

Damian Kociemba*  <https://orcid.org/0000-0002-6604-858X>

Maciej Puchała**  <https://orcid.org/0000-0001-7723-1913>

Procesy transportowe w pomieszczeniach bezpyłowych na przykładzie firmy ASML Netherlands

Artykuł porusza kwestie warunków, jakie muszą zostać spełnione, aby uznać pomieszczenie za czyste, tj. pozbawione wszelkich zanieczyszczeń, z którymi człowiek styka się przez cały czas. Autorzy podejmują próbę zdefiniowania pojęć niezbędnych do zrozumienia zagadnienia pomieszczeń bezpyłowych i ukazują historię wynalezienia skutecznych filtrów przeciwpyłowych, począwszy od pierwszych prób ochrony dróg oddechowych strażaków narażonych na wdychanie toksycznych produktów pochodzących ze spalania, poprzez wynalezienie filtrów absolutnych stosowanych początkowo na szeroką skalę w przemyśle militarnym, aż do współczesności, gdzie znalazły zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, przyczyniając się do ich rozwoju. Przedstawione zostały również specyfikacje pomieszczeń czystych wraz z klasyfikacją zanieczyszczeń mających destrukcyjny wpływ podczas procesów produkcji najnowocześniejszej elektroniki. Poruszono kwestię możliwych metod transportu i obowiązujących podczas tego typu operacji procedur wewnątrz pomieszczeń, wraz z przejściem przez środowisko zewnętrzne (naturalne) na przykładzie firmy ASML Netherlands. W podsumowaniu autorzy stwierdzają, że przedstawione w artykule informacje dotyczące konieczności zachowania wysokiego reżimu czystości przekładają się na jakość oferowanych produktów, a starania zmierzające do osiągnięcia wysokiej czystości wymagają od przedsiębiorstw dużego nakładu pracy i środków finansowych.

Słowa kluczowe: pomieszczenie czyste, cząstki, transport, zanieczyszczenia, kurz

* Damian Kociemba – student kierunku transport na Wydziale Informatyki, Zarządzania i Transportu w Akademii Humanistyczno-Ekonomicznej w Łodzi.

** Dr inż. Maciej Puchała – adiunkt w Katedrze Systemów Transportowych Wydziału Informatyki, Zarządzania i Transportu w Akademii Humanistyczno-Ekonomicznej w Łodzi.

Wprowadzenie

Rozwój technologii półprzewodnikowej, optyki, przemysłu farmaceutycznego oraz medycyny niewątpliwie stał się przyczyną dostosowania procesów technologicznych do zupełnie nowego otoczenia pozbawionego zanieczyszczeń (cząstek stałych, wirusów, grzybów oraz oparów chemicznych pochodzących ze specyficznych substancji). Procesom technologicznym towarzyszą procesy transportowe w takich pomieszczeniach. Pomieszczenia te są nazywane w języku angielskim *clean room*, co można przetłumaczyć jako *pomieszczenie czyste*. Posiłkując się normą PN-EN ISO 14644-1, można wywnioskować, że pomieszczenie bezpyłowe jest otoczeniem zamkniętym przed środowiskiem zewnętrznym, gdzie stężenie cząstek stałych znajdujących się w powietrzu jest na bieżąco kontrolowane. Zostało ono zbudowane i jest użytkowane w sposób minimalizujący pojawienie się pyłów wewnątrz poprzez zastosowanie mechanizmów filtracji, kontroli ciśnienia, temperatury oraz wilgotności regulowanych zgodnie ze specyfikacją i własnymi potrzebami.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie procesów transportowych zachodzących w pomieszczeniach czystych¹ z uwzględnieniem ich historii i charakterystyki. Przykładem będzie firma ASML Netherlands, główny producent i dostawca urządzeń przeznaczonych do wytwarzania układów scalonych.

Historia i rozwój pomieszczeń czystych

Rozwój pomieszczeń bezpyłowych sięga początkami XIX i XX wieku, kiedy szwajcarski producent zegarków w obawie przed zabrudzeniami mogącymi spowodować uszkodzenia komponentów i nieestetyczny wygląd zdecydował się na ich izolację od czynników zewnętrznych podczas transportu do następnego stanowiska poprzez zastosowanie szklanych kopuł, pod którymi były one umieszczane. Ten system, co prawda, chronił zegarki przed zabrudzeniami, ale nie był w stanie zagwarantować czystości stanowiska pracy.

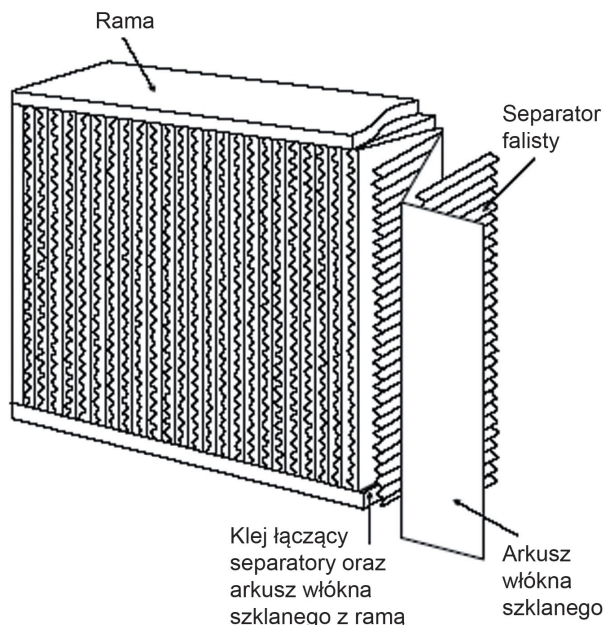
W roku 1823 John Dean (1800–1884) i Charles Dean (1796–1848) opracowali pierwszą na świecie maskę składającą się głównie ze zwierzęcej skóry lub też szczelnej tkaniny, którą przypinało się za głowę pasami. Maską tą była pierwotnie przeznaczona dla strażaków narażonych na wdychanie różnych substancji pochodzących ze spalania, albowiem długo przed jej wynalezieniem do ochrony używana była nasączona wodą chusta przywiązana do twarzy, której funkcja filtracyjna może być dyskusyjna. Dopiero w 1854 roku John Stenhouse (1809–1880) ulepszył tę konstrukcję, wprowadzając filtr składający się z węgla, który, jak się okazało, skutecznie wiązał większość substancji chemicznych znajdujących się w gryzącym dymie, tym samym częściowo zapobiegając ich wdychaniu. Ten filtr został zmodernizowany i dostoso-

¹ W artykule pojęcia *pomieszczenie bezpyłowe* i *pomieszczenie czyste* traktowane są jako tożsame.

wany do użytku wojskowego przez Cluny'ego Macphersona (1879–1966) oraz wykorzystywany w celu ochrony przed atakami chemicznymi podczas pierwszej wojny światowej. Projekt Macphersona został ponownie zmodyfikowany przez Komisję Energii Atomowej (AEC) Stanów Zjednoczonych, dzięki czemu powstała pierwsza na świecie koncepcja filtra absolutnego (akronim HEPA – *High Efficiency Particulate Air filter* – wysoko skutecznego filtra powietrza, który do lat pięćdziesiątych nie był jeszcze używany).

Początkowo składał się on z włókien azbestowych wykorzystywanych głównie w przemyśle budowlanym w XX wieku i znanych szerzej pod nazwą eternitu (w tamtych czasach nie wiedziano jeszcze zbyt dużo o jego szkodliwości dla organizmów żywych) oraz z włókien pochodzących z rośliny o nazwie *ostnica mocna* (*esparto grass*). Tak jak w przypadku masek gazowych używanych do ochrony przed środkami chemicznymi, tak i tu osiągnięcie techniki w postaci pierwszego filtra absolutnego znalazło zastosowanie podczas drugiej wojny światowej, a konkretnie w przemyśle militarnym – filtr został wykorzystany do budowy tak zwanych białych pokoi (*white rooms*). Zasada ich działania polegała na nieustannej filtracji powietrza wewnątrz. Już wtedy podejmowano próby zwiększenia ciśnienia w pomieszczeniach, ponieważ w wypadku nieszczelności wcześniej wspomniana różnica ciśnień uniemożliwiała przedostawanie się do środka zanieczyszczeń pochodzących z zewnątrz. Dzięki temu rozwiązaniu elementy wymagające precyzji, takie jak żyroskopy samolotowe, mogły powstawać w krótszym czasie, a przy tym cechować się mniejszą awaryjnością. Właściwości pierwszego filtra zostały wykorzystane również w Projekcie Manhattan (program, który był prowadzony przez Stany Zjednoczone, a jego celem było zaprowadzenie pokoju na świecie poprzez skonstruowanie i użycie bomby atomowej mającej zapewnić zwycięstwo aliantom), ponieważ powietrze wewnątrz laboratoriów badawczych zawierało szkodliwy, radioaktywny pył, stąd potrzeba jego eliminacji (Sandle, 2016: 3–8).

W latach pięćdziesiątych XX wieku nastąpiło ponowne unowocześnienie – wcześniej wspomniane materiały tworzące urządzenie zostały zastąpione przez włókna szklane (czasem do produkcji wykorzystywane jest szkło spiekane). Skuteczność powstałych w ten sposób filtrów oceniana jest na 99,97%, ponieważ są one w stanie zatrzymać zanieczyszczenia o wielkości większej bądź równej 0,3 μm . Budowa filtra HEPA nie jest skomplikowana, co ilustruje rysunek 1.



Rysunek 1. Budowa filtra HEPA

Źródło: *High Efficiency Particulate Air (HEPA) Filters Description and Testing*.

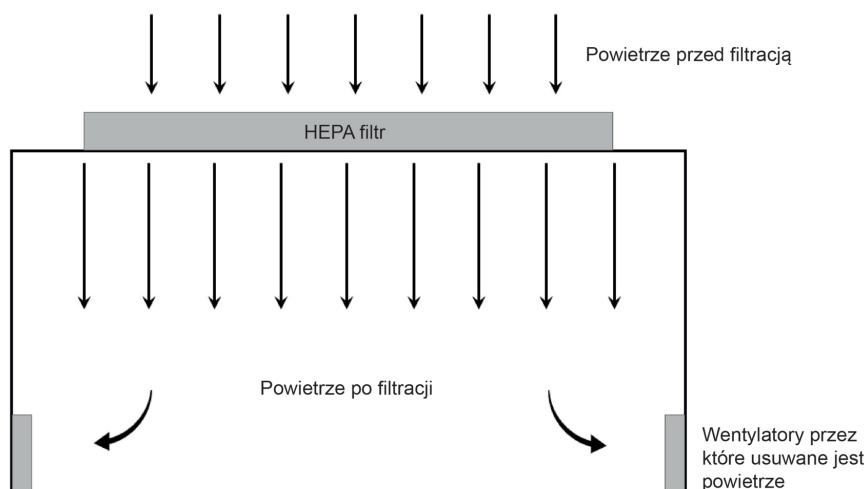
Powyższe rozwiązanie z równie dużym sukcesem zostało wykorzystane w szpitalach, między innymi na salach operacyjnych. Nastąpił dzięki temu wzrost świadomości na temat rozprzestrzeniania się różnych chorób i drastyczny spadek zakażeń pooperacyjnych, co miało bezpośredni wpływ na obniżenie śmiertelności.

Podczas amerykańskiej wojny domowej (1860–1865) lekarze wojskowi spekulowali nad możliwością przenoszenia zakażeń pomiędzy pacjentami za pośrednictwem powietrza (pojęcie drogi kropelkowej nie było jeszcze znane). W roku 1864, po trwającej kilka lat dyskusji, Amerykańskie Towarzystwo Medyczne wydało dla wszystkich szpitali zalecenie dotyczące stosowania częstej wentylacji pomieszczeń, co miało przyczynić się do tworzenia czystszej środowiska wewnątrz budynków. W ówczesnym okresie wiedza na temat zakażeń była znikoma – potwierdza to brak opracowanych w tamtych czasach metod skutecznej dezynfekcji urządzeń, narzędzi i powierzchni, co przekładało się na wysoką śmiertelność hospitalizowanych pacjentów.

Joseph Lister (1827–1912), twórca pierwszych zasad antyseptyki, zainspirowany pracą Ludwika Pasteura (1822–1895) na temat zwalczania mikroorganizmów, rozpoczął eksperymenty dotyczące zakażeń pooperacyjnych poprzez zaopatrywanie ran opatrunkami nasączonymi kwasem karbolowym. Poza tym ów fenol był również stosowany do sterylizacji narzędzi chirurgicznych, mycia rąk, a nawet rozpylany na salach operacyjnych. Procedury stosowane przez Listera, a także inne postępy przyczyniły się do skutecznego ograniczenia infekcji, a tym samym zwiększyły przeżywalność pacjentów.

W roku 1878 nastąpiło kolejne przełomowe odkrycie – Heinrich Hermann Robert Koch (1843–1910) zaobserwował, że przetrwalniki wąglika giną pod wpływem wysokiej temperatury. Opracował więc metodę skutecznej sterylizacji bandaży, ubrań i narzędzi za pomocą pary wodnej, co spowodowało ograniczenie stosowania chemicznej dezynfekcji, powodując obniżenie kosztów i zmniejszenie zapotrzebowania na antyseptyki. W tym okresie amerykański chirurg William Stewart Halsted (1852–1922) wspólnie z firmą Goodyear opracował pierwsze gumowe rękawiczki operacyjne oraz zaczął stosować odzież ochronną w postaci fartucha i czepka. Pomimo poprawiania i rozwijania procedur ograniczających szerzenie się zakażeń postęp w tworzeniu przestrzeni czystych był bardzo znikomy, bowiem jedynym udoskonaleniem całego systemu było spopularyzowanie lamp ultrafioletowych mających właściwości bakteriobójcze, stosowanych od lat trzydziestych XX wieku. Wprowadzone zostały również pierwsze sulfonamidy, które pozwoliły zmniejszyć śmiertelność, ze względu na działanie bakteriostatyczne. Od tego momentu rozwój czystości chirurgicznej stał się całkowicie zależny od rozwoju technicznego, bowiem z powodzeniem zostały zaimplementowane rozwiązania eliminujące zanieczyszczenia, które zostały stworzone w latach trzydziestych oraz pięćdziesiątych XX wieku (Sandle, 2016: 2–4).

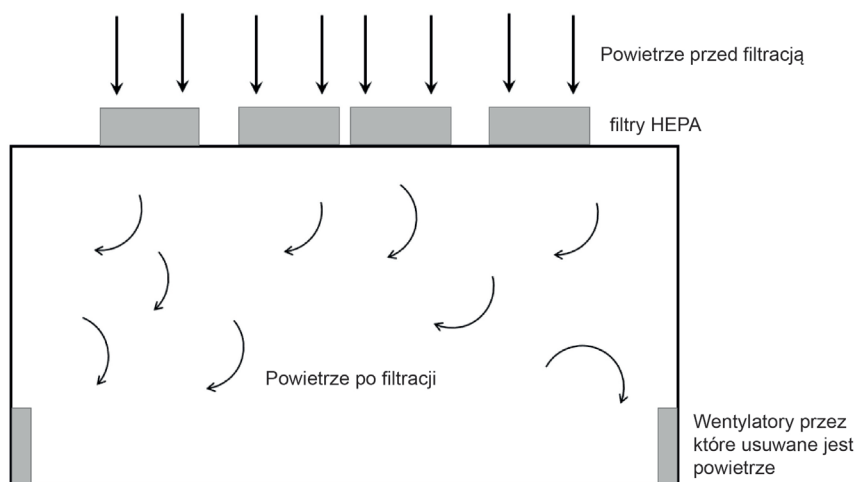
Zastosowanie pierwszych filtrów HEPA w szpitalach zaowocowało opracowaniem kolejnych norm dotyczących czystości powietrza w salach chirurgicznych. Powietrze musiało być zmieniane co najmniej dwanaście razy w ciągu jednej godziny w starszych pomieszczeniach, w nowych obiektach wymiana musiała zachodzić minimum dwadzieścia pięć razy w przeciągu 60 minut. Bardzo istotna innowacja nastąpiła w latach sześćdziesiątych XX wieku dzięki rozwojowi przemysłu nuklearnego. W zakładzie firmy Sandia National Laboratories Willis Whitfield (1919–2012) wraz ze swoim zespołem stworzył projekt laminarnego przepływu powietrza. Polegał on na jednokierunkowym, niezaburzonym przepływie powietrza z dużą prędkością, uprzednio poddanego filtracji przez filtr HEPA. Powodowało to utworzenie jednej ścieżki i efektywniejsze usuwanie zanieczyszczeń z obszarów krytycznych, a tym samym osiągnięcie wyższego poziomu czystości (rys. 2). W pomieszczeniu dodatkowo występowało zwiększone ciśnienie względem otoczenia, co zapobiegało niepożądanemu wnikaniu zabrudzeń do wnętrza, na przykład przez nieszczelności (Sandle, 2016: 6).



Rysunek 2. Budowa pomieszczenia czystego z przepływem laminarnym

Źródło: opracowanie własne na podstawie Sandle, 2016: 4.

Nim stworzono jednokierunkowy przepływ powietrza, w pomieszczeniach czystych był wykorzystywany przepływ mieszany (turbulentny), który nie był w stanie usunąć wszystkich zanieczyszczeń znajdujących się w laboratorium. Przepływ taki cechował się tym, że przefiltrowane powietrze, które było wpuszczane do strefy czystej, mieszało się z powietrzem tam zastanym, co zostało zilustrowane na rysunku 3. System przepływu turbulentnego pomimo swoich niedoskonałości jest użytkowany w dalszym ciągu w obiektach, w których nie jest wymagana wyższa klasa czystości.



Rysunek 3. Budowa pomieszczenia czystego z przepływem turbulentnym (mieszanym)

Źródło: opracowanie własne na podstawie Sandle, 2016: 4.

Dalszy rozwój pomieszczeń czystych przypadł na końcówkę XX wieku, kiedy obok filtra HEPA pojawił się ULPA – *Ultra Low Penetration Air filter*, co można tłumaczyć jako filtr powietrza o bardzo niskiej penetracji. Cechuje się on jeszcze większą efektywnością oczyszczania, która została określona na 99,99% i jest w stanie zatrzymywać cząsteczki wielkości większej bądź równej 0,1 μm (Sandle, 2017a: 4).

Współczesne pomieszczenia czyste

Pomieszczenia bezpyłowe zgodnie z normą PN-EN ISO 14644-1 można podzielić na dziewięć klas czystości, co zostało przedstawione w tabeli 1. Podane wartości oznaczają maksymalne dopuszczalne i nieprzekraczalne wartości stężenia cząstek o poszczególnych rozmiarach (średnicach) w jednym metrze sześciennym powietrza.

Tabela 1. Maksymalne stężenie cząstek stałych na 1 metr sześcienny w pomieszczeniach czystych

Klasa ISO	0,1 μm	0,2 μm	0,3 μm	0,5 μm	1 μm	5 μm
1	10	2				
2	100	24	10	4		
3	1 000	237	102	35	8	
4	10 000	2 370	1 020	352	83	
5	100 000	23 700	10 200	3 520	832	29
6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
7				325 000	83 200	2 930
8				3 520 000	832 000	29 300
9				35 200 000	8 320 000	293 000

Źródło: opracowanie własne na podstawie Charkowska, 2014.

Dla porównania ilość zanieczyszczeń stałych znajdujących się w środowisku zewnętrznym przedstawiona jest w tabeli 2.

Tabela 2. Ilość zanieczyszczeń stałych znajdujących się w środowisku zewnętrznym

Środowisko	0,1 μm	0,3 μm	0,5 μm
czyste	500 000 000	20 000 000	1 000 000
normalne	3 000 000 000	90 000 000	7 000 000
brudne	10 000 000 000	300 000 000	30 000 000

Źródło: opracowanie własne na podstawie Charkowska, 2014.

W tabeli 3 zaprezentowane zostały dane dotyczące prędkości strumienia powietrza oraz częstotliwości wymiany powietrza w ciągu jednej godziny dla pomieszczenia o wysokości 3 metrów.

Tabela 3. Prędkość i częstotliwość wymiany powietrza na godzinę w pomieszczeniach czystych

Klasa ISO	Rodzaj przepływu powietrza	Prędkość strumienia powietrza (m/s)	Częstotliwość wymiany powietrza na godzinę
2	jednokierunkowy (laminarny)	0,3–0,5	nie dotyczy
3			
4			
5		0,2–0,5	
6	mieszany (turbulentny)	nie dotyczy	70–160
7			30–70
8			10–20

Źródło: opracowanie własne na podstawie Charkowska, 2015.

Zgodnie z normą PN-EN ISO 14644-2, ściśle związaną z PN-EN ISO 14644-1, powietrze w obiektach czystych musi być monitorowane w celu ewentualnej korekcji poziomu czystości zgodnie z poniższymi wskazaniem (*Klasy czystości pomieszczeń ISO*, 2017):

1. Aktualizacja ciągła – wykonywana w sposób nieprzerwany przez 24 godziny.
2. Aktualizacja częsta – wykonywana minimum jeden raz w ciągu maksymalnie 60 minut.
3. Aktualizacja co 6 miesięcy – wykonywana jeden raz w ciągu maksymalnie 183 dni, z zastrzeżeniem, że odstęp pomiędzy pomiarami nie może przekroczyć 190 dni.
4. Aktualizacja co 12 miesięcy – wykonywana jeden raz w ciągu maksymalnie 366 dni, z zastrzeżeniem, że odstęp pomiędzy pomiarami nie może przekroczyć 400 dni.
5. Aktualizacja co 24 miesiące – wykonywana jeden raz w ciągu maksymalnie 731 dni, z zastrzeżeniem, że odstęp pomiędzy pomiarami nie może przekroczyć 800 dni.

Powyższych aktualizacji stężenia cząstek można dokonywać za pomocą metod chemicznych, fizycznych oraz elektronicznych. Im wyższa klasa ISO obowiązuje w pomieszczeniach, tym częściej powinny być wykonywane aktualizacje poziomu stężeń cząstek stałych.

Filtrowanie powietrza jest jedną z wielu metod ograniczania zanieczyszczeń w clean roomach. Innym ważnym elementem jest stosowanie specjalnych kombinizonów, odpowiednie użytkowanie obiektów oraz sama ich budowa. Człowiek w ciągu jednej doby „gubi” około jednego miliarda cząsteczek, głównie w postaci złuszc-

czającego się naskórka. Można więc wnioskować, że największym zagrożeniem dla czystości jest personel. Spowodowało to zaprojektowanie odzieży ochronnej składającej się z kompletnego kombinezonu, maski, rękawiczek oraz ochraniaczy obuwia, którym stawia się następujące wymagania:

- brak przepuszczalności (szczelność),
- wysoka odporność na czynniki chemiczne i fizyczne,
- zakaz wykonywania z materiałów pyłących oraz emitujących substancje niepożądane.

Kryteriom tym jest w stanie sprostać włókno syntetyczne o nazwie *poliester*, które znane jest w przemyśle szerzej pod skrótem PET, oznaczającym politereftalan etylenu i wykorzystywanym głównie w produkcji butelek oraz opakowań jednorazowych (Sandle, 2012: 3–4, 54–55; *Dynamic Design: The Cleanroom*, b.r.: 1–3).

Tabela 4. Zastosowanie odzieży w pomieszczeniach czystych

Klasa pomieszczenia	Kombinezon	Nakrycie głowy	Obuwie	Rękawiczki
3	obowiązkowy	pełne nakrycie głowy z maską twarzą	długie buty	obowiązkowe
4	obowiązkowy	pełne nakrycie głowy z maską twarzą	długie buty	obowiązkowe
5	obowiązkowy	pełne nakrycie głowy z maską twarzą	długie buty	obowiązkowe
6	obowiązkowy	pełne nakrycie głowy, zalecana maska twarzowa	długie buty lub kalosze	obowiązkowe
7	obowiązkowy	czepek	kalosze	zalecane
8	zalecany	czepek	kalosze	zalecane

Źródło: opracowanie własne na podstawie Kitain, 2010: 32.

W oparciu o wytyczne przedstawione w normie PN-EN ISO 14644-14 można ustalić dopuszczalne urządzenia i wyposażenie mogące zostać zaimplementowane i użytkowane w obiektach czystych, gdzie najważniejszym kryterium jest wpływ sprzętu na stężenie cząstek zawieszonych w powietrzu. Materiały użyte do produkcji elementów sprzętu muszą cechować się niską emisyjnością, to znaczy nie mogą być wykonane na przykład z papieru ani innych materiałów mających podobne właściwości. Niedozwolone są również elementy pomalowane, ponieważ w przypadku zadrapania powierzchni mogą zostać uwolnione zanieczyszczenia. Unikać należy materiałów plastikowych ze względu na właściwość polegającą na przyciąganiu elektrostatycznym oraz ułatwione przyleganie bakterii, wirusów, grzybów i kurzu, których osadzeniu mogą też sprzyjać porowate powierzchnie. Najlepsze efekty osiąga się poprzez zastosowanie stali nierdzewnej (Sandle, 2017b: 3, 18).

Tabela 5. Materiały zalecane w pomieszczeniach wszystkich klas

Element pomieszczenia	Zalecany materiał
sufit	anodyzowane aluminium, możliwość zastosowania teowników z tego samego materiału
podłoga	wynyl, farba epoksydowa
ściany	wynyl, szkło hartowane
drzwi	anodyzowane aluminium, stal nierdzewna, metalowe drzwi pokryte farbą epoksydową
okna	szkło hartowane z ramą wykonaną z anodyzowanego aluminium lub stali

Źródło: opracowanie własne na podstawie Kastango, De Marco, 2001: 4–5.

W obiektach zachowujących wysoki reżim czystości rozkład pomieszczeń powinien być przemyślany tak, by powstały obszary brudne (zewnętrzne) i strefy czyste bez krzyżujących się dróg. W celu ochrony przed wejściem do przebieralni umieszczone są maty klejące, których zadaniem jest zatrzymywanie zanieczyszczeń znajdujących się na podszwach obuwia. Dodatkowo między przestrzeniami tworzy się specjalne przedsionki, w których instalowane są prysznice powietrzne. Zasada ich działania polega na emisji poprzez dysze powietrza z dużą prędkością i w dużych ilościach. Tym sposobem tworzy się skuteczną zaporę przed przenikaniem cząstek stałych do obiektów ich pozbawionych. Zwykle obieg powietrza w tych elementach jest zamknięty, to znaczy, że zużyte powietrze ulega ponownej filtracji.

Historia i charakterystyka przedsiębiorstwa ASML

W roku 1984 w miejscowości Eindhoven położonej w Brabancji Północnej (Holandia) Phillips oraz ASMI (*Advanced Semiconductor Materials International*) stworzyli nową firmę o nazwie ASM Litography (przekształconą w późniejszym okresie na ASML). Głównym zadaniem nowo powołanego przedsiębiorstwa było opracowanie i rozwój systemów fotolitografii. Jeszcze w tym samym roku został stworzony pierwszy skaner przeznaczony do wytwarzania układów scalonych za pomocą głębokiego ultrafioletu (DUV)². Pięć lat później wprowadzone zostało kolejne urządzenie cechujące się większą dokładnością oraz możliwością wypalania mniejszych ścieżek o szerokości 500 nm. Warto zauważyć, że pierwsze urządzenie było w stanie osiągnąć tylko 1 μm . Wyprodukowane układy cechowały się większą szybkością działania, ponieważ odstęp między ścieżkami i ich szerokości zostały zmniejszone. Najnowszy skaner pochodzący z roku 2010 potrafi nadrukowywać ścieżki o szerokości

² DUV (*deep ultraviolet* – głęboki ultrafiolet) – wiązka światła emitowana przez laser ekscymerowy, który znalazł zastosowanie w produkcji półprzewodnikowych układów scalonych oraz medycynie. Laser wykorzystywany w procesach fotolitograficznych składa się z argonu i fluoru (ArF), a długość fali emitowanej przez niego wynosi 193 nm (*light source technology*).

16–32 nm, zachowując przy tym 2 nm odstęp między warstwami, używając do ich produkcji ekstremalnie długiego ultrafioletu (EUV)³. Wszystkie układy uzyskiwane w ten sposób są wypalane na waflach⁴. Najnowszy skaner NXE wykorzystujący technologię EUV waży ponad 180 ton i składa się z około 100 tysięcy elementów o zróżnicowanej wytrzymałości na czynniki fizyczne i chemiczne (Verrijt, 2017), co powoduje mnóstwo wyzwań w procesie przemieszczania wewnątrz – pomiędzy pomieszczeniami jednego zakładu, ale również w konieczności transportu produktu do innego kraju z przejściem przez strefę zewnętrzną, gdzie stężenie zanieczyszczeń znacznie przekracza obowiązujące maksymalne stężenia dla poszczególnych klas opisane w PN-EN ISO 14644-1.

Firma obecnie posiada łącznie 42 oddziały, z czego 6 znajduje się w Europie, 15 w Stanach Zjednoczonych Ameryki oraz 21 w krajach Azji. W przedsiębiorstwie zatrudnionych jest ponad 19 tysięcy pełnoetatowych pracowników (*Our history*, 2018; *Main Offices*, 2019).

Transport w pomieszczeniach bezpyłowych

Transport materiałów zachodzący pomiędzy dwoma punktami w jednym obiekcie może odbywać się na kilka sposobów opisanych poniżej.

Ręcznie – bez użycia przyborów wspomagających. Normy określające dopuszczalny ciężar w tego rodzaju transporcie zostały przedstawione w tabeli 6.

³ EUV (*extreme ultraviolet* – ekstremalnie daleki ultrafiolet) – wiązka światła, która powstaje poprzez uderzenie wysokoenergetycznego lasera (zwykle laser CO₂) w mikroskopijną kroplę stopionej cyny. Podczas tego procesu powstaje plazma, która emituje ekstremalnie daleki ultrafiolet. Jest on skupiany w jedną wiązkę i transmitowany drogą próżniową za pomocą zwierciadeł do wafla (wyjaśnienie w następnym przypisie), gdzie wypala pożądane wzory. Długość powstałej w ten sposób fali wynosi 13,5 nm i jest to aktualnie najniższy uzyskany wynik. EUV stosowane jest wyłącznie w produkcji półprzewodnikowych układów scalonych (Gerven, 2011).

⁴ Wafel – potoczne określenie krążka monokryształowego składającego się z krzemu (Si) o średnicy 200–300 mm. Powstaje on za pomocą metody wybitnego Polaka, prof. Jana Czochrałskiego (1885–1953) opracowanej w roku 1916. Polega ona na umieszczeniu i powolnym wyciąganiu zarodka substancji (w tym przypadku jest to krzem) z pieca, w którym znajduje się ten sam materiał w formie rozpuszczonej. Tym sposobem można przeprowadzać krystalizację kolejnych warstw kryształu, które będą się osadzać podczas wydobywania (Tomaszewski, 2014: 7–8, 64–65).

Tabela 6. Maksymalne wartości ciężarów, które mogą być przenoszone przez pracowników

Rodzaj pracy	Wiek					
	16–18		> 18		> 18	
	Kobiety	Mężczyźni	Kobiety	Mężczyźni	Kobiety w ciąży	Mężczyźni pracujący zespołowo
stała	8	12	12	30	3	25 kg na 1 os.
dorywcza	14	20	20	50	5	42 kg na 1 os.

Źródło: opracowanie własne na podstawie Rozporządzenia Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 14 marca 2000 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy ręcznych pracach transportowych.

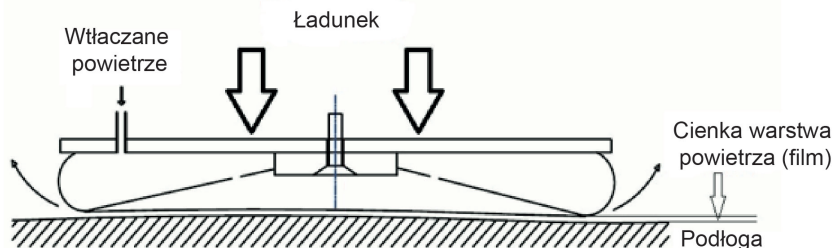
Poprzez pracę dorywczą rozumie się ręczne przemieszczanie ładunków maksymalnie cztery razy w ciągu godziny zegarowej, przy czym dobowy czas pracy nie może przekraczać czterech godzin. W przypadku gdy ciężar ładunku transportowanego przez mężczyznę jest równy 30 kilogramów, nie może być niesiony na odległość większą niż 25 metrów. Jest to limit wynikający bezpośrednio z cytowanego wcześniej rozporządzenia MPiPS, które powstało na podstawie dyrektywy Unii Europejskiej, a tym samym obowiązuje we wszystkich krajach UE. Ten rodzaj transportu wykorzystywany jest głównie w przypadku elementów mających poręczny kształt, ciężar zgodny z przedstawionymi wytycznymi, a wibracje podczas trzymania przedmiotu nie stanowią zagrożenia mogącego wpłynąć na prawidłową pracę (np. mała elektronika w postaci kart pamięci zawierających oprogramowanie, kabli itp.).

Transport za pomocą wózka paletowego (potocznie nazywanego paleciakiem), którego maksymalne obciążenie powinna określać dołączona specyfikacja. Wózek przeznaczony do stosowania w pomieszczeniach czystych nie może być używać poza nimi. Musi być wykonany ze stali szlachetnej niepokrytej farbą, natomiast jego koła muszą zostać stworzone z polimerów. Ze względu na tarcie materiałów plastikowych o podłogę wykonaną z winylu istnieje ryzyko gromadzenia się ładunków elektrostatycznych mogących uszkodzić elektronikę, należy więc zadbać o to, aby istniał punkt bezpośredniego styku elementów przewodzących wózka z podłożem, co zapewni ich odprowadzenie. Używane są zwykle do transportu elementów cechujących się odpornością na drgania, ładunki elektrostatyczne, takich jak obudowy różnych modułów lub nawet osłony całego urządzenia.

Transport za pomocą dźwigu – jego zastosowanie wynika przede wszystkim z ergonomii, braku możliwości dźwigania elementów powyżej 30 kilogramów na odległości powyżej 25 metrów, nieporęczności oraz konieczności wspomagania procesu wnoszenia na większe wysokości. W przypadku tych urządzeń zaleca się stosowanie specjalnych smarów, które podczas tarcia i ogrzewania nie będą emitować dużej ilości związków lotnych, na przykład w postaci tłuszczów, mogących osadzać się w obszarach krytycznych. W zależności od producenta ich udźwig waha się od kilku do kilkuset kilogramów. Powinny być stosowane tylko od dzie-

wiątej do piątej klasy czystości. Materiały użyte do ich wykonania mogą składać się z metalowego łańcucha, poliestrowej liny lub taśmy. Dźwigi stosowane w takich miejscach cechują się płynnością ruchu, wysoką dokładnością dochodzącą do kilku milimetrów, co jest kluczowe w przypadku precyzyjnej instalacji delikatnych komponentów.

Ostatni element, który wspomaga procesy transportowe, nosi nazwę *air caster* (rys. 4), choć spotyka się również następujące nazwy: *air cushion*, *air skate*, *air bearing*. Nazwę tę można przetłumaczyć jako *poduszka powietrzna*. Ze względu na niską popularność w Polsce urządzenie to nie doczekało się oficjalnej nazwy, dlatego wcześniej wymienione należy traktować jako handlowe. Zasada działania polega na dostarczeniu do każdego *air castera* powietrza pod wysokim ciśnieniem, które wypełnia dostępną tam przestrzeń w postaci torusa (kształt ten przypomina rozłożoną i napompowaną dętkę rowerową) wykonanego z poliuretanu lub neoprenu. Sprężone powietrze jest włączane również pod poduszkę, co powoduje uniesienie ładunku o kilka milimetrów nad powierzchnię, dzięki czemu zachowuje się tak, jakby znajdował się na lodzie lub poduszkowcu. *Air caster* umożliwia swobodne przemieszczanie elementów we wszystkich kierunkach poziomych. Każda poduszka jest podłączona do tego samego regulatora, co pozwala na automatyczną korekcję; jest to istotne w przypadku nierównomiernego rozmieszczenia ładunku. Zastosowanie tego urządzenia w pomieszczeniach czystych jest dozwolone, gdy powietrze włączane do każdej poduszki będzie podlegać takim samym restrykcjom jak to, które jest już tam obecne, czyli obowiązkowa jest jego uprzednia filtracja. Zalety przemawiające za zastosowaniem tego rodzaju środka transportu są następujące: nie wywołuje on drgań charakterystycznych dla zwykłych kółek, nie powoduje zniszczeń podłogi podczas transportu ciężkich komponentów, jego mobilność w porównaniu z dźwigiem ogranicza tylko długość węża z dostarczonym powietrzem oraz nie zajmuje zbyt dużo miejsca. *Air caster* może być zainstalowany na stałe lub jako narzędzie wspomagające podczas transportu. W zależności od przeznaczenia dostępne są również wersje w postaci wózka, platformy, dźwigu, a nawet obrotnic. Warunkiem niezbędnym do prawidłowego działania poduszek jest konieczność używania ich na powierzchniach płaskich i pozbawionych szczelin dylatacyjnych. Z powodzeniem mogą być użytkowane w pomieszczeniach wyższych klas, ponieważ nie emitują żadnych substancji (*We move your World. Air Caster Transportation*, 2016: 16, 31). Wykorzystywane są zwykle do końcowego transportu gotowych, dużych elementów składających się z kilkudziesięciu części, których rozmieszczenie wymagało bardzo dużej precyzji, a ich złożenie u odbiorcy może być trudne ze względu na brak specjalistycznego sprzętu kalibracyjnego. Przykładem jest transport wcześniej wspomnianego źródła składającego się z generatora kropel cyny, lasera oraz łapacza resztek procesowych cyny, który ma za zadanie chronić elipsoidalne zwierciadło EUV przed zanieczyszczeniami, mogącymi spowodować awarię zagrażającą sprzętowi i zdrowiu personelu.



Rysunek 4. Działanie air castera

Źródło: *We move your World. Air Caster Transportation*, 2016: 3, 5.

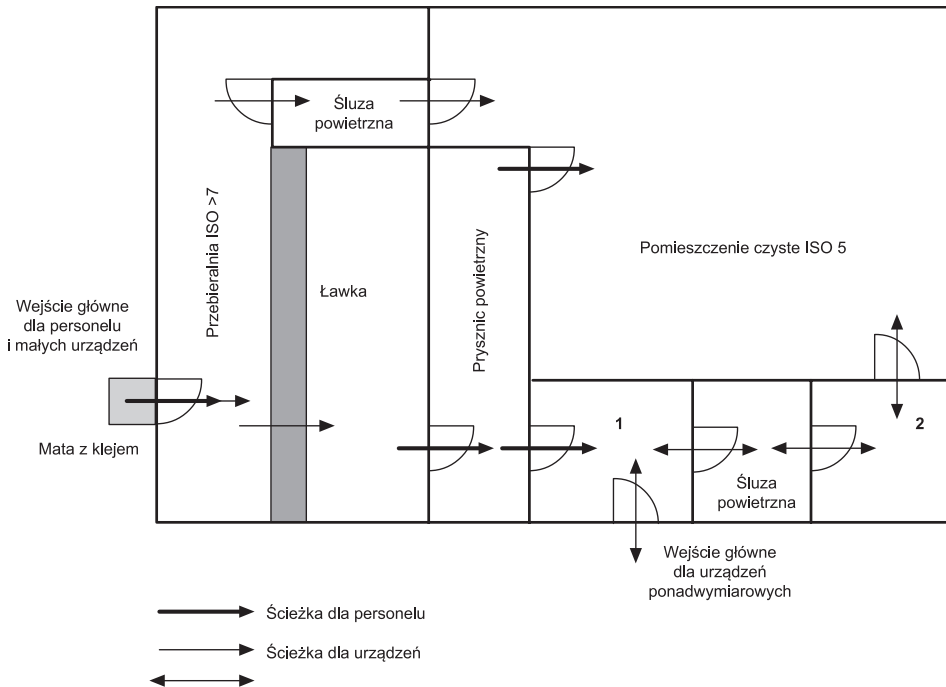
W razie potrzeby transportu pomiędzy dwoma punktami, które nie znajdują się w bliskim sąsiedztwie, można skorzystać z następujących środków:

- transportu lądowego,
- transportu wodnego,
- transportu lotniczego,

Wybór odpowiedniego środka jest uzależniony od wielu czynników, w których skład wchodzi na przykład czas dostawy, odporność na czynniki zewnętrzne, koszt organizacji całego procesu itp.

Procedury transportowania

W przypadku konieczności transportu mniejszego urządzenia (typu laptop) do wnętrza pomieszczenia czystego najpopularniejszym sposobem jest skorzystanie ze służby powietrznej, która może zostać ulokowana w przebieralni. Przedmioty wprowadzane tą drogą nie powinny stwarzać zagrożenia dla czystości. Cały proces, którego schemat jest przedstawiony na rysunku 6, rozpoczyna się od opcjonalnego użycia odkurzacza, obowiązkowego wytarcia akcesorium specjalną chusteczką bezpyłową nasączoną 70-procentowym alkoholem izopropylowym (IPA), który ma za zadanie zlikwidować patogeny, rozpuścić i usunąć brud. Następnie jest ono umieszczane w służbie, która składa się z dwóch par małych drzwi po przeciwległych stronach (jedna para znajduje się we wcześniej wspomnianej przebieralni, druga natomiast w pomieszczeniu czystym) (Hashim i in., 2006: 5; *Science and Engineering Building Cleanroom Users Protocol*, 2013: 9–11, 17, 20). Zasada działania i wyposażenie jest identyczne jak w przypadku przedsionka. Użytkowanie strefy po prawej stronie w przebieralni (za ławką) wymaga posiadania ochraniaczy na nogach (Kitain, 2010: 17–20).



Rysunek 5. Schemat procesu przemieszczania elementów z zewnątrz do pomieszczenia czystego oraz z pomieszczenia czystego na zewnątrz

Źródło: opracowanie własne na podstawie Kitain, 2010: 18–19.

Gdy zachodzi konieczność wprowadzenia większego elementu, który przekracza maksymalne wymiary śluzy powietrznej, należy skorzystać z pomieszczeń oznaczonych cyframi 1 i 2 (rys. 5). Procedura w pomieszczeniu pierwszym polega zwykle na wyciągnięciu przedmiotu z opakowania transportowego (mogą one składać się nawet z elementów drewnianych), użyciu sprężonego powietrza w celu usunięcia zanieczyszczeń oraz opcjonalnym przetarciu powierzchni przedmiotu chusteczkami IPA, dopiero wtedy można usunąć pierwszą warstwę folii i przekazać przedmiot poprzez śluzę (której zasada działania zbliżona jest do przedsionka i śluzy umieszczonej w przebieralni) do pokoju drugiego, w którym stosuje się analogiczną procedurę. Ostatnia warstwa ochronna powinna zostać usunięta w pomieszczeniu czystym. Schemat może różnić się w przypadku pomieszczeń zachowujących wyższą klasę czystości, ponieważ pomieszczenia mogą być dodatkowo wyposażone w autoklawy zamiast śluz powietrznych. W przypadku konieczności wyprowadzenia gotowego produktu (typu skaner ASML NXE) z pomieszczenia bezpyłowego używa się tych samych pomieszczeń, co w przypadku procedury wprowadzania urządzenia ponadwymiarowego. Operacja jest zdecydowanie łatwiejsza, ponieważ przedmiot jest już ofoliowany przed dotarciem do pomieszczenia drugiego, w którym może odbyć się tylko proces umieszczenia w specjalnym opakowaniu transportowym o kształcie

przystosowanym do różnych pojazdów używanych w transporcie. Można zauważyć, że urządzenia transportowane pomiędzy różnymi obiektami cechują się wielowarstwowością opakowania. Transportery muszą się charakteryzować dużą odpornością na zanieczyszczenia, wahania temperatury, wilgotność, a także przeciwdziałać możliwym wstrząsom. Dlatego używane są kontenery posiadające wzmocnienie, które jest w stanie ograniczyć wpływ wibracji na elementy wrażliwe. Ze względu na szczelność skutecznie zapobiegają przenikaniu cząstek stałych oraz wilgoci. W przypadku konieczności utrzymywania pożądanej temperatury wyposażane są w układy chłodnicze zasilane energią elektryczną zmagazynowaną w akumulatorach lub pochodzącą z sublimacji zestalonego dwutlenku węgla, czyli suchego lodu. Takie rozwiązanie może niwelować zjawisko rozszerzalności temperaturowej powodującej naprężenia, mogące uszkodzić gotowe urządzenie. Jeżeli występuje wilgoć, może dojść do zwarcia w obrębie elektroniki, na przykład czujników czy okablowania. Z kolei elementy pozbawione izolacji narażone są na zaśniedzenie spowodowane działaniem na miedź tlenu i wody, co w konsekwencji może pogorszyć przewodność elektryczną. Kondensacja pary wodnej, która może zawierać zanieczyszczenia powszechnie występujące w powietrzu, również jest zjawiskiem niedopuszczalnym. Osadzając się na zwierciadłach (znacznie różniących się od zwykłego lustra między innymi gładkością powierzchni odbijającej, która zapobiega powstawaniu dużych strat), para uszkadza je, wskutek czego stają się bezużyteczne. Każdy z powyższych parametrów powinien być zawarty w dokumentacji przewozu, która stanowi podstawę do dokonywania zmian.

Podsumowanie

Rozwój przemysłu półprzewodnikowego możliwy był wyłącznie dzięki staraniom jednostek militarnych, zmierzającym do stworzenia środowiska wolnego od zanieczyszczeń, które powodowały szybkie uszkodzenie kluczowych komponentów instalowanych w statkach powietrznych przeznaczenia militarnego, jak również szkody zdrowotne wywołane pyłem radioaktywnym. Analizując przedstawione w tekście informacje, można wywnioskować, jak duży nakład pracy i środków finansowych (związanych na przykład z częstą wymianą powietrza czy też koniecznością projektowania i prania specjalnych kombinezonów) jest potrzebny do stworzenia środowiska wolnego od zanieczyszczeń. Poziom zaawansowania elektroniki, a zarazem jej wrażliwość na zanieczyszczenia powoduje konieczność dostosowania procedur transportowych, czyniąc z transportu kluczowy aspekt funkcjonowania przedsiębiorstw zajmujących się produkcją półprzewodników. W artykule problematykę tę udało się omówić w sposób wyczerpujący, bazując na ogólnodostępnych informacjach o firmie ASML Netherlands.

Bibliografia

- Certifited Unit Load Devices for Your Unique Air Cargo*, <https://vrr-aviation.com/> [dostęp: 17.09.2019].
- Charkowska A. (2014), *Pomieszczenia czyste. Cz. 1*, „Miesięcznik Chłódnictwo i Klimatyzacja”, nr 12.
- Charkowska A. (2015), *Pomieszczenia czyste. Cz. 2*, „Miesięcznik Chłódnictwo i Klimatyzacja”, nr 01–02.
- Dynamic Design: The Cleanroom* (b.r.), <https://genesission.jpl.nasa.gov/educate/scimodule/CleanRoom/pdfs/SuitingUpST.pdf> [dostęp: 17.09.2019].
- Fertsch M., Janiak T. (2006), *Słownik terminologii logistycznej*, Instytut Logistyki i Magazynowania, Poznań.
- Gerven P. (2011), *ASML in 40 terms. The ASML exposure apparatus is the most expensive and complex step in the chip fabrication process. What is involved in the lithography business?*, <https://www.asml.com/the-asml-exposure-apparatus-is-the-most-expensive-and-complex-step-in-the-chip-fabrication-process-what-is-involved-in-the-lithography-business/en/s28145?rid=44709> [dostęp: 17.09.2019].
- Hashim U., Jamal Z., Phang K.C., Nurzaihan M., Halim N., Razak H. (2006), *Design and construction of micro fabrication cleanroom for teaching microelectronic undergraduate*, Northern Malaysia University College of Engineering, Malaysia.
- High Efficiency Particulate Air (HEPA) Filters Description and Testing*, https://www.env.nm.gov/NMED/Issues/WIPP_docs/DOE_HEPA_Description_and_WIPP_ArrangementA.pdf [dostęp: 17.09.2019].
- Kastango E., DeMarco S. (2001), *Pharmacy Cleanroom Project Management Considerations: An Experience-Based Perspective*, “International Journal of Pharmaceutical Compounding”, Vol. 5, No. 3 May/June.
- Kitain M. (2010), *Cleanrooms in pharmaceutical production*, https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/13196/Kitain_Mikhail.pdf [dostęp: 17.09.2019].
- Klasy czystości pomieszczeń ISO* (2017), <http://westa-ct.pl/pl/oferta/walidacja/> [dostęp: 17.09.2019].
- Light source technology*, <https://www.cymer.com/light-source-technology/> [dostęp: 17.09.2019].
- Main Offices* (2019), <https://www.asml.com/en/company/about-asml/locations> [dostęp: 17.09.2019].
- McGrath D. (2017), *ASML Claims Major EUV Milestone*, https://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1332012 [dostęp: 17.09.2019].
- Our history* (2018), <https://www.asml.com/en/company/about-asml/history> [dostęp: 17.09.2019].

- PAS 5500/1150C 193-nm Step-and-Scan, https://www.asml.com/products/systems/pas5500/en/s46437?dfp_product_id=1964 [dostęp: 17.09.2019].
- PN-EN ISO 14644-1:2016-03 Pomieszczenia czyste i związane z nimi środowiska kontrolowane – Część 1: Klasyfikacja czystości powietrza na podstawie stężenia cząstek.
- PN-EN ISO 14644-14:2016-12 Pomieszczenia czyste i związane z nimi środowiska kontrolowane – Część 14: Ocena przydatności urządzeń do użytkowania na podstawie stężenia cząstek zawieszonych w powietrzu.
- PN-EN ISO 14644-2:2016-03 Pomieszczenia czyste i związane z nimi środowiska kontrolowane – Część 2: Monitorowanie w celu wykazania spełnienia wymagania dla pomieszczenia czystego z uwagi na czystość powietrza w odniesieniu do stężenia cząstek.
- Sandle T. (2016), *The development of cleanrooms: an historical review. Part 1: From civil war to safe surgical practice*, University of Manchester, Manchester.
- Sandle T. (2017a), *The development of cleanrooms: an historical review. Part 2: The path towards international harmonisation*, University of Manchester, Manchester.
- Sandle T. (2017b), *Applying design and construction standards to cleanroom builds*, “Cleanroom Technology”, Vol. 25(8).
- Sandle T., Saghee M.R. (2012), *Cleanroom Technology: Inside the Box*, Pharmaceutical Manufacturing and Packing Sourcer.
- Science and Engineering Building Cleanroom Users Protocol* (2013), University of Nevada, Las Vegas, <https://www.unlv.edu/sites/default/files/24/SEB-Cleanroom-Manual.pdf> [dostęp: 17.09.2019].
- Shilov A. (2016), *EUV Lithography Makes Good Progress, Still Not Ready for Prime Time*, <https://www.anandtech.com/show/10097/euv-lithography-makes-good-progress-still-not-ready-for-prime-time> [dostęp: 17.09.2019].
- Tomaszewski P. (2014), *Jan Czochralski – historia człowieka niezwykłego*, PAN, Wrocław.
- Verrijt H. (2017), *ASML heeft nieuwe megahal hard nodig*, <https://www.ed.nl/asml/asml-heeft-nieuwe-megahall-hard-nodig~aa0c87ee/> [dostęp: 17.09.2019].
- We move your World. Air Caster Transportation* (2016), https://www.pjmindustrial.com.au/literature_227267/Aerofilm_Systems_Air_Caster_Transportation_Systems_Catalogue [dostęp: 17.09.2019].

Akty prawne

- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 14 marca 2000 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy ręcznych pracach transportowych, Dz.U. 2000, nr 26, poz. 313.

Summary**Transportation processes in clean rooms: The example of the company 'ASML Netherlands'**

This article describes the preconditions which need to be met if a room is to be designated as a "cleanroom". Concepts needed to understand cleanrooms are presented. The history of efficient contamination filters, including the first breathing filters for fireman exposed to toxic combustible products, filters initially widely used in the military industry, and current filters used in many different industries is discussed. The article describes cleanroom specifications, including contamination classifications which can negatively influence the production processes of advanced electronics systems. The article outlines transportation methods and obligatory procedures inside cleanrooms, together with links to the external (natural) environment, inspired by the company 'ASML Netherlands'. It is concluded that the information described concerning cleanroom requirements has a direct quality impact on offered products, and all efforts leading to high cleanroom standards are a major part of the job which companies need to achieve from a financial and workload perspective.

Keywords: cleanroom, particles, transport, pollution, dust