej i dolnej
3 – piła formatowa (2 piły)	średnica tarczy do 500 mm	trociny	1200	16	150	18,9	1,5	Ssawka górna 300 (osłona piły), ssawka dolna 900
	średnica tarczy do 500 mm	trociny	1200	16	150	18,9	1,5	
4 – piła formatowa (cięcie po długości)	średnica tarczy do 500 mm	trociny	1200	16	150	18,9	1,5	
6 – piła formatowa (cięcie płyty wiórowej i pilśni)	średnica tarczy do 500 mm	trociny	1200	16	150	18,9	1,5	
7 – piła stołowa (cięcie drewna / desek)	średnica tarczy 350-500 mm	trociny	800	15	125	18,1	1,0	Osłona górna 200, ssawka dolna 600
8 – grubościówka	szerokość strugania 500 mm	wióry	1100	17	140	19,9	1,5	Ssawka czołowa z kołnierzem
9 – okleinarka do płyty wiórowej	brak danych	dym/opary	600	10	140	10,8	1,0	Odciąg z obudowy

oraz dobór układu oczyszczania z odpylaczem cyklonowym.

Na podstawie literatury przyjęto strumienie objętościowe odciąganego powietrza dla obrabiarek:

- piły formatowe – 1200 m³/h;
- grubościówka – 1100 m³/h;
- heblarka i piła taśmowa – 1000 m³/h;
- piła stołowa 800 m³/h;
- okleinarka – 600 m³/h.

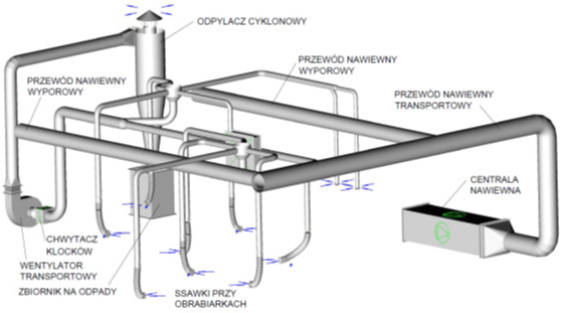
Prędkość transportowa powietrza, która powinna zapewnić przemieszczanie cząstek zanieczyszczonego powietrza w przewodach odpylających nie może być zbyt niska. Prędkość powietrza powinna wzrastać w miarę zbliżania się do wentylatora. W przemyśle drzewnym przyjmuje się następujące prędkości transportowe w magistrali w zależności od rodzaju odpadów drzewnych [33]:

- pył drzewny – 12÷15 m/s – oddzielne instalacje od szlifierek;
- trociny i wióry suche – 16÷20 m/s – odwiórowanie maszyn stolarskich;
- trociny i wióry mokre – 18÷27 m/s – instalacje odwiórowania w tartakach.

Dla rozważanego zakładu i stosowanych obrabiarek przyjęto prędkości transportowe wynoszące 15-17 m/s.

W instalacjach odwiórowania maszyn stolarskich stosuje się wyłącznie przewody proste o przekroju kołowym, o ściankach gładkich z blachy stalowej czarnej lub ocynkowanej o grubości s = 1,5÷2 mm. Łuki dla wydłużenia ich żywotności wykonuje się z blachy o grubości s = 2÷3 mm i promieniach R=1,5D, 2,0D i 3,0D. Standardowy promień 1,0D daje wyższe wartości współczynników oporu miejscowego. Trójniki powinny posiadać kąt włączenia króćca odgałęzienia jak najmniejszy (nie większy niż 30°), a kąt rozwarcia dyfuzora na przelocie powinien wynosić od 12° do 15°. Wlot odgałęzienia powinien znajdować się z boku lub z góry kształtki. Klapy rewizyjne (otwory kontrolne) powinny znajdować się w miejscach, w których może dochodzić do zatorów transportowanego powietrza (trójniki, łuki, zasuwy). Do regulacji strumieni powietrza przepływającego przez instalację na odgałęzieniach instalacji stosuje zasuwy skośne, uniemożliwiające całkowite zamknięcie przekroju kanału. Zasuwy proste pozwalają na całkowite zamknięcie przepływu przez nieużywane odgałęzienie.

W instalacjach odwiórowania maszyn stolarskich wykorzystywane są również urządzenia, których zadaniem jest oddzielenie transportowanego materiału od powietrza. Do zatrzymania większych cząstek zanieczyszczeń przed wentylatorem montuje się chwytacz klocków. W ten sposób zabezpiecza się wirnik wentylatora przed uszkodzeniem dużymi kawałkami drewna znajdującymi się w strumieniu transportowanego powietrza. W celu oddzielenia wiórów i trocin od powietrza stosuje się cyklony i multicyklony. Cyklon składa się z wlotu, części cylindrycznej, części stożkowej, kanału wylotowego oraz spustu pyłu ze zbiornikiem. W cyklonie zanieczyszczone powietrze doprowadzone stycznie z odpowiednią prędkością do górnej cylindrycznej części komory i wiruje w niej, w wyniku czego unoszące się w powietrzu cięższe od niego składniki są odrzucane na zewnątrz pod działaniem siły odśrodkowej. W wyniku tarcia o ścianki cyklonu tracą prędkość (energię kinetyczną) i opadają pod wpływem grawitacji, a oczyszczone powietrze po wykonaniu 1,5÷2 obrotów wypływa w górę, przez centralnie umieszczony kanał. Na skuteczność działania cyklonu mają wpływ: wzajemne proporcje wymiarowe poszczególnych elementów cyklonu, prędkość ruchu powietrza w jego wnętrzu, właściwości fizykochemiczne odpylanego pyłu (stężenie, skład ziarnowy), własności elektrostatyczne, wilgotność oraz skłonność do koagulacji [34, 35].



Rys. 5. Widok instalacji nawiewnej oraz wywiewnej – wariant II
Fig. 5. View of the supply and exhaust installation – variant II

W zakładach przemysłu drzewnego zalecane jest stosowanie cyklonów typu D [28]. Typoszereg ten obejmuje 15 wielkości o przepływach powietrza od 840 do 35500 m³/h. Cyklony produkowane są w wykonaniu prawoskrętnym oraz lewoskrętnym. Cyklony mogą pracować w części nadciśnieniowej lub podciśnieniowej. Prędkość powietrza wlotowa do cyklonu powinna zawierać się w przedziale 15÷25 m/s. Zwiększenie prędkości wlotowej poprawia skuteczność odpylania, podobnie jak zmniejszenie średnicy i wydłużenie płaszcza cyklonu. Stosowanie przy wyższych strumieniach odpylanych gazów odpylaczy cyklonowych bateryjnych (dwóch lub więcej cyklonów pojedynczych połączonych w baterię) daje wyższą sprawność odpylania i smuklejszą budowę (mniejsza wysokość) niż w przypadku cyklonów pojedynczych przy równorzędnych oporach przepływu powietrza [28].

4.3 Koncepcja instalacji wentylacyjnej – warianty pracy systemu

Dla analizowanego zakładu zaprojektowano system wentylacji z odciągami miejscowymi i instalacją nawiewną w dwóch wariantach. Wariant 1 to jednoczesna praca wszystkich obrabiarek (100%), a łączny strumień wywiewanego powietrza wynosi 9300 m³/h, system wywiewny jest układem magistralnym (rys. 4).

Szczegółowe dane systemu wentylacji (wariant 1) zestawiono w tabeli 1.

Łączny strumień objętościowy usuwanego powietrza przez ssawki wynosi 9 300 m³/h. Zaprojektowano układ scentralizowany – do przewodu zbiorczego (magistrali) podłączone są kolejne odgałęzienia, a średnica magistrali zwiększa się stopniowo w miarę dopływu nowych objętości powietrza. Odpowiednie stopniowanie średnic powoduje uzyskanie wymaganych prędkości na całej długości magistrali. Zastosowanie zasuw skośnych na każdym odgałęzieniu umożliwia regulację strumieni odciąganego powietrza. Zanieczyszczone powietrze odprowadzane jest przewodem zbiorczym na zewnątrz budynku do znajdującego się tam chwytacza klocków. Następuje w nim wychwytywanie większych kawałków drewna w celu ochrony wirnika wentylatora. Za chwytaczem klocków znajduje się wentylator promieniowy, który przetłacza zanieczyszczone powietrze do znajdującego się za nim cyklonu, w którym następuje oddzielenie trocin i wiórów od powietrza. Cyklon znajduje się w układzie nadciśnieniowym i jest osadzony na zbiorniku o dużej objętości, który po każdorazowym napełnieniu wiórami i trocinami zostaje opróżniony. Oczyszczone powietrze uchodzi do atmosfery poprzez kanał wylotowy i umieszczoną na jego zakończeniu wyrzutnię dachową typu C. W całej instalacji zastosowano przewody o ścianach gładkich o grubości 1÷1,5 mm, a typowe kształtki (łuki, trójniki) oraz nietypowe elementy sieci (dyfuzory, konfuzory, przejścia) wykonane są z blachy stalowej o grubości 2 mm.

Do nawiewu powietrza kompensacyjnego zastosowano centralę wentylacyjną nawiewną. Centrala tłoczy do budynku świeże powietrze kanałem z blachy ocynkowanej o przekroju okrągłym. Dla pomieszczeń dobrano jeden kanał transportowy wykonany z nieprzepuszczającej powietrze przez powierzchnię tkaniny poliestrowej (typ NMS) i dwa kanały nawiewne wykonane z przepuszczającej powietrze przez powierzchnię tkaniny z włókien poliestrowych (typ PMS). System tekstylnych kanałów wentylacyjnych jest rozwiązaniem gwarantującym równomierne i spokojne (nieturbulentne) rozprowadzanie powietrza w pomieszczeniach.

Dodatkowo frezarka posiada na wyposażeniu indywidualny odpylacz workowy dwustopniowy (cyklon + filtr) do trocin i wiórów typu ZOT. W celu wyrównania ciśnień pomiędzy pomieszczeniami ciecia i montażu zastosowano kratki wyrównawcze. Dla skompensowania wywiewanego powietrza 10 230 m³/h dobrano centralę wentylacyjną nawiewną o wydajności 9 300 m³/h (tabela 3).

W wariancie drugim założono jednoczesną pracę połowy obrabiarek (50%), co pozwoliło na zmniejszenie strumienia wywiewanego powietrza o połowę – 4 700 m³/h, a system wywiewny pracuje w układzie kolektorowym (rys. 5).

Szczegółowe dane systemu wentylacji (wariant 2) zestawiono w tabeli 2.

Łączny strumień objętościowy usuwanego powietrza przez ssawki wynosi 4 700 m³/h. Zaprojektowano układ kolektorowy. W obrębie pomieszczenia odciągi z obrabiarek podłączone są do położonego centralnie wspólnego kolektora z dolnym odprowadzeniem powietrza w stronę wentylatora wywiewnego. Układ kolektorowy przy zastosowaniu zasuw na rozgałęzieniach pozwala na sekcyjne działanie określonej liczby odciągów w zależności od potrzeb technologicznych. Ponadto w przypadku przemieszczenia obrabiarek lub innej adaptacji odciągów miejscowych, odbywają się one bez szkody dla całej instalacji. Zastosowanie odpowiednich średnic przewodów do kolektorów powoduje uzyskanie wymaganych prędkości na całej długości magistrali. Wykonanie pozostałej części instalacji wywiewnej (przewody, wentylator ssący, cyklon) są identyczne jak w wariancie 1.

Do nawiewu kompensacyjnego zastosowano centralę wentylacyjną nawiewną współpracującą z przewodami tekstylnymi, jak w wariancie 1, które umożliwiają równomierny nawiew strumienia powietrza do przestrzeni roboczej.

Tab. 2. Dane techniczne obrabiarek i systemu wywiewnego - wariant 2.
Tab. 2. Technical data of the machine tools and exhaust system - variant 2.

ZESTAWIENIE MASZYN I URZĄDZEŃ	Charakterystyka obrabiarki	Rodzaj powstających odpadów	Strumień odciąganego powietrza przez ssawki	Minimalna prędkość odciągowa (transportowa)	Średnica przyłącza wg typoszeregu	Rzeczywista prędkość przepływu	Współczynnik oporu miejscowego ssawki	Uwagi
			[m³/h]	[m/s]	[mm]	[m/s]	[-]	
2 – piła taśmowa pionowa	średnica koła taśm. 800 mm	trociny	1000	15	140	18,1	2,0	Wspólny odciąg z ssawki górnej i dolnej
4 – piła formatowa (cięcie po długości)	średnica tarczy do 500 mm	trociny	1200	16	150	18,9	1,5	Ssawka górna 300 (osłona piły), ssawka dolna 900
7 – piła stołowa (cięcie drewna / desek)	średnica tarczy 350-500 mm	trociny	800	15	125	18,1	1,0	Osłona górna 200, ssawka dolna 600
8 – grubościówka	szer. strugania 500 mm	wióry	1100	17	140	19,9	1,5	Ssawka czołowa z kołnierzem
9 – okleinarka do płyty wiórowej	brak danych	opary/dym	600	10	140	10,8	1,0	Odciąg z obudowy

W tabeli 3 zestawiono parametry dobranych systemów wentylacji i odciągów zanieczyszczeń wraz z układem separacji pyłów i trocin.

Analiza korzyści i ograniczeń obu podejść (wariant I i II) pozwala ocenić ich efektywność i dostosowanie do zmiennych potrzeb zakładu stolarskiego. Wariant I, charakteryzujący się pełną pracą wszystkich obrabiarek, zapewnia maksymalną wydajność systemu odpylania (strumień powietrza 10 230 m³/h) oraz optymalną skuteczność w usuwaniu zanieczyszczeń, co jest kluczowe w przypadku intensywnej produkcji. Niemniej, wysoka moc elektryczna wentylatora (42 kW) i nagrzewnicy wodnej (119,6 kW) generują znaczne koszty operacyjne, co może stanowić wyzwanie w przypadku długotrwałego użytkowania. Wariant II, zakładający pracę połowy obrabiarek, znacząco redukuje zapotrzebowanie energetyczne (moc wentylatora 16,4 kW, nagrzewnicy 60,3 kW) oraz strumień powietrza (5 170 m³/h), co prowadzi do niższych kosztów eksploatacyjnych. Mimo to, ograniczona wydajność instalacji może nie sprostać pełnym potrzebom produkcyjnym w okresach wzrostu obciążenia. Kluczową korzyścią wariantu II jest jego elastyczność, umożliwiająca dostosowanie do mniejszych obciążeń technologicznych, co sprawia, że jest bardziej energooszczędny i zrównoważony środowiskowo. Wybór odpowiedniego wariantu powinien zależeć od przewidywanej intensywności pracy i strategii operacyjnej zakładu.

Porównanie zapotrzebowania energetycznego wariantu 1 i wariantu 2 pozwala na ocenę potencjalnych oszczędności energii. W wariancie 1, całkowita moc elektryczna systemu wynosi 42 kW dla wentylatora oraz 119,6 kW dla nagrzewnicy wodnej, co daje łączną moc 161,6 kW. W wariancie 2 wartości te wynoszą odpowiednio 16,4 kW dla wentylatora i 60,3 kW dla nagrzewnicy, co łącznie daje 76,7 kW. Oznacza to redukcję zużycia energii o 84,9 kW, czyli około 52,5%. Przy założeniu 8-godzinnej zmiany roboczej, w ciągu jednego dnia pracy można zaoszczędzić około 679,2 kWh energii. W skali miesiąca (22 dni robocze) oszczędności mogą wynieść ponad 14 942 kWh, co przekłada się na znaczną redukcję kosztów eksploatacyjnych i mniejszy ślad węglowy zakładu.

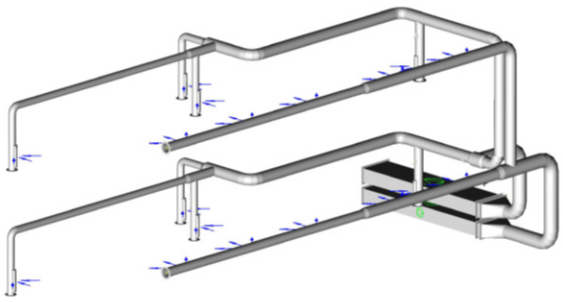
4.4 Koncepcja systemu wentylacji pomieszczeń montażowych

Do pomieszczeń montażowych zaprojektowano osobny układ wentylacji (rysunek 6), którego wydajność określono na poziomie 1 690 m³/h (montaż I i montaż II, odpowiednio po 845 m³/h).

Do dystrybucji powietrza zastosowano centralę wentylacyjną nawiewno-wywiewną z wymiennikiem krzyżowym i nagrzewnicą elektryczną (CLIMA GOLD typ OPTIMA--NW-1-L-WK-He-T1/T1-D-1700/1700) o wydajność 1 700 m³/h, sprężu dyspozycyjnym 100 Pa i obrotach 2854 min^{-1} silnika EC o znamionowej mocy elektrycznej 0,50 kW. Moc nagrzewnicy elektrycznej to 7,1 kW przy temperaturze nawiewanego powietrza 19°C. Parametry punktu pracy wentylatora wywiewnego wynoszą odpowiednio wydajność 1700 m³/h, spręż dyspozycyjny 180 Pa przy prędkości obrotowej silnika EC równej 2948 min^{-1} i mocy elektrycznej 0,78 kW.

4.5 Dyskusja przyjętych rozwiązań

Zaprezentowane w artykule rozwiązania wentylacyjne wyróżniają się innowacyjnością w stosunku do istniejącej wiedzy dzięki zastosowaniu tekstylnych kanałów wentylacyjnych, które zapewniają równomierne, nieturbulentne rozprowadzanie powietrza, eliminując lokalne strefy zapylenia, co jest rzadkością w tradycyjnych instalacjach opartych na sztywnych kanałach blaszanych. Dodatkowo uwzględniono nowoczesne cyklony o zoptymalizowanych proporcjach wymiarowych, które cechują się większą efektywnością separacji pyłów w porównaniu do standardowych systemów filtracyjnych, a także indywidualne odpylacze przy maszynach, zwiększające elastyczność systemu. W porównaniu z alternatywnymi rozwiązaniami stosowanymi w zakładach stolarskich, projekt wyróżnia się elastycznością dzięki wariantom pracy (100% i 50% wykorzystania obrabiarek), co pozwala na dostosowanie wydajności systemu do zmiennych potrzeb zakładu. Innowacyjne podejście łączy zaawansowane technologie z efektywnością energetyczną, wykraczając poza standardowe praktyki i oferuje kompleksowe rozwiązania zapewniające wyższe bezpieczeństwo, lepszą jakość powietrza oraz oszczędności w eksploatacji.



Rys. 6. Schemat wentylacji nawiewno-wywiewnej pomieszczeń montażowych
Fig. 6. View of supply and exhaust ventilation of assembly rooms

Tab. 3. Zestawienie parametrów pracy systemów wentylacji w wariancie I i II
Tab. 3. Summary of ventilation system operating parameters in variants I and II

Wyszczególnienie	Wariant I	Wariant II
System ssący:		
Strumień objętości powietrza, m^3/h	10 230	5 170
Strata ciśnienia, Pa	3 987	4 006
Typ wentylatora	WPT-50	WPT-31,5
Moc elektryczna wentylatora, kW	42	16,4
Obroty wentylatora, min^{-1}	1 615	2 850
Parametry cyklonu:		
Średnica części cylindrycznej, m	1,077	0,766
Całkowita wysokość, m	5,063	3,600
Strata ciśnienia, Pa	1 200	1 200
Parametry systemu nawiewnego:		
Strumień objętości powietrza, m^3/h	9 300	4 700
Strata ciśnienia, Pa	230	241
Typ centrali wentylacyjnej	OPITMA-N-4-L-Hw-T1/T1-D-9300	OPITMA-N-3-L-Hw-T1/T1-D-9300
Moc nagrzewnicy wodnej (60/40), kW	119,6	60,3

Praktyczne wskazówki dla zakładów stolarskich różnej wielkości koncentrują się na optymalnym dostosowaniu systemów wentylacyjnych do skali produkcji i specyfiki działalności. W małych warsztatach, gdzie liczba urządzeń jest ograniczona, a poziom zapylenia stosunkowo niski, wystarczające mogą być lokalne odciągi pyłów połączone z centralą wentylacyjną o umiarkowanej wydajności oraz kompaktowe odpylacze, takie jak filtry workowe lub niewielkie cyklony. Dla średnich zakładów, gdzie liczba maszyn i intensywność pracy są większe, zaleca się stosowanie centralnych systemów odpylania z możliwością sekcyjnego wyłączania poszczególnych odciągów, co umożliwia dostosowanie wydajności do bieżących potrzeb. W dużych zakładach, z wieloma urządzeniami pracującymi jednocześnie, kluczowe znaczenie mają układy magistralne z tekstylnymi kanałami wentylacyjnymi i multicyklonami o wysokiej sprawności separacji.

5. Podsumowanie

Skuteczny system wentylacji w zakładach stolarskich musi spełnić wymagania uwarunkowane przepisami prawnymi, ale przede wszystkim zapewniać właściwe warunki pracy gwarantujące bezpieczne użytkowanie. Zdrowie pracowników i bezpieczeństwo pracy są zatem kluczowymi aspektami podczas procesu projektowania systemu wentylacji. Efektywny system wentylacji zakładu stolarskiego to instalacja pozwalająca na odprowadzenie zanieczyszczonego powietrza bezpośrednio z miejsca emisji, ograniczając jego rozprzestrzenianie się w pomieszczeniu i zapewniająca dopływ powietrza świeżego.

Przedmiotem analizy jest budynek stolarni w którym zaprojektowano instalację składającą się z instalacji wywiewnej odpylającej i kompensacyjnej instalacji nawiewnej pomieszczeń mechanicznej obróbki drewna oraz wentylacji nawiewno-wywiewnej pomieszczeń montażowych. Separacja drobnych cząstek drewna (wióry, trociny, pył drzewny) powstających w wyniku mechanicznej obróbki drewna odbywa się prawie wyłącznie przy zastosowaniu urządzeń o działaniu ciągłym. Powoduje to wysoką energochłonność transportu pneumatycznego, wyrażająca się znacznie większym nakładami energetycznymi na jednostkę transportowanego materiału. W niniejszej pracy przedstawiono projekt instalacji i dobór urządzeń przy jednoczesnej pracy wszystkich obrabiarek (wariant 1) i przy połowie pracujących urządzeń (wariant 2). Zapotrzebowanie mocy elektrycznej dla wariantu 1 wynosi 47 kW, a zapotrzebowanie ciepła do ogrzania nawiewanego powietrza 120 kW. W przypadku wariantu 2 zapotrzebowanie to wynosi odpowiednio 18,5 kW oraz 60 kW. W pomieszczeniach montażowych zastosowana centrala wentylacyjna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła charakteryzuje się poborem mocy elektrycznej na poziomie 10 kW. Moc odzysku ciepła w wymienniku krzyżowym to 15 kW. Zastosowanie w analizowanym zakładzie stolarskim wariantu z jednoczesną pracą 50% obrabiarek przyniesie wiele oszczędności związanych z nakładem środków finansowych na wykonanie i eksploatację instalacji wentylacyjnych, ale również wymagać będzie właściwej organizacji pracy w zakładzie.

Dodatkowym aspektem podkreślającym znaczenie zaprojektowanego systemu wentylacji jest jego elastyczność i możliwość dostosowania do zmieniających się potrzeb zakładu. Zastosowanie wariantu pracy z 50% wykorzystaniem urządzeń umożliwia znaczące oszczędności energetyczne i redukcję kosztów eksploatacyjnych, co czyni system bardziej zrównoważonym. Jednocześnie zaprojektowane rozwiązania, takie jak tekstylne kanały wentylacyjne czy cyklony o zoptymalizowanych wymiarach, zapewniają skuteczne usuwanie zanieczysz-

czeń i lepszą jakość powietrza w pomieszczeniach roboczych.

Przedstawione w artykule rozwiązania wentylacyjne mają nie tylko znaczenie techniczne, ale również wnoszą istotny wkład w ochronę środowiska. Efektywne oczyszczanie powietrza i zastosowanie energooszczędnych systemów, takich jak wariant z 50% pracą obrabiarek, ograniczają emisję pyłów do atmosfery, jednocześnie redukując zużycie energii i ślad węglowy zakładu. Dzięki skalowalności i możliwości dostosowania do zakładów o różnej wielkości, projektowane systemy stanowią uniwersalne narzędzie, które może być wdrażane w różnych konfiguracjach produkcyjnych, od małych warsztatów po duże zakłady przemysłowe. Długoterminowe korzyści obejmują poprawę jakości powietrza w miejscu pracy, co przekłada się na lepsze zdrowie pracowników, zmniejszenie ryzyka chorób zawodowych oraz wyższą wydajność operacyjną. Przedstawione rozwiązania wyznaczają nowe standardy w zakresie efektywności, bezpieczeństwa i zrównoważonego rozwoju, przyczyniając się do rozwoju branży obróbki drewna i jej zgodności z wymaganiami środowiskowymi.

Literatura – References

1. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2002 nr 75 poz. 690) z późniejszymi zmianami.
2. Sundell J., On the history of indoor air quality and health, Indoor Air, Supplement, 14 (SUPPL. 7), 2004, pp. 51 - 58, DOI: 10.1111/j.1600-0668.2004.00273.x
3. Tham K.W., Indoor air quality and its effects on humans—A review of challenges and developments in the last 30 years, Energy and Buildings, Volume 130, 2016, pp. 637-650, DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.08.071.
4. Mujan I., Anđelković A.S., Munćan V., Kljajić M., Ružić D., Influence of indoor environmental quality on human health and productivity - A review, Journal of Cleaner Production, Volume 217, 2019, pp. 646-657, DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.01.307.
5. Zhao X., Yin Y., Hazards of pollutants and ventilation control strategy in industrial workshops: Current state and future trend, Building and Environment, Volume 251, 2024, DOI: 10.1016/j.buildenv.2024.111229.
6. Kaukiainen A., Martikainen R., Riala R., Reijula K., Tammilehto L., Work tasks, chemical exposure and respiratory health in construction painting. Am. J. Ind. Med., 51 (1), 2008, pp. 1-8, DOI: 10.1002/ajim.20537.
7. Thuret A., Geoffroy-Perez B., Luce D., Goldberg M., Imbernon E., A 26-year cohort mortality study of french construction workers aged 20 to 64 years, Journal of Occupational and Environmental Medicine, 49 (5), 2007, pp. 546-556, DOI: 10.1097/JOM.0b013e3180577714.
8. Huang Y., Wang Y., Liu L., Nielsen P. V., Jensen R. L., Yan F., Reduced-scale experimental investigation on ventilation performance of a local exhaust hood in an industrial plant, Building and Environment, Volume 85, 2015, pp. 94-103, DOI: 10.1016/j.buildenv.2014.11.038.
9. Zhang J., Wang J., Gao J., Xie M., Cao C., Lv L., Zeng L., Experimental and numerical study of the effect of perimeter jet enhancement on the capture velocity of a rectangular exhaust hood, Journal of Building Engineering, Volume 33, 2021, DOI: 10.1016/j.jobe.2020.101652.
10. He Y., Chung Hii D. J., Wong N. H., Peck T.-G., Sustainable laboratory evaluations: Optimized fume-hood- intensive ventilation and energy efficiency without compromising occupational safety and comfort, Journal of Cleaner Production, Volume 333, 2022, DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.130147.
11. Liu F., Chen H., Yuan H., Zhang T., Liu W., Shape optimization of the exhaust hood in machining workshops by a discrete adjoint method, Building and Environment, Volume 244, 2023, DOI: 10.1016/j.buildenv.2023.110764.
12. Chen B., Liu S., Liu J., Jiang N., Chen Q., An energy-efficient exhaust hood for industrial buildings with strong thermal buoyancy, Energy and Buildings, Volume 308, 2024, DOI: 10.1016/j.enbuild.2024.114036.
13. IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Volume 62 Wood Dust and Formaldehyde. lnternational Agency for Research on Cancer 1995.
14. Tian Z. F., Inthavong K., Tu J. Y., Deposition of Inhaled Wood Dust in the Nasal Cavity. Inhalation Toxicology, 19(14), 2007 1155–1165. DOI: 10.1080/08958370701665525.
15. Dimou V., Tioutiountzi T., Malesios C., Determining occupational exposure to inhalable wood dust in motor manual felling and processing, International Journal of Forest Engineering, 35:3, 2024, pp. 399-409, DOI: 10.1080/14942119.2024.2336688
16. Bohadana A.B., Massin N., Wild P., Toamain J.P., Engel S., Goutet P., Symptoms, airway responsiveness, and exposure to dust in beech and oak wood workers. Occup Environ Med. 2000 Apr;57(4), pp. 268-73. DOI: 10.1136/oem.57.4.268.

17. Schlünssen V., Schaumburg I., Taudorf E., Mikkelsen A.B., Sigsgaard T., Respiratory symptoms and lung function among Danish woodworkers. J Occup Environ Med. 2002 Jan;44(1), pp. 82-98. DOI: 10.1097/00043764-200201000-00013.

18. Inthavong K., Tian Z.F., Tu J.Y., Effect of ventilation design on removal of particles in woodturning workstations, Building and Environment 44, 2009, pp. 125–136, DOI: 10.1016/j.buildenv.2008.02.002.

19. Topmiller J. L., Watkins D. S., Shulman, S. A., & Murdock, D. J., Controlling Wood Dust from Orbital Hand Sanders. Applied Occupational and Environmental Hygiene, 11(9), 1996, pp. 1131–1138, DOI: 10.1080/1047322X.1996.10389383.

20. Keller F. X., Chata F., Characterization of wood dust emission from hand-held woodworking machines. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 15(1), 2017, pp. 13–23, DOI: 10.1080/15459624.2017.1368526.

21. Welling I., Lehtimäki M., Rautio S., Lähde T., Enbom S., Hynynen P., Hämeri K., Wood Dust Particle and Mass Concentrations and Filtration Efficiency in Sanding of Wood Materials. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 6(2) 2008, pp. 90–98, DOI: 10.1080/15459620802623073.

22. CORMAK - Wyrówniarko-grubościówka, strugarka: https:/www.cormak.pl/pl/strugarko-grubosciowki/838-strugarko-grubosciowka-cormak-pt250-400v-5906800303929.html?cd=21671734739&ad=&kd=&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA34S7BhAtEiwACZzv4UTrJ1flyvijy0jSP_fbN_vgTpDjgY3hHatY48tfN-12HhLO6zop2hoCBI4QAvD_BwE

23. LAGUNA POLSKA - Piła taśmowa pionowa: https://www.lagunapolska.pl/pl/p/PILA-TASMOWA-PIONOWA-DO-DREWNA-PRZECINARKA-STOLOWA-HOLZMANN-HBS-450-230V-3866MM/11281?srsltid=AfmBOoq09cOFyB-kwewNFoSR6_8nGYREPqy9NqzrS3toDivc-R4L66V2-qA&gQT=1

24. Hochsmann Technology for wood - Piła do drewna: https://wtp.hoechsmann.com/pl/lexikon/18323/f_90

25. StanDrew - Frezarka: https://standrew.pl/frezarka-martin-t-21-p-3350.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAiA34S-7BhAtEiwACZzv4dRh0FIDEZSchDyP2VctKoTFmojxfWuH3W9Gxh4rYvcaUKWkC1e8zRoC44QQAvD_BwE

26. Mar-masz – Piła formatowa: https://mar-masz.pl/produkt/pilarka-dwustronna-dmgb-35-standard/

27. JR SERWIS – Piła formatowa: https://jrserwis.com.pl/rema-fx400/

28. Dolny S., 1999: Transport pneumatyczny i odpylanie w przemyśle drzewnym. Wyd. V uzupełnione, Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu, Poznań.

29. Pełech A., 2009: Wentylacja i klimatyzacja – podstawy. Wyd. II, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław.

30. Poradnik projektowania wentylacji stanowiskowych w zakładach produkcyjnych i usługowych. Tom I i II. Wydawnictwo Norm i Poradników NORMEX, Gdańsk 1994.

31. Rozporządzenie Ministra Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej z dnia 12 czerwca 2018 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz.U. 2018 poz. 1286).

32. Wentylatory dla przemysłu drzewnego i techniki odpylania. Katalog produktów Tyczyńskiej Fabryki Wentylatorów TYWENT, Tyczyn 2022.

33. Malicki M., 1980: Wentylacja i klimatyzacja. Wydanie III, PWN, Warszawa.

34. Juda J., 1968: Pomiary zapylenia i technika odpylania. Wydanie I, WNT, Warszawa.

35. Juda J., Nowicki M.,, 1986: Urządzenia odpylające. Wydanie 2 poprawione, PWN, Warszawa.

Ventilation Systems in Carpentry Workshops – a Case Study

In cases where gravity ventilation does not provide effective air exchange, a properly designed mechanical ventilation system is the necessary solution. The need to use mechanical ventilation in woodworking plants depends on many aspects, including the possibility of harmful health factors in the carpentry shop, the size of the room and its purpose, the type and frequency of work performed (woodworking - cutting, grinding; furniture assembly), the use and effectiveness of local exhaust systems used and how air dust spreads in the room. The article presents the possibilities of using mechanical ventilation systems to provide employees with occupational health and safety conditions, fire safety, and ongoing cleaning of workstations from shavings, sawdust, and waste generated during woodworking. The basis for the analysis is the dust extraction exhaust system (pneumatic shaving of carpentry machines) of mechanical woodworking rooms, the compensatory supply system, which supplies air to rooms in which local exhaust systems are used, and the supply and exhaust ventilation system of assembly rooms. The article presents design assumptions, the results of the necessary calculations, and the selection of devices included in the mechanical ventilation system of a carpentry workshop.

Keywords: *local ventilation, local exhaust ventilation (LEV), balanced ventilation, cyclone, dust removal*