



Wpływ zewnętrznych źródeł emisji azbestu na powietrze wewnętrzne eksploatowanych budynków

Impact of external asbestos emission sources on indoor air quality in occupied buildings



Dr Andrzej Obmiński

ORCID ID: 0000-0002-7190-1549

Zakład Fizyki Ciepłej Akustyki

i Środowiska

Instytut Techniki Budowlanej

a.obminski@itb.pl

Słowa kluczowe: włókna respirabilne azbestu, przenikanie pyłów, powietrze wewnętrzne i zewnętrzne, zanieczyszczenie

Streszczenie

Celem artykułu jest ilościowa ocena przenikania włókien azbestu z zewnętrznych źródeł do wnętrza, na podstawie bilansu zmian liczby włókien w powietrzu zewnętrznym i wewnętrznym. Porównano, zanieczyszczenie powietrza wewnętrznego budynku z elewacją z płyt azbestowo-cementowych podczas: normalnej, bez destrukcyjnej eksploatacji poprzedzającej jej demontaż i w trakcie. Budynek był w ciągłym użytkowaniu. Oznaczenie koncentracji włókien azbestu prowadzono z użyciem mikroskopii optycznej kontrastu fazowego i polaryzacji światła oraz mikroskopii skaningowej SEM-EDS. Wynik badań określający transmisję włókien do wnętrza obiektu przedstawiono graficznie w formie trendów zmian koncentracji włókien azbestu w różnych etapach demontażu w pomieszczeniach nieużytkowanych i użytkowanych. Stwierdzono istotny wpływ emisji powstałej przy elewacji na powietrze wewnętrzne budynku. Powszechnie stosowane procedury izolowania budynku ograniczone do zamknięcia okien i uszczelnieniu ich taśmą są nieskuteczne w pomieszczeniach z aktywną wentylacją. W analizie zmian stężeń i ich interpretacji wykorzystano AI.

Keywords: respirable asbestos fibres, particulate matter infiltration, indoor and outdoor air, air pollution

Abstract

The aim of this study was to quantitatively assess the infiltration of asbestos fibres from outdoor sources into a building interior based on the mass balance of changes in airborne fibre concentrations in outdoor and indoor air. Indoor air pollution was compared in an occupied building clad with asbestos-cement panels under two conditions: during normal, non-destructive use prior to façade removal and during the removal process. The building remained continuously occupied throughout the study.

Airborne asbestos fibre concentrations were determined using phase-contrast and polarised-light optical microscopy, as well as scanning electron microscopy coupled with energy-dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS). The results describing fibre transmission into the building were presented graphically as trends in asbestos fibre concentrations at different stages of façade removal, both in occupied and unoccupied rooms.

Emissions generated in the immediate vicinity of the façade were found to have a significant impact on indoor air quality. Commonly used building-isolation procedures limited to closing windows and sealing them with adhesive tape proved ineffective in rooms with active ventilation. Artificial intelligence (AI) was used to analyse and interpret changes in fibre concentrations.

Wstęp

Powszechne wykorzystanie w przeszłości azbestu w gospodarce, sprawiło, że ten szkodliwy biologicznie składnik mineralny w sposób nadmierny kontaminuje obecnie środowisko budowlane, zwłaszcza powietrze wewnątrz budynków. W przypadku elewacji azbestowo cementowych (zwanych w skrócie *a-c*) lub elementów zewnętrznych w ścianach osłonowych dokonuje się naturalne uwolnienie włókien azbestu z degradowanej warunkami atmosferycznymi powierzchni. Związane z tym przenikanie włókien respirabilnych do wnętrza obiektu można traktować jako zjawisko analogiczne do przenikania pyłów PM 2,5 oraz o mniejszej średnicy do wnętrza budynku (średnica włókien respirabil-

nych $< 3 \mu\text{m}$). Jednym z elementów oceny transmisji cząstek azbestu do wnętrza jest współczynnik I/O (*indoor/outdoor*). Może on dać ogólne wrażenie na temat relacji między stężeniem cząstek w powietrzu wewnętrznym (ang. *indoor air*) i powietrzu zewnętrznym (ang. *outdoor air*). Wartość współczynnika I/O zmienia się pod wpływem wielu czynników co wskazuje, że relacja I/O nie jest w pełni przydatna w rozumieniu wzajemnej relacji tych cząstek i ich oddziaływania na powietrze wewnętrzne. Niektórzy autorzy uznają współczynniki infiltracji i penetracji jako bardziej zalecane do ocen przenikania pyłów zewnętrznych (Chen & Zhao, 2010). Jak wskazano w danych literaturowych, poziomy zanieczyszczeń powietrza na zewnątrz pozostają ważnym czynnikiem tzw. predyktorem zanieczyszczeń powietrza wewnętrznego,

determinującym jego zanieczyszczenie w pomieszczeniach mieszkalnych (Meier i in., 2015). Aż ok 65% masy PM 2,5 w pomieszczeniach pochodzi z zanieczyszczenia cząstkami stałymi pochodzenia zewnętrznego (Bekierski & Kostyrko, 2021), natomiast współczynniki I/O dla PM10, PM2,5 i PM1 wynosiły w badaniach odpowiednio 0,54, 0,71 i 0,81 (Nadali i in., 2020). Potwierdza to tezę o wyższym, efektywnym przedstawianiu się ze źródeł zewnętrznych do wnętrza budynków cząstek o mniejszych średnicach niż cząstek o większej średnicy (PM10). Korelacja przenikających włókien respirabilnych azbestu z pyłami PM10 wydaje się nieistotna, ponieważ średnica liczonych włókien jest co najmniej 3 krotnie mniejsza od średnicy PM10. Nie ma też potwierdzonej takiej korelacji tych pyłów z włóknami w sąsiedztwie dużych powierzchni z płyt a-c (Gualtieri i in., 2009). Czy zatem włókna respirabilne azbestu uwalniane z wyrobów budowlanych odpowiadające frakcjom drobnym (PM 2,5 i 1) mogą przenikać do wnętrza zamkniętego budynku? Wiadomym jest, że wprowadzanie czystego powietrza zewnętrznego poprzez wentylację naturalną lub mechaniczną do środowiska wewnętrznego zmniejsza zanieczyszczenie powietrza wewnątrz pomieszczeń, jednak wprowadzenie słabej jakości powietrza zewnętrznego może zwiększyć stężenie cząstek stałych (Wallis i in., 2019). Analogiczny mechanizm można by odnieść do włókien azbestu uwzględniając utrudnienie powodowane wydłużeniem włókien w stosunku do ziaren izometrycznych. Elementem oceny obrazu zmian powietrza wewnętrznego jest jednoczesny pomiar liczbowy włókien w powietrzu zewnętrznym i wewnętrznym. Korelacji takiej należy dokonać na przestrzeni czasu, obejmującego okres poprzedzający demontaż elewacji a-c oraz jego realizację, do czasu zakończenia lub zatrzymania tego procesu.

Zanieczyszczenie powietrza zewnętrznego otaczającego budynek i powietrza wewnętrznego, powodowane samą obecnością elewacji czy też pokrycia dachowego z płyt a-c w obiektach normalnie użytkowanych, o nieuszkodzonych wyrobach, często jest niewielkie (Wallis i in., 2019), tj. na granicy wykrywalności dla mikroskopii optycznej. Osiąga wartości ok. $< 300 \text{ wł./m}^3$. Stężenie takie mierzone technikami mikroskopii elektronowej w powietrzu wewnętrznym, nie różni się istotnie od powietrza atmosferycznego, tzw. tła (Lee & Orden, 2007) i jest określane w szerokim przedziale $< 100\text{--}500 \text{ wł./m}^3$ (Obmiński, 2022). Bardziej złożonym i dynamicznym procesem uwalniania włókien azbestu od wietrzenia takich wyrobów jest ich destrukcja mechaniczna, powstała w trakcie uszkodzeń powodowanych demontażem. Chwilowo może prowadzić do bardzo dużych stężeń w pobliżu źródła emisji. Wartości stężeń mogą przekraczać nawet NDS (Lange & Thomulka, 2000; Dumortier & De Vuyst, 2011; Craighead i in., 2008). Według danych literaturowych wartości stężeń włókien azbestu rejestrowane w pomiarach indywidualnego narażenia pracowników podczas usuwania płyt a-c w strefie oddychania pracowników może zawierać się ono w przedziale $100\ 000\text{--}400\ 000 \text{ wł./m}^3$ (Brown, 1987; Kako-oei & Normohammadi, 2013). Rejestrowano wartości nawet do ok $3\ 000\ 000 \text{ wł./m}^3$ (Dufrense i in., 2009). W szczególnych okolicznościach (podczas eksploatacji budynku) stwarza to realne ryzyko przenikania tak dużej koncentracji włókien do wnętrza. Sygnalizowany problem nabiera szczególnego znaczenia wobec współczesnych wymagań prac termoizolacyjnych budynków związanych „Zielonym Ładem”, który przyspiesza i powiększa liczbę remontowanych budynków

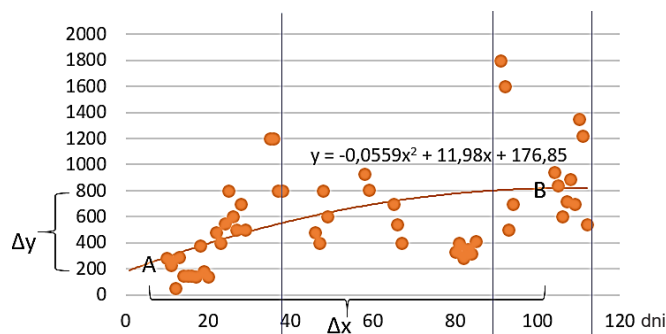
z elewacjami a-c. Problem ten znalazł wyraz w nowelizacji przepisów UE, w przedmiocie poprawy bezpieczeństwa osób niezwiązanych zawodowo z narażeniem na azbest (Dyrektywa „azbestowa” Parlamentu UE nr 2023/2668 z 2023 r.).

Metodyka badań

W celu oceny oddziaływania demontażu elewacji a-c na wewnątrz budynku porównano wartości stężeń na zewnątrz i wewnątrz budynku, zmierzone w tym samym okresie i lokalizacji w budynku w poszczególnych odcinkach czasu. Na podstawie zmian stężeń włókien w powietrzu możliwe jest określenie zmiennej „y” w funkcji zmiennej – czasu, „x”, w której efekt tej zamiany nastąpił. Pominąć można dla uproszczenia charakter i rodzaj przenikania, (nieszczelności, wentylacja, reemisja włókien przenikniętych wcześniej), analizując sumę efektu tych czynników. Ilustruje to w uproszczeniu rysunek zmian stężenia włókien azbestu w powietrzu wewnętrznym pomiędzy punktami rozpoczęcia demontażu „A” i jego zakończenia „B”, gdzie przyrostowi czasu Δx (w dniach prowadzonego remontu) odpowiada przyrost stężenia włókien w powietrzu wewnętrznym Δy . Na Rysunku 1 przedstawiono rzeczywiste wartości zmierzonych stężeń. Średnią ich zmianę określa nieliniowa funkcja trendu zmian; jest to funkcja wykładnicza, ale w różnych obiektach może być inną, dopasowaną do cech przyrostu zanieczyszczeń zewnętrznych, poziomu stężeń włókien w powietrzu otaczającym obiekt, ilości wymian powietrza itp. Prace ilustrujące ten remont wg. Rysunku 3 trwały przez około 120 dni, z przerwą pomiędzy 40 i 80 dniem, liczoną od rozpoczęcia robót. Opis zmian powietrza wraz z różnymi modelami tych zmian szczegółowo zostały omówione w dalszej części artykułu.

Podstawową metodą dla prowadzenia analiz ilościowych stężenia włókien azbestu były mikroskopia optyczna, kontrast fazy (dla rejestracji włókien), skojarzona z polaryzacją światła (dla ich identyfikacji). Metoda została opracowana w ITB, walidowana i wykorzystywana jest w laboratorium pod nr. PBLIS-020/1/08-2006. Zakres oznaczeń wynosi $300\text{--}200\ 000 \text{ wł./m}^3$, niepewność ok 20% wyliczana na podstawie wartości wejściowych za pomocą programu ProWL. Metoda oznaczeń koncentracji włókien była stosowana równolegle z badaniem normowym SEM-EDS (ISO, 2019). Pobór próbek zrealizowano wg standardu (ISO, 2007). Pobór powietrza odbywał się na wysokości ok 1,5 m od podłoża, przy czasie pojedynczego poboru 1,5–3 godz. przepływie ok 8 l/min i objętości powietrza przechodzącego przez filtr zależnej od optymalnego obciążenia filtrów ok 1,5–3 m³.

Wszystkie wyniki dla lepszego obrazowania zamian stężeń włókien azbestu zostały przedstawione w formie graficznej. Wspomniany trend zmian pozwala na modelowanie stanu zanieczyszczenia powietrza wewnętrznego w dowolnym etapie procesu, wyznaczenie czasu, w którym zanieczyszczenie zostanie z budynku usunięte lub określenie jakie warunki powinny być do tego spełnione (np. wielkość wymian powietrza lub ograniczenie poziomu zanieczyszczenia powietrza zewnętrznego). Dane empiryczne zgromadzone w badaniu monitorującym budynek pozwalają na wykorzystanie AI w tworzeniu modeli predykcyjnych, które umożliwią określenie, w jakich warunkach wyroby i proces ich usunięcia powodować będzie określone skutki.



Rysunek 1. Trend zmian stężenia włókien azbestu w powietrzu wewnętrznym spowodowany demontażem elewacji a-c w budynku. Źródło: opracowanie własne

Figure 1. Trend in indoor airborne asbestos fibre concentrations caused by the removal of the asbestos-cement façade from the building. Source: author's own study



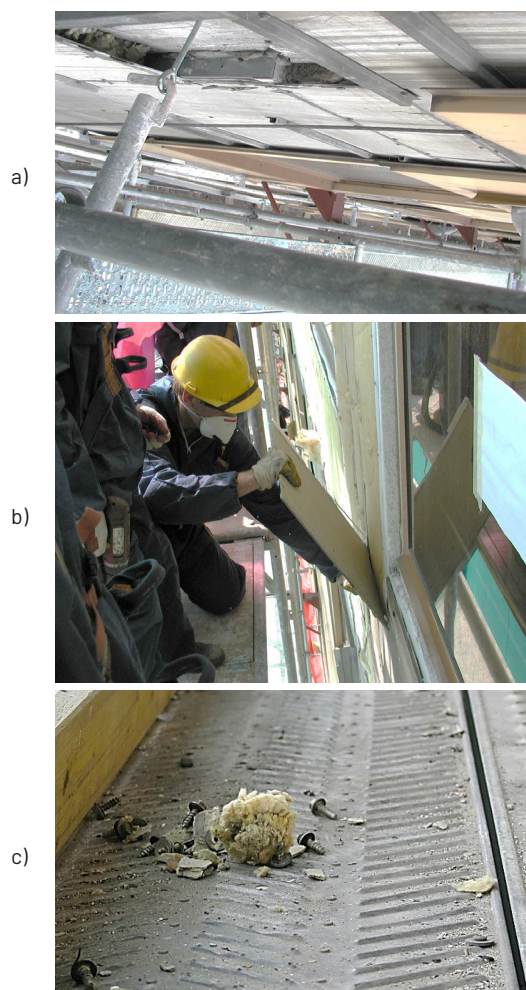
Rysunek 2. Etapy zabezpieczenia i demontażu elewacji. Brak izolacji strefy pracy od zewnątrz przedstawia (a, b). Wnętrze strefy pracy przedstawia (c, d). Brak hermetycznej strefy pracy skompensowano miejscowym odsysaniem powstających pyłów widocznym na (c). Źródło: opracowanie własne

Figure 2. Stages of securing and dismantling the façade. No separation of the work zone from the outdoor environment is shown on (a, b). Interior of the work zone is shown on (c, d). The absence of a hermetically sealed work zone was compensated for by local extraction of the generated dust visible on (c). Source: author's own study

Materiał badawczy

Badanie dotyczyło dwóch budynków, podczas prac robótково-remontowych, których zmiany zanieczyszczenia w powietrzu przedstawiono na rysunkach:

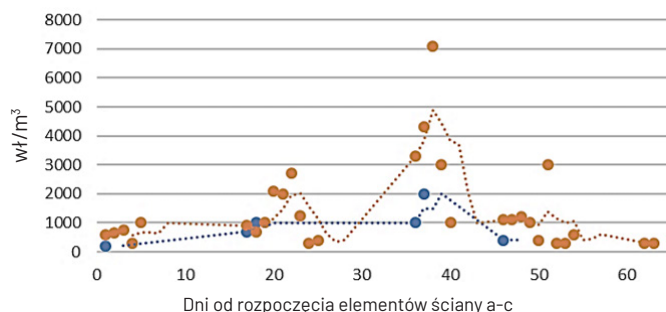
- Rysunek (4), to uproszczony model dynamicznych średnich zmian powietrza zewnętrznego i wewnętrznego w budynku wielopiętrowym, w którym usuwano elewację i części ściany osłonowej (z płyty warstwowej PW3/A). Ulegał on rozszczelnieniu, co manifestuje się gwałtownym skokiem stężenia włókien w powietrzu wewnętrznym ok 40 dnia robót.
- Rysunek 5 (a-d), przedstawia modele o różnej dynamice zmian stężenia włókien azbestu w budynku, w którym usuwano wyłącznie samą elewację z płyt a-c, bez rozszczelnienia ściany zewnętrznej. Model statyczny dla



Rysunek 3. Demontażu elewacji i zewnętrznych płyt a-c w monitorowanym obiekcie. Oznaczenia: (a) mocowanie rusztowania, widoczne podesty, fragmenty ściany z osłoną płyt a-c panelami z blachy, (b) łamanie demontowanych płyt (wąski podest uniemożliwia ich demontaż bez destrukcji), (c) podest po zakończeniu dnia pracy. Źródło: opracowanie własne

pomieszczeń eksploatowanych, mieszkalnych to rys. (b). Modele dynamiczne tych samych pomieszczeń, przedstawiające zmiany chwilowe to (c) i (d). Wykres rys. (d) jest uproszczoną wersją rysunku (c), która redukuje wahania stężeń do dwóch głównych epizodów emisji. Przez co wyraźnie widać nakładanie się zmian powietrza wewnętrznego na zmiany w powietrzu zewnętrznym. Dla porównania model dynamiczny pomieszczeń nieeksploatowanych przedstawiono na rys (a).

Analizowany budynek, w którym usuwano elewację i zewnętrzne części ściany osłonowej bez rozszczelnienia obiektu to wielopiętrowy budynek mieszkalny, podobny do przedstawionego na Rysunku 2b. Budynek wyposażony był w wentylację mechaniczną. Prace prowadzono bez izolowania strefy robót. Okna w budynku były zamknięte a sam obiekt był użytkowany przez jego mieszkańców, co jest normą w tego typu pracach prowadzonych na dużych osiedlach mieszkalnych. Monitoring pomiarów, tak jak prowadzone prace, podzielony był na trzy fazy:



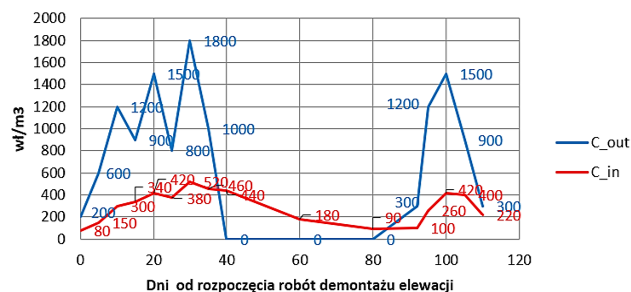
Rysunek 4. Demontaż ścian z płytami a-c w formie płyt warstwowych PW3/A w budynku rozbieranym. Źródło: opracowanie własne

Figure 4. Dismantling of walls containing PW3/A asbestos-cement sandwich panels in the building under demolition. Source: author's own study

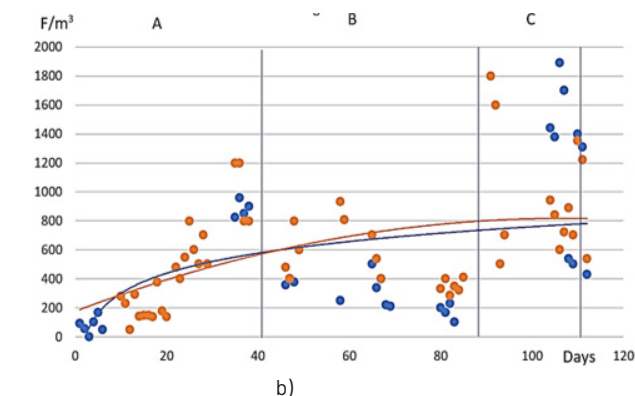
- „A” – wstępne naruszenie płyt azbestowo – cementowych podczas montowania rusztowań do ściany budynku i częściowe usunięcie osłaniających ścianę blach. Prace wstępne trwały ok 40 dni.
- „B” – przerwa w pracach i przygotowanie do dalszych robót, zakończona w 80-tym dniu od rozpoczęcia badań.
- „C” – wznowienie robót: demontaż osłon blaszanych i zamocowanych pod mini płyt a-c.

Całkowita powierzchnia płyt a-c wynosiła ok. 7350 m², kubatura budynku ok. 15 000 m³. Badania nie objęły całości prac usuwania płyt a-c i zakończyły się w 120 dniu od rozpoczęcia pomiarów.

Pobór próbek powietrza zewnętrznego odbywał się na podestach rusztowań, z których usuwano elewację. Na



a)



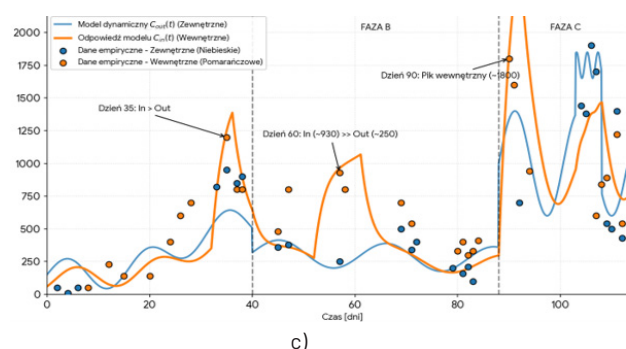
b)

Rysunkach 2a-d widoczne są typowe rozwiązania omawianej technologii usuwania elewacji a-c bez izolowania strefy prac od otoczenia, jednak tu, nie tak jak na rys. 3, w analizowanym obiekcie prowadzono je z użyciem miejscowego odsysania pyłów wysoko wydajnym odkurzaczem przemysłowym z filtrem HEPA. Analizowany obiekt był osłonięty z siatką budowlaną podobnie jak przedstawiono na Rysunku 3. Płyty a-c były łamane a podczas usuwania nie stosowano miejscowego odsysania odkurzacza- mi uwalnianych włókien azbestu z demontowanych płyt.

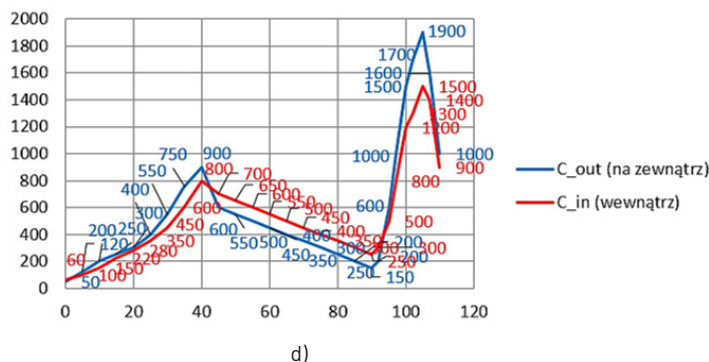
Wyniki badań i dyskusja

Rysunek 4 przedstawia uproszczony model dynamiczny zmian stężenia włókien w przypadku usuwania całych ścian PW3/A. Krzywa łamana obrazuje wzrost zanieczyszczenia wewnątrz budynku wskutek sukcesywnego rozszczelniania jego ścian zewnętrznych. Względnie niskie wartości stężenia włókien w powietrzu zewnętrznym w strefie pracy (pomiaru obszarowe prowadzone w strefie prac na zewnątrz budynku), wynoszące 500–2000 wł./m³, korespondują z wyraźnym wzrostem stężenia włókien wewnątrz budynku – do poziomu 2000–7000 wł./m³ – po rozszczelnieniu przegrody budowlanej. Wynika to, z jednej strony, z rozpraszania włókien w otwartej przestrzeni prowadzenia robót, a z drugiej – z kumulacji tych pyłów wewnątrz budynku, gdzie możliwość rozpraszania się włókien jest ograniczona.

Na Rysunkach 5a-d przedstawiono zmiany stężenia włókien w powietrzu zewnętrznym i wewnętrznym podczas usuwania elewacji oraz zewnętrznych płyt ściany



c)



d)

Rysunek 5. Korelacja zmian stężenia włókien azbestu w powietrzu zewnętrznym i wewnętrznym w budynku podczas usuwania wyrobów zawierających azbest ze ściany zewnętrznej. Oznaczenia: (a) badanie w pomieszczeniach nieużytkowanych (wyłączenie wentylacji, zamknięcie wszystkich otworów wentylacyjnych, (b-c-d) demontaż elewacji w budynku, pomiary prowadzone w mieszkalnych pomieszczeniach użytkowanych z zamkniętymi oknami, przy czym (b) przedstawia model statyczny, (c i d) przedstawiają modele dynamiczne na podstawie równań różniczkowych. Źródło: opracowanie własne

Figure 5. Correlation between changes in asbestos fibre concentrations in outdoor and indoor air during the removal of asbestos-containing materials from the building's external wall. Key: (a) measurements in unoccupied rooms, with the ventilation switched off and all ventilation openings sealed; (b-d) façade dismantling, with measurements conducted in occupied residential rooms with closed windows; (b) static model; (c, d) dynamic models based on differential equations. Source: author's own study

osłonowej, przy zamkniętych oknach uszczelnionych taśmą. Wartości stężenia włókien azbestu w powietrzu są takie same jak na Rysunku 1, z rozróżnieniem powietrza zewnętrznego (kolor niebieski) i wewnętrznego (kolor pomarańczowy). Stężenie włókien w powietrzu zewnętrznym zmienia się dynamicznie, zależnie od chwilowych warunków pogodowych, w zakresie od 0 do 1890 wł./m^3 .

Na Rysunkach 5a–d przedstawiono różne modele zmian w powietrzu wewnętrznym (a) pomieszczeń ściśle zamkniętych pomieszczeń technicznych, nie wentylowanych, nie użytkowanych lub (b, c, d) lokali mieszkalnych (w tym samym budynku), których hermetycznie zamknąć nie można, ponieważ przebywają w nich ludzie (wchodzą/wychodzą z budynku, działa wentylacja itd.).

Średni przyrost włókien w powietrzu wewnętrznym na przestrzeni badanego okresu 110 dni, wynosił 600 F/m^3 , przy zarejestrowanym wzroście koncentracji w powietrzu zewnętrznym 750 F/m^3 . Oznacza to, że w pomieszczeniach mieszkalnych nastąpił wzrost zanieczyszczenia zbliżony do tego, który rejestrowana na zewnątrz (bardzo słaba ochrona mieszkańców). Jednak w krótkich okresach ok 20 dni wzrosty mogły wynosić nawet 1500 wł./m^3 . Przykład stałego, średniego wzrostu na przestrzeni długiego okresu, stanowi bezpośredni dowód na przenikanie do wnętrza budynku pyłów z jego otoczenia mimo zamknięcia i uszczelnienia okien. Przedłużający się proces uwalniania włókien azbestu w bliskiej przestrzeni badanego budynku skutkuje wzrostem zanieczyszczenia w jego otoczeniu. Wyjaśnia to Rysunek 3c, na którym widać, że przyrost zanieczyszczenia w otoczeniu budynku przekłada się na zmiany zanieczyszczenia w jego wnętrzu, ponieważ w użytkowanym obiekcie cały czas działa wentylacja mechaniczna, a więc pobierane jest powietrze z otoczenia. Choć stężenie włókien w nieszczelnych, „otwartych” strefach pracy maleje wskutek rozpraszania się pyłów, odbywa się to kosztem otoczenia, do którego transferowane są te pyły. Z tej przyczyny, rutynowo mierzone stężenia, tzw. „obszarowe” w odległości ok. 5–10 m, od wykonawców były niższe od pomiarów tzw. indywidualnych (80 000 wł./m^3) a te z kolei niższe danych literaturowych, podających wartości z hermetycznych stref

pracy (dane literaturowe). Zestawienie danych zmian stężenia przedstawia Tabela 1.

Ponadto:

- Pomiary prowadzone wewnątrz budynku, w pomieszczeniach wyłączonych z użytkowania (Rysunek 5a) wskazują, że wzrost zanieczyszczenia wnętrza jest skorelowany ze wzrostem zanieczyszczenia zewnętrznego, ale jest łagodny w porównaniu ze zmianami zewnętrznymi. Znaczące osłabienie wzrostu. Wiązać go należy z ogólnym wzrostem zanieczyszczenia całego budynku przy działającej w nim wentylacji i nieczynnej wentylacji w badanych pomieszczeniach.
- Chmura punktów stanowiąca materiał empiryczny z pomiarów powietrza zewnętrznego i wewnętrznego pomieszczeń mieszkalnych (Rysunek 5b) wykazuje stały wzrost zanieczyszczenia, przedstawiony funkcją nieliniową. Statystyczne uśrednienie wartości poszczególnych pomiarów przedstawiają linie trendu w powietrzu zewnętrznym (niebieski wykres) i wewnętrznym (pomarańczowy wykres). Trend pokazuje zmianę średnią w długim okresie czasu, jest modelem statycznym bez uwzględnienia lokalnych, krótko terminowych wahań stężenia. Stanowi argument za koniecznością wdrożenia procedur ochronnych na kolejnych budowach. Pokazuje „ogólny obraz” do raportów środowiskowych, gdzie kluczowy jest ogólny wniosek: „Im dłużej trwają prace, tym wyższe jest bazowe tło zanieczyszczeń”. Świadczy to o niezadowalającej jakości zastosowanej techniki zabezpieczenia budynku i samych prac, co widać na Rysunku 3b). Pozwala również ocenić skumulowane ryzyko zawodowe (np. dla celów BHP) w skali całego projektu.
- Dynamiczny model zmian uzyskany z równań różniczkowych opartych na danych empirycznych (rysunek 5c) wygładził załamania linii, wprowadzając fizyczny czynnik opóźnienia czasowego oraz bezwładności systemu, stąd na rysunku piki powietrza wewnętrznego były przesunięte w czasie względem pików powietrza zewnętrznego i miały charakter „falowy”. Model dynamiczny ma zastosowanie w projektowaniu inżynierskim, np. w projektowaniu systemów wentylacji – ponieważ model uwzględ-

Tabela 1. Zmiany stężenia z uwzględnieniem trendu globalnego. Źródło: opracowanie własne

Table 1. Changes in concentration accounting for the global trend. Source: author's own study

Punkt kontrolny cyklu badawczego (110 dni)	Outdoor air (niebieski wykres)	Indoor air (pomarańczowy wykres)	Interpretacja
Stan wyjściowy	~ 200	~ 160–300	Początek prac, naturalne tło zewnętrzne
Koniec Fazy I (Dzień 40)	1200	900	Maksymalne stężenie przy dziennym sunięciu ok 70 m^2 elewacji
Zrównanie wartości linii trendów (dzień 40)	~ 580–600	~ 580–600	Symbioza środowiskowa*
Faza II – Przerwa (Ok. Dnia 60)	~200–300	~ 350	Inwersja stężeń: Wiatr oczyszcza powietrze zewnętrzne; wnętrze akumuluje pył azbestowy.
Koniec Fazy B – Przerwa (Dzień 80)	~200	350	Punkty kontrolne przed wznową robót
Faza III	~ 500–700	1600–1800	Reemisja: (Wydmuchanie pyłu osiadłego w kanałach HVAC)
Maksima stężeń (Dni 105–108)	1900	~ 900–1300	Krótką intensyfikacja prac demontażowych
Koniec badania (Dzień 110)	~ 430	~ 540	Redukcja zanieczyszczeń, końcowe opadanie pyłów, przewietrzanie obiektu

*Stan pełnej integracji i dynamicznej równowagi pomiędzy mikroklimatem wewnętrznym budynku a środowiskiem zewnętrznym (parametry powietrza wewnątrz stają się bezpośrednią funkcją stanu powietrza na zewnątrz, brak izolacji ludzi od zagrożeń zewnętrznych. strumień masy włókien azbestu infiltrujących do budynku ($\dot{A}pN_{out}$) idealnie równoważy strumień cząstek usuwanych przez wentylację i depozycję grawitacyjną. Punkt oznacza on osiągnięcie pełnej równowagi aerodynamicznej i masowej pomiędzy strefą indoor a outdoor, w wyniku czego kubatura budynku wysokościowego traci swoje właściwości osłonowe względem pyłów.

nia przesunięcia fazowe (opóźnienia) i fizyczną bezwładność powietrza, pozwala inżynierom obliczyć, jak szybko systemy wentylacyjne muszą reagować na piki emisji na zewnątrz. Może zostać zaimplementowany w systemach zarządzania budynkiem (BMS), ponieważ pozwala systemowi sterowania przewidzieć zmienność czynnika szkodliwego (np. „Jeśli stężenie na zewnątrz wzrosło o X, to za Y godzin wewnątrz osiągniemy punkt krytyczny, więc należy zamknąć czerpnię powietrza” - pozwala określić lokalne zagrożenia dla użytkowników budynku).

- Uproszczony łamany, model dynamiczny (odcinkowy), oparty bezpośrednio na interpolacji liniowej kluczowych punktów pomiarowych różnych etapów pracy dla stężenia zewnętrznego (C_{out}) – linia niebieska) i wewnętrznego (C_{in}) – linia czerwona (Rysunek 5d) stanowi uśrednione odzwierciedlenie makro-trendów, z wyraźnym przesunięciem w czasie zanieczyszczeń wewnętrznych względem źródłowego, zewnętrznego. Wykres rezygnuje z gładkich krzywych trendu, przedstawiony na Rysunku 5b oraz z fizycznych oscylacji tłumionych (Rysunek 5c), na rzecz prostoliniowych przejść między uśrednionymi ekstremami w kluczowych dniach z rejestracją piku stężeń włókien wewnątrz budynku ok. dnia 40 i 100. Pozwala na reakcję na konkretne zdarzenia zaplanowanie przerwy, modyfikacje procedur w pracy lub nakazanie użycie masek dla wykonawców.

Porównanie wykresów zmian powietrza w pomieszczeniach (a) i (b-d) przynosi istotne wnioski co do penetracji cząstek do wnętrza budynku ze względu na użytkowanie pomieszczeń przedstawione w Tabeli 2.

Analizę zmian koncentracji włókien azbestu w czasie, opisuje równie różniczkowe (1).

$$dC_{in}/dt = a C_{out}(t) - b C_{in}(t) \quad (1)$$

gdzie:

- C_{indoor} – stężenie wewnątrz (punkty pomarańczowe zgodnie z Rysunkiem 5c), $\mu\text{l}/\text{m}^3$
- $C_{outdoor}$ – stężenie na zewnątrz (punkty niebieskie zgodnie z Rysunkiem 5c), $\mu\text{l}/\text{m}^3$
- t – czas, dni
- $C_{out}(t)$ – chwilowe stężenie zewnętrzne, $\mu\text{l}/\text{m}^3$
- $C_{in}(t)$ – chwilowe stężenie wewnętrzne, $\mu\text{l}/\text{m}^3$
- a – szybkość przenikania włókien do wnętrza, $a = P \lambda$
- b – skuteczność usuwania $= \lambda + k$
- P – współczynnik penetracji (0–1) część przenikają-

ca do wnętrza z zanieczyszczenia zewnętrznego

- λ – wymiana powietrza, h^{-1}
 - k – tempo usuwania niewentylacyjnego (depozycja/filtracja) szybkość, z jaką pył samoistnie znika z powietrza wewnątrz, h^{-1} , $k = b - \lambda$
 - $a C_{out}(t)$ – tempo napływu do wnętrza zależne od stężenia zewnętrznego
 - $b C_{in}(t)$ – tempo usuwania włókien zawieszonych wewnątrz
- Średnia zmiana powietrza wewnętrznego w wybranym przedziale czasu przedstawiona jest na równaniu (2).

$$dC_{in}/dt = C_{in}(t_{end}) - C_{in}(t_{start}) / t_{end} - t_{start} \quad (2)$$

t_{end} i t_{start} oznaczają punkty w czasie, między którymi mierzone zmianę stężenia:

- t_{start} (czas początkowy): Moment, w którym zaczęto pomiar stężenia
 - t_{start} (czas końcowy): Moment, w którym go zakończono.
- Spadek stężenia w zamkniętym budynku w warunkach braku emisji zewnętrznej ma charakter wykładniczy, zgodny z równaniem (3).

$$C_t = C_0 \cdot e^{-(k + \lambda)t} \quad (3)$$

gdzie:

- $C(t)$ – stężenie pyłu wewnątrz budynku po czasie t , $\mu\text{l}/\text{m}^3$
- C_0 – stężenie początkowe, $\mu\text{l}/\text{m}^3$
- λ – całkowity współczynnik zaniku pyłu (wymiana powietrza + sedimentacja na powierzchniach)

Opierając się na spadku stężeń podczas przerwy w pracy w dniach 40–80 i wykorzystując wartości pomiarowe w fazie wstrzymania robót (wprowadzono wzór nr 4). Gdy cząstki są tak małe jak włókna respirabilne azbestu lub mniejsze, nie opadają grawitacyjnie na powierzchnie i mogą w eksploatowanym budynku tygodniami lub miesiącami utrzymywać się w powietrzu ($k = 0$) wówczas wzór nr (3) przyjmie postać jak wzór nr (4):

$$C_t/C_0 = e^{-\lambda t} \quad (4)$$

Podstawiając stosowne wartości do $\lambda = (-1/t) \ln(C_t/C_0)$, otrzymamy wniosek wskazujący, że budynek, samoistnie oczyści się z pyłów w warunkach opisanych w trakcie prowadzenia badań (przy zamkniętych oknach) do poziomu tła, dopiero po ok. 75 dniach od momentu całkowitego zatrzymania prac. Stan ten zmieni się przy otworzeniu okien lub wprowadzeniu czyszczenia wnętrza. Z przeprowadzonej analizy porównawczej zmian wynika:

Tabela 2. Porównanie zmian wewnątrz pomieszczeń nieużytkowanych i użytkowanych. Źródło: opracowanie własne
Table 2. Comparison of changes in unoccupied and occupied rooms. Source: author's own study

Parametr analizy	(a) (Okna zamknięte lub brak okien/pomieszczenie nieużytkowane, szczelne)	(b-d) (Okna zamknięte / pomieszczenie użytkowane z wymianą powietrza) – rzeczywisty stan pomieszczeń mieszkalnych w budynku	Interpretacja
Maksymalne stężenie zewnętrzne C_{out}	1800 $\mu\text{l}/\text{m}^3$ (Dzień 30)	1900 $\mu\text{l}/\text{m}^3$ (Dzień 105)	Podobny poziom zanieczyszczenia generowanego przez prace na zewnątrz.
Maksymalne stężenie wewnętrzne C_{in}	520 $\mu\text{l}/\text{m}^3$ (Dzień 40) 420 $\mu\text{l}/\text{m}^3$ (Dzień 105)	800 $\mu\text{l}/\text{m}^3$ (Dzień 40) 1500 $\mu\text{l}/\text{m}^3$ (Dzień 105)	Wzrost stężenia wewnątrz o 188% na Rysunku 2.
Wskaźnik penetracji I/O w pikach	0,25–0,29 (Średnio: 0,27)	0,79–0,89 (Średnio: 0,83)	(c-d) do wnętrza przenikało aż 83% pyłu (b) tylko 27%).
Efektywność (współczynnik tłumienia przegród A-I/O)	71%–75%	11%–21%	Zdolność budynku do zatrzymywania pyłu w pomieszczeniach (c-d) bliska zeru.
Zachowanie w fazie przerwy (Dni 40–80)	Powolny spadek wewnątrz.	Stężenie wewnątrz jest stale wyższe niż na zewnątrz.	Pomieszczenia budynku (c-d) działają jak pułapka, kumulując pył i uniemożliwiając jego uchodzenie zanieczyszczeń

- Materiał empirycznego ujawnia różnicę pomiędzy podejściem statystycznym (globalne linie trendu wykres (b) a podejściem deterministycznym (dynamiczne modele fizyczne, wykresy c, d).
- Do oceny generalnej nadaje się model statyczny (b).
- W aspekcie bezpieczeństwa zdrowotnego, w pracy wykazano wyższość modeli dynamicznych (c, d).
- W krótko terminowych cząstkowych pracach do oceny bezpieczeństwa personelu i mieszkańców należy stosować modele dynamiczne (oparte na równaniach różniczkowych) zamiast globalnych linii trendów, ponieważ te nie pomijają pików krótkoterminowych stężeń.

Zastosowanie przedstawionych krzywych zmienności stężenia wewnętrznego

W projekcie inżynierskim celowym może okazać się wykorzystanie trzech modeli. Pozwolą one na:

- diagnozę realnego zagrożenia na budowie w kluczowych etapach prac, na podstawie danych empirycznych i ustaleniach dynamicznego modelu trendu zmian (c), z uwzględnieniem zagrożeń w kluczowych etapach robót (d),
- zaprojektowanie automatycznej wentylacji dla przyszłych, analogicznych robót, model (c),
- określenie ogólnego trendu zmian jako skutku całego projektu (b).

Wnioski

- System powszechnie prowadzonych demontaży elewacji a-c z budynków mieszkalnych podczas obecności w nich mieszkańców naraża ich na podwyższone zanieczyszczenie powietrza włóknami azbestu.
- Przedłużający się remont potęguje problem przenikania azbestu do wnętrza budynku.
- Bezpośrednią przyczyną omawianego procesu jest podciśnienie wewnątrz budynku powodowane wentylacją grawitacyjną lub mechaniczną pomieszczeń użytkowanych.
- Aby zanieczyszczenie wewnątrz było jak najmniejsze podczas robót, pomieszczenia powinny być całkowicie wyłączone z użytkowania.
- Jednym z technicznych rozwiązań eliminującym przenikanie pyłów azbestu do wnętrza jest stworzenie nadciśnienia w wewnątrz obiektu i skuteczne odsysanie pyłów w miejscu ich powstania.

Bibliografia

- Bekierski, D., & Kostyrko, K. B. (2021). The influence of outdoor particulate matter PM2.5 on indoor air quality: the implementation of a new assessment method. *Energies*, 14(19), 6230. <https://doi.org/10.3390/en14196230>
- Brown, S. K. (1987). Asbestos exposure during renovation and demolition of Asbestos-Cement clad buildings. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 48(5), 478–486. <https://doi.org/10.1080/15298668791385075>
- Chen, C., & Zhao, B. (2010). Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/O ratio, infiltration factor and

- penetration factor. *Atmospheric Environment*, 45(2), 275–288. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.09.048>
- Craighead, J. E., Dibbs, A. R. ed. (2008). *Asbestos and its Diseases* OXFORD University press ISBN: 978-0195178692
- Dufresne, A., Dion, C., Frielaender, A., Audet, E., & Perrault, G. (2009). Personal and static sample measurements of asbestos fibres during two abatement projects. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 82(4), 440–443. <https://doi.org/10.1007/s00128-009-9661-4>
- Dumortier, P., & De Vuyst, P. (2011). Asbestos exposure during uncontrolled removal of sprayed-on asbestos. *The Annals of Occupational Hygiene*, 56(1), 49–54. <https://doi.org/10.1093/annhyg/mer096>
- Gualtieri, A. F., Mangano, D., Gualtieri, M. L., Ricchi, A., Foresti, E., Lesci, G., Roveri, N., Mariotti, M., & Pecchini, G. (2009). Ambient monitoring of asbestos in selected Italian living areas. *Journal of Environmental Management*, 90(11), 3540–3552. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2009.06.007>
- ISO. (2007). ISO 16000-7:2007 Indoor air—Part 7: Sampling strategy for determination of airborne asbestos fibre concentrations. *International Organization for Standardization*.
- ISO. (2019). ISO 14966:2019 Ambient air—Determination of numerical concentration of inorganic fibrous particles—Scanning electron microscopy method. *International Organization for Standardization*.
- Kakooei, H., & Normohammadi, M. (2013). Asbestos Exposure among Construction Workers During Demolition of Old Houses in Tehran, Iran. *Industrial Health*, 52(1), 71–77. <https://doi.org/10.2486/indhealth.2012-0118>
- Lange, J. H., & Thomulka, K. W. (2000). Air sampling during asbestos abatement of floor tile and mastic. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 64(4), 497–501. <https://doi.org/10.1007/s001280000031>
- Lee, R., & Orden, V. (2007). Airborne asbestos in buildings. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 50(2), 218–225. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2007.10.005>
- Meier, R., Schindler, C., Eeftens, M., Aguilera, I., Ducret-Stich, R. E., Ineichen, A., Davey, M., Phuleria, H. C., Probst-Hensch, N., Tsai, M., & Künzli, N. (2015). Modeling indoor air pollution of outdoor origin in homes of SAPALDIA subjects in Switzerland. *Environment International*, 82, 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.05.013>
- Nadali, A., Arfaeina, H., Asadgol, Z., & Fahiminia, M. (2020). Indoor and outdoor concentration of PM10, PM2.5 and PM1 in residential building and evaluation of negative air ions (NAIs) in indoor PM removal. *Environmental Pollutants and Bioavailability*, 32(1), 47–55. <https://doi.org/10.1080/02639594.2020.1728198>
- Obmiński, A. (2022). The natural reduction of threat in selected systems of old buildings containing asbestos. *Scientific Reports*, 12(1), 2580. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-04487-y>
- Wallis, S. L., Hernandez, G., Poyner, D., Birchmore, R., & Berry, T. (2019). Particulate matter in residential buildings in New Zealand: Part I. Variability of particle transport into unoccupied spaces with mechanical ventilation. *Atmospheric Environment*, 210, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100024>

Zastrzeżenie: Oświadczenia, opinie i dane przedstawione w publikacjach są wyłączną odpowiedzialnością ich autorów i nie odzwierciedlają stanowiska redakcji *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za jakiegokolwiek szkody dotyczące osób lub mienia wynikające z idei, metod, zaleceń lub produktów omawianych w treści publikacji. Artykuł udostępniony na licencji Creative Commons CC BY 4.0.

Disclaimer: The statements, opinions, and data presented in the publications are the sole responsibility of their authors and do not necessarily reflect the views of the editorial board of *Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja*. The editorial board assumes no responsibility or liability for any injury to persons or damage to property resulting from any ideas, methods, instructions, or products referred to in the content of the publications. The article is distributed under the Creative Commons CC BY 4.0 license.