

Wpłynęło 12.07.2013 r.
Zrecenzowano 03.09.2013 r.
Zaakceptowano 17.09.2013 r.
A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

PRZYDATNOŚĆ WYBRANYCH GATUNKÓW LIP (*Tilia* sp.) DO FITOREMEDIACJI POWIETRZA Z ZANIECZYSZCZEŃ PYŁOWYCH

Katarzyna J. SADOWIEC¹⁾BCDEF, Stanisław W. GAWROŃSKI²⁾AD

¹⁾ Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Zakład Biologii Środowiska i Higienizacji Wsi

²⁾ Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Samodzielny Zakład Przyrodniczych Podstaw Ogrodnictwa

Streszczenie

Rozwijające się urbanizacja, transport i przemysł są źródłem zanieczyszczeń mikropyłowych, które wpływają na pogorszenie jakości powietrza i stanowią zagrożenie dla zdrowia mieszkańców. Drzewa są coraz bardziej doceniane jako naturalne filtry powietrza oczyszczające je z zanieczyszczeń mikropyłowych. Lipy to drzewa bardzo często spotykane w miastach, zarówno w parkach, jak i przy ulicach naszej strefy klimatycznej. W niniejszej pracy porównano wybrane gatunki i odmiany lip, różniące się wyglądem i wymaganiami pod względem ich zdolności do akumulacji zanieczyszczeń mikropyłowych. W doświadczeniach sprawdzano ilość pyłów o średnicy aerodynamicznej cząstek 10–100 µm, 2,5–10 µm oraz 0,2–2,5 µm, jakie zgromadziły się na powierzchni liści i w woskach. Najlepszym fitoremediantem okazała się *Tilia cordata* Mill. (lipa drobnolistna). Liście lipy holenderskiej ‘Pallida’ również bardzo dobrze gromadziły zanieczyszczenia.

Słowa kluczowe: mikrocząsteczki, *Tilia*, zanieczyszczenia powietrza, zieleń miejska

WSTĘP

Zieleń miejska to obszary zaprojektowane i utrzymywane, takie jak parki, zieleńce, zieleń uliczna itd., oraz zachowana w procesie tworzenia miasta zieleń naturalna, jak np. lasy miejskie. Drzewa doceniane są coraz bardziej jako naturalne filtry oczyszczające powietrze na terenach zurbanizowanych.

Do cytowania For citation: Sadowiec K.J., Gawroński S.W. 2013. Przydatność wybranych gatunków lip (*Tilia* sp.) do fitoremediacji powietrza z zanieczyszczeń pyłowych. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 13. Z. 3(43) s. 131–148.

Głównymi źródłami zanieczyszczeń mikropyłowych w miastach są ogrzewanie mieszkań i transport. Aerosol ziarnisty, to cząstki stałe lub ciekłe, o średnicy mniejszej niż 10 μm , zawieszone w powietrzu atmosferycznym. Występują m.in. w kurzu, sadzy i dymie, często zawierają substancje mutagenne i kancerogenne oraz są nośnikami substancji toksycznych. Pyły te mogą zatrzymywać się na powierzchni roślin, w tym na liściach. Drzewa są skutecznymi fitoremediantami powietrza, oczyszczają je z zanieczyszczeń mikropyłowych i charakteryzuje je większy stopień suchej depozycji niż inne organizmy lądowe. Lipy od zawsze współtworzą zielen miejską. Niektóre gatunki lip dobrze radzą sobie w otoczeniu jezdni. Jedną z głównych zalet tych drzew w usuwaniu zanieczyszczeń, jest duża powierzchnia liściowa, gdyż starsze drzewa często tworzą duże, gęste korony. W niniejszej publikacji porównano wybrane gatunki i odmiany lip pod względem ich zdolności fitoremediacyjnych.

PYŁY ZAWIESZONE – CHARAKTERYSTYKA, SKŁAD CHEMICZNY I WŁAŚCIWOŚCI CZĄSTEK

Pył zawieszony w powietrzu, czyli aerosol, może być pochodzenia naturalnego lub antropogenicznego.

Wraz z rozwojem cywilizacyjnym zmienia się stężenie, skład chemiczny i struktura fizyczna aerosolu atmosferycznego w wielu obszarach świata. Aerosol jest układem dwufazowym, który składa się z gazu i cząstek w nim zawieszonych. Cząstki te, to skupienie materii (stałe lub ciekłe). Są one większe niż pojedyncze molekuly [PASTUSZKA 2007]. Cząstki aerosolu w ciekłym stanie skupienia (krople) są najczęściej kształtem zbliżone do kuli, natomiast cząstki stałe przyjmują bardziej skomplikowane kształty geometryczne [PASTUSZKA 2007].

Norma europejska zawiera zdefiniowane frakcje wymiarowe cząstek, które są stosowane do oceny możliwych skutków zdrowotnych, spowodowanych wdychaniem cząstek zawieszonych w powietrzu w miejscu pracy. Na podstawie tych norm frakcje podzielono na frakcję wdychaną, frakcję tchawiczną i frakcję respirabilną [JANKOWSKA, SOŚNIAK 2006].

Przyjęto, że cząstki aerosolu mieszczą się w zakresie średnic od 0,001 do 100 μm . Cząstki pyłów dzieli się na trzy główne grupy ze względu na ich wielkość i wpływ na zdrowie. Cząstki o średnicy 100–10 μm (PM_{10}) to pył zawieszony wychwytywany i usuwany przez górne drogi oddechowe. Powoduje podrażnienie oczu, nosa, krtani i może być usunięty z górnych dróg oddechowych np. przez kaszel. Pył o średnicy cząstek 10–2,5 μm , czyli $\text{PM}_{2,5}$, to pył drobniejszy, znacznie groźniejszy. Jest to pył respirabilny, to znaczy, że cząstki te mogą dostawać się do tchawicy, oskrzeli i oskrzelików. Cząstki najdrobniejsze ($\text{PM}_{0,2}$) łatwo wnikają do pęcherzyków płucnych. Te najdrobniejsze cząstki są najniebezpieczniejsze dla zdrowia [ARIOLA i in. 2004; PASTUSZKA 2007].

Skład chemiczny cząstek mikropyłów jest ważny, ponieważ determinuje on ich potencjalny wpływ na roślinność. Te cząstki, które są nieczynne chemicznie, będą oddziaływały na rośliny w czysto fizyczny sposób. Te, które są aktywne chemicznie, mogą powodować bezpośrednie fizjologiczne (np. toksykologiczne) odpowiedzi na powierzchni lub wewnątrz liścia lub wpływać na chemię substratu [BELL, TRESHOW 2002].

Stosunkowo niewiele badań prowadzono nad nieczynnymi chemicznie mikropyłami i badania polowe na ten temat dotyczyły zazwyczaj cząstek pyłów pochodzących ze względu na powolnego wietrzenia skał, np. granitów.

Wiele źródeł cząstek mikropyłów, znanych z powodowania ekstensywnych problemów u roślin, jest pochodzenia wapiennego. Liczne badania zaznaczają istotną rolę pyłu pochodzącego z procesu wyrobu cementu. Pył powstały z wypalania cementu może w znacznym stopniu składać się z tlenku wapnia. Jest on nie tylko alkaliczny, lecz również wysoce reaktywny z wodą i znany z tego, że powoduje rozległe uszkodzenia u roślin narażonych na jego wpływ [BEL, TRESHOW 2002]. Roztwory pyłu z cementowni zawierały sporą ilość metali ciężkich i dwusiarczynów [DARLEY 1966].

Mikropyły pochodzące z ruchu ulicznego mogą mieć różne źródła. Nieutwardzone drogi mogą być pokryte wapiennym żwirem i w ten sposób generować zasadowe mikropyły. Jednak, w terenach miejskich, wiele mikropyłów pochodzi z silników samochodów. Takie cząstki mogą zawierać znaczną ilość metali ciężkich [SANTELMANN, GORHAM 1988] i być potencjalnie toksyczne.

Mikropyły, ze względu na źródło pochodzenia, mają specyficzny skład chemiczny. Najbardziej znaczące są te pochodzące z transportu i procesów spalania węgla. Pył węglowy często zawiera sporą ilość siarki i fluoru [RAO 1971], które to pierwiastki mogą wywierać toksyczny wpływ na rośliny. Pyły powstałe w procesie spawania charakteryzuje kulisty kształt i niewielkie rozmiary (poniżej 1 μm). Zawierają one żelazo, mangan, chrom, nikiel oraz związki organiczne, nawet dioksyny i dibenzofurany. Pyły ze spalin z silników Diesla to stałe cząstki, o różnych wymiarach i kształtach, najczęściej wielkości 0,1–0,5 μm . Cząstki te składają się z węgla elementarnego i zaabsorbowanych na nim związków organicznych [JANKOWSKA, SOŚNIAK 2006]. Najbardziej liczny, wykryty składnikiem o 4-, 8- i 6-procentowej łącznej koncentracji w PM_{10} , $\text{PM}_{2,5}$ i PM_1 , jest siarka. Te trzy frakcje były zbierane w różnych warunkach, jednak zanotowano, że typowe dla aerozolu nadmorskiego Na i Cl oraz dla związanych z glebą mikropyłów, jak Al, Si, Ca, Ti, Fe, były skoncentrowane głównie w grubej frakcji PM_{10} [ARIOLA i in. 2006]. W pyłach PM_{10} stwierdzono obecność takich metali, jak Cu, Fe, Pb i in. [FERNÁNDEZ ESPINOZA, ROSSINI OLIVA 2006].

Pyły drobne mogą zawierać WWA (wielocykliczne węglowodory aromatyczne) i metale ciężkie. Głównym źródłem cynku, chromu i miedzi w atmosferze są spaliny samochodowe [KEMP 2002]. Akumulacja lub degradacja WWA na liściach jest zależna od temperatury (JOURAEVA i in. 2006).

DEPOZYCJA

Czynnikiem kluczowym, który determinuje wielkość wpływu, jaki mikropyły mogą mieć na roślinność, jest stopień depozycji cząstek [BELL, TRESHOW 2002]. W przypadku dróg, poziom depozycji zależy od liczby pojazdów. Na nieutwardzonych drogach, ze średnim dziennym korkiem ulicznym wynoszącym 250 samochodów, stwierdzono koncentrację głównych pyłów atmosferycznych w ilości $584 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$, podczas gdy na utwardzonej drodze, ze współczynnikiem średniego załoczenia wynoszącym 18 000, koncentracja pyłów wynosiła $463 \mu\text{g}\cdot\text{m}^3$. Depozycja jest mniejsza wraz z odległością od drogi, ale jest wykrywalna aż do 1 km oddalenia od drogi [BELL, TRESHOW 2002]. Wiele czynników wpływa na depozycję, między innymi siła wiatru (wpływ na rozprzestrzenianie się większych cząstek na większe odległości) i opady atmosferyczne (oczyszczenie atmosfery, zmycie cząstek z powierzchni roślin). Depozycja mikropyłów może pojawić się za sprawą następujących procesów:

- sedymentacji (proste osiadanie cząstek mikropyłów z atmosfery),
- dyfuzji,
- turbulencji (zwłaszcza wokół powierzchni roślin),
- wymycia/usunięcia przez deszcz lub utajoną depozycję (mgła lub dym).

Kluczowym czynnikiem warunkującym depozycję mikropyłów jest struktura oraz szorstkość powierzchni. Zwiększona szorstkość, chropowatość powierzchni wpływa na wzrost depozycji. [BELL, TRESHOW 2002]. Oddziaływanie to może być na dużą skalę (obecność lasów) lub w mniejszym stopniu (np. drobno powcinane liście, mchy). Mokre powierzchnie również sprzyjają depozycji [PYE 1987]. A zatem charakter otaczającej roślinności jest ważny w ocenie jakichkolwiek sposobów dyspersji pyłów [BELL, TRESHOW 2002]. Stwierdzono również, że rozmiar mikropyłów ma wpływ na szybkość depozycji mikropyłów V_g (velocity of particles). Okazało się, że w przypadku zarówno drzew iglastych, jak i liściastych V_g , czyli tym samym depozycja, dla pyłów najdrobniejszych (o średnicy poniżej $1 \mu\text{m}$) była większa, niż w przypadku pyłów drobnych i największych. Jest to istotna obserwacja, ponieważ drobniejsze pyły są wchłaniane głębiej do układu oddechowego i ze wszystkich frakcji są najniebezpieczniejsze dla zdrowia [FREER-SMITH i in. 2005].

WPLYW PYŁÓW ZAWIESZONYCH NA STAN POWIETRZA I KLIMAT

Pyły zawieszone wpływają na efekty optyczne w atmosferze, gdyż znaczący wzrost ich stężenia w atmosferze powoduje spadek widoczności, co w efekcie pogarsza jakość powietrza. Jednak podstawowym skutkiem dużego stężenia aerozolu w atmosferze, a dokładniej oddziaływania jego cząstek z falą światła, jest zmniejszenie ilości promieniowania słonecznego, które dociera do powierzchni Ziemi.

Skutkuje to spadkiem plonów, pogorszeniem zdrowia mieszkańców, natomiast w wymiarze globalnym – wpływa na klimat [PASTUSZKA 2007].

WPLYW PYŁÓW ZAWIESZONYCH NA ZDROWIE CZŁOWIEKA

Zwiększone stężenie aerozolu atmosferycznego oraz zmiany w jego budowie chemicznej i fizycznej wywołują negatywne skutki zdrowotne u mieszkańców zanieczyszczonych obszarów [PASTUSZKA 2007]. Szkodliwość pyłów, również tych antropogennych, jak np. dymy spawalnicze, czy spaliny z silników Diesla, jest tym większa, im mniejsza jest średnica aerodynamiczna pyłów, które wdycha człowiek [JANKOWSKA, SOŚNIAK 2006]. Najbardziej szkodliwe są pyły najdrobniejsze, czyli pyły respirabilne o średnicy aerodynamicznej poniżej 1 μm , które wnikają głęboko do przewodu oddechowego, aż do pęcherzyków płucnych i nie mogą być usunięte z organizmu [PASTUSZKA 2007]. W pyłach potrafią występować bardzo szkodliwe, mutagenne i kancerogenne substancje, takie jak WWA (ang. PAH) i metale ciężkie. Istnieje związek między środowiskiem a genetycznymi zmianami związanymi z nowotworami i powikłaniami reprodukcyjnymi [PERERA i in. 1992]. Pyły zostały uznane przez Europejską Agencję Środowiska za najgroźniejsze zanieczyszczenie powietrza i oszacowano, że spowodowały zachorowania i zgony 348 000 obywateli UE narażonych na wpływ tego zanieczyszczenia [WHO 2010].

ROLA ZIELENI W TERENACH ZURBANIZOWANYCH

Jako zieleń miejska rozumiane są wszystkie tereny czynne biologicznie w obrębie miast, niezależnie od tego, kto jest ich właścicielem i jak są użytkowane [BÖHM 1999].

Zieleń miejska ma wiele zalet, a jedną z najważniejszych jest akumulacja CO₂, głównego gazu cieplarnianego. Drzewa rosnące w mieście przyczyniają się do zmniejszania tzw. wysp ciepła, tłumią hałas, poprawiają warunki klimatyczne i jakość wody, redukują ulatnianie się bitumów, przyczyniają się do rozwoju turystyki i poprawiają wygląd miasta [BRACK 2002].

Główną zaletą roślin jest umiejętność pobierania wielu różnych zanieczyszczeń jednocześnie. Z gleby mogą pobierać metale ciężkie i związki organiczne, a z atmosfery nie tylko gazy, jak NO_x, CO₂ i O₃, ale również pyły [GAWROŃSKI 2009]. Rośliny pełnią ważną rolę w usuwaniu zanieczyszczeń obecnych w powietrzu oraz są wykorzystywane w biomonitoringu zanieczyszczeń środowiska. Badania wykazały, że część ołowiu osadza się na powierzchni liści (ilość ołowiu w niemytych próbkach liści była zazwyczaj większa). Zawartość ołowiu w liściach i pędach malała wraz ze zwiększającą się odległością rosnących drzew od źródła zanieczyszczenia, czyli ruchliwej ulicy [RĄCZKA, GAWROŃSKI 2004].

Drzewa charakteryzuje większy niż inne organizmy lądowe, stopień depozycji [MCDONALD i in. 2007]. Drzewa liściaste są bardziej wytrzymałe na zanieczyszczenia niż wiele gatunków iglastych. Rośliny iglaste natomiast są często lepszymi „pochłaniaczami” zanieczyszczeń mikropyłowych. Drzewa mogą zachowywać się jak biologiczne filtry ze względu na ich dużą powierzchnię liści w stosunku do powierzchni gruntu, na którym rosną oraz właściwości fizyczne ich powierzchni. W ten sposób drzewa poprawiają jakość powietrza w zanieczyszczonych obszarach [BECKETT i in. 1997]. Sezonowe gubienie liści drzew liściastych umożliwia utylizację zanieczyszczeń. Z powodu dużej powierzchni liści i ruchów powietrza, drzewa gromadzą więcej zanieczyszczeń (w tym PM) niż rośliny zielne [FOWLER i in. 1989].

Fitoremediacja jest to stosowanie roślin do usunięcia zanieczyszczeń ze środowiska lub czynienie ich nieszkodliwymi [SALT i in. 1998]. Fitoremediacja jest innowacyjną, biologiczną technologią usuwania metali ciężkich lub zanieczyszczeń organicznych, również z gleby [ROSSELLI i in. 2003]. Bardzo istotną zaletą fitoremediacji jest bezpośrednie zastosowanie *in situ*, czyli w miejscu wystąpienia skażenia. Powstaje przy tym bardzo mało zanieczyszczeń wtórnych, gdyż nie stosuje się dodatkowych związków ekstrahujących. Fitoremediację cechuje również wielokrotnie niższy koszt w porównaniu z oczyszczaniem środowiska za pomocą technik tradycyjnych [MARECIK i in. 2006].

MATERIAŁ BADAWCZY

Rodzaj *Tilia* należy do rodziny *Tiliaceae* (lipowate). Do tego rodzaju należy 40 gatunków na półkuli północnej (Europa, Ameryka, Azja), w Polsce występują dziko dwa gatunki [SENETA, DOLATOWSKI 2006]. Lipy są to drzewa zrzucające liście jesienią, o gałęziach często pokrytych gwiazdkowatym kutnerem [KRÜSSMANN 1985]. Gatunki należące do tego rodzaju mają pojedyncze lub gwiazdkowate włoski na różnych częściach drzewa. Lipy to drzewa bardzo dekoracyjne, zwłaszcza ze względu na swój pokrój. Pod tym względem najatrakcyjniejsze są stare, swobodnie rosnące lipy. Liście niektórych gatunków mają nalot woskowy (np. *Tilia euchlora*), czy kutner (np. *Tilia tomentosa*). Lipy są ważnymi drzewami alejowymi w miastach, ale doskonale sprawdzają się również na otwartych przestrzeniach. Do nasadzeń w miastach należy stosować gatunki o dużej odporności na zanieczyszczenia, suche powietrze i suszę glebową. Wszystkie gatunki lip cechuje wrażliwość na zasolenie gleby. Drzewa te preferują stanowiska słoneczne lub półcieniste. Lipy są na ogół odporne na mróz. Wymagają gleb przeciętnych, raczej żyznych i świeżych oraz nie za suchych. Najmniej wrażliwe na suszę są gatunki o liściach pokrytych kutnerem. W nasadzeniach miejskich najlepiej sprawdza się lipa srebrzysta i jej odmiany [SENETA, DOLATOWSKI 2006].

Lipa szerokolistna – *Tilia platyphyllos* Scop.

Lipy należące do tego gatunku to drzewa duże, dorastające do wysokości 40 m. Gatunek ten występuje naturalnie w Polsce. Swoje naturalne siedliska ma na południu niżu i w górach (do 800–900 m n.p.m.), często wraz z drzewami klonów (tzw. zespoły *Aceri-Tilietum*). Lipa szerokolistna ma w Polsce swoją północną granicę zasięgu. Jest to bardzo zmienny gatunek, zwłaszcza pod względem stopnia pokrycia kutnerem różnych części drzewa [SENETA, DOLATOWSKI 2006]. Lipę szerokolistną charakteryzują większe wymagania siedliskowe niż opisaną niżej lipę drobnolistną, jednak gdy ma dogodne warunki rośnie szybciej od lipy drobnolistnej.

Lipa drobnolistna – *Tilia cordata* Mill.

Lipa drobnolistna występuje w lasach liściastych Europy (od północnej Hiszpanii po Kaukaz i Syberię) i jest bardzo często sadzona w parkach i przy ulicach [MITCHELL 1979]. W Polsce występuje dziko na terenie całego kraju i jest drzewem typowym dla łąk. Gatunek ten cechuje się lepszą tolerancją w stosunku do gleb niż lipa szerokolistna [SENETA, DOLATOWSKI 2006]. Są to drzewa wrażliwe na zasolenie gleb [BOROWSKI 2009], dlatego powinny być sadzone w pewnej odległości od ulic. Lipa drobnolistna osiąga wysokość do 30–35 m. Pędy są zazwyczaj nagie, liście również nie posiadają włosków, poza charakterystyczną „bródką” u nasady liścia [SENETA, DOLATOWSKI 2006].

Lipa srebrzysta – *Tilia tomentosa* Moench

Lipa srebrzysta (syn. lipa węgierska, *T. aregentea* Desf.) to drzewo dorastające do 30 m wysokości. Zasięg występowania tego drzewa obejmuje środkową i południowo-wschodnią Europę oraz południowo-zachodnią Azję. W Polsce jest to gatunek bardzo zmienny, w uprawie przeważa jeden klon, który ma jajowatą koronę bez wyraźnego przewodnika, składającą się z wyprostowanych konarów wyrastających równorzędnie. Starsze okazy cechuje inny wygląd korony o wyraźnym przewodniku. Pędy oraz inne części lip srebrzystych posiadają gwiazdziste włoski. Gdy liście są młode, pokrywa je gęsty biały kutner. Starsze liście są od spodu białe, gdyż pokryte są gęstym kutnerem, zaś ich wierzchnia strona jest ciemnozielona. Ze względu na regularne, gęste i zwarte korony jest to gatunek dekoracyjny. Latem korony te przybierają srebrzystą barwę, ponieważ liście ustawiają się o tej porze roku pionowo, dolną stroną liścia do góry (w stronę promieni słonecznych), chroniąc się w ten sposób przed nadmierną utratą wody na skutek transpiracji. Gatunek ten (oraz jego odmiany) charakteryzuje największa tolerancja na niekorzystne warunki, takie jak susza, czy zanieczyszczone, suche powietrze. Jest to bardzo dobry gatunek do stosowania w miastach. Można go sadzić w pobliżu ulic. W takich warunkach dłużej niż inne gatunki drzew utrzymuje zdrowe liście.

Lipa srebrzysta, odmiana Brabant – *Tilia tomentosa* ‘Brabant’

Ta jedna z nowszych odmian, to duński klon lipy srebrzystej. Drzewo to jest uważane za doskonałe do nasadzeń miejskich, gdyż doskonale radzi sobie z trud-

nymi warunkami miejskiego środowiska. Odmiana Brabant ma bardziej regularną i piramidoidalną formę niż gatunek [Barcham]. Ta forma lipy srebrzystej utrzymuje zwartą koronę i zgrabny, strzelisty charakter wzrostu, dlatego jest idealna do terenów o ograniczonej powierzchni, parkingów, ulic, alei, podwórzcy oraz średniej wielkości ogrodów prywatnych.

Lipa warszawska – *Tilia × varsaviensis* Kobendza

Lipa warszawska, znana też jako odmiana warszawska lipy srebrzystej (*Tilia tomentosa* 'Varsaviensis'), ma gęstą, wąsko stożkową koronę o bardzo regularnym kształcie, z wyraźnie zaznaczonym przewodnikiem. Liście lipy warszawskiej są cieńsze od liści lipy srebrzystej i mają mniej widoczny, szarawy kutner po spodniej stronie. Jest to drzewo nadające się do obsadzania ulic [SENETA, DOLATOWSKI 2006].

Lipa amerykańska – *Tilia americana* L.

Gatunek ten pochodzi z Ameryki Północnej (wschodniej Kanady i USA). Jest to drzewo parkowe, czasem sadzone przy ulicach [MITCHELL 1979]. Duże, oryginalnie wyglądające liście są bardzo dekoracyjne i osiągają do 15–20 cm długości. Są obustronnie nagie, ewentualnie mają od spodu tzw. bródkę. W Polsce często rośnie gorzej od innych lip, może przemarzać [SENETA, DOLATOWSKI 2006].

Lipa holenderska – *Tilia × europea* L.

Lipa holenderska (syn. *T. × vulgaris* Hayne, *T. × hollandica* K. Koch) to mieszańiec lipy szerokolistnej (*T. platyphyllos*) i lipy drobnolistnej (*T. cordata*). Ma cechy zmienne, zbliżone do jednego lub drugiego z gatunków rodzicielskich. Cenniona jako drzewo alejowe i uliczne. Główną cechą rozpoznawczą tego gatunku są pofalowane blaszki liściowe [SENETA, DOLATOWSKI 2006].

Lipa holenderska, odmiana Pallida – *Tilia × europea* 'Pallida'

Ta odmiana lipy holenderskiej ma liście większe od gatunku i jasnozielone. Gałęzie i pąki są jesienią czerwone [KRÜSSMANN 1985]. Sadzona jest głównie przy ulicach [MITCHELL 1979]. Preferuje stanowiska słoneczne lub półcieniste, gleby dość żyzne, piaszczyste.

Lipa krymska – *Tilia × euchlora* K. Koch

Lipa krymska (syn. *T. 'Euchlora'*, *T. × europea* 'Euchlora') nie została zaobserwowana w stanie dzikim. Przypuszcza się, że jest mieszańcem *T. cordata* i *T. dasystyla* Steven. W uprawie obecny jest jeden klon, sterylny, o bardzo wyrównanych cechach [SENETA, DOLATOWSKI 2006]. Gatunek ten jest bardzo często sadzony zarówno jako drzewo uliczne, jak i parkowe [MITCHELL 1979]. Jednak ze względu na pokrój nie jest polecany do obsadzania ulic. Jak podają SENETA i DOLATOWSKI [2006], lipa krymska preferuje żyzne i świeże gleby oraz wilgotne powietrze. Liście z wierzchu są gładkie, błyszczące i bardzo dekoracyjne. Spodnia

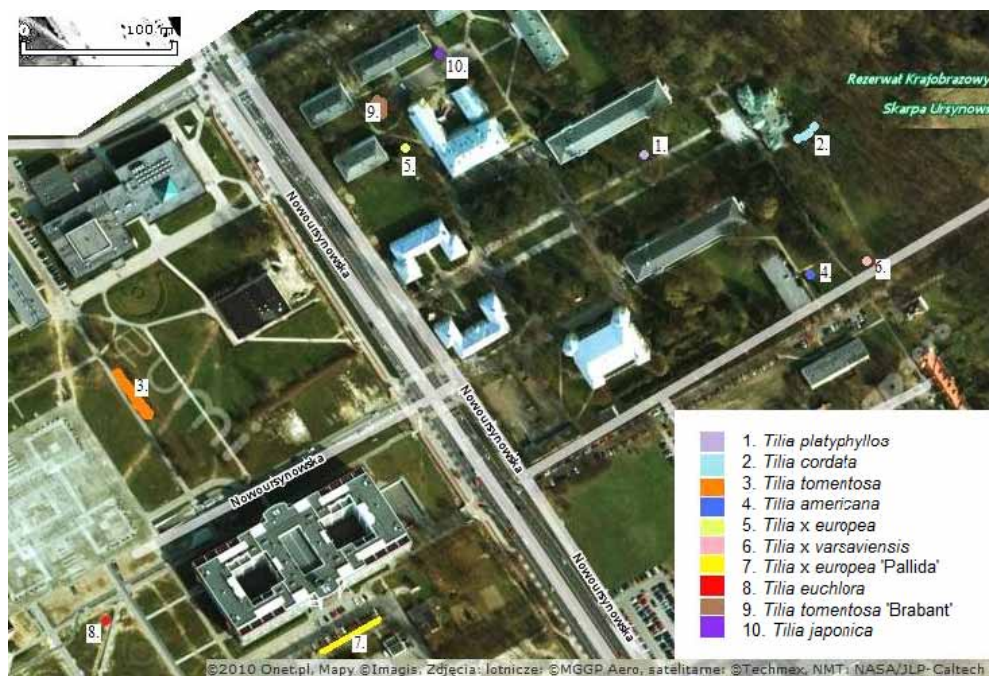
strona liścia jest jaśniejsza, matowa, z jasnymi „bródkami”, głównie u nasady liści. Drzewa swobodnie rosnące charakteryzuje efektowny pokrój.

Lipa japońska – *Tilia japonica* (Miq.) Simonk.

Gatunek ten występuje w Japonii i wschodnich Chinach. Przypomina lipę drobnolistną, zwłaszcza z liści. Jest jednak niższa i różni się kwiatami. Wymagania ma bardzo podobne do lipy drobnolistnej. Jest odporna na mróz, jednak w Polsce występuje rzadko. Sadzona często na podkładce z lipy drobnolistnej [SENETA, DO-LATOWSKI 2006].

METODY BADAŃ

Niniejsze badania przeprowadzono w Samodzielnym Zakładzie Przyrodniczych Podstaw Ogrodnictwa w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie. Liście dziesięciu gatunków lip zebrano w 4 powtórzeniach z każdego gatunku na początku lipca 2009 r., w słoneczny suchy dzień w Warszawie na terenie kampusu SGGW na Ursynowie (rys. 1).



Rys. 1. Mapa obrazująca miejsca, z których zebrano próby liści; źródło: opracowanie własne na podstawie: www.onet.pl, mapy – zmodyfikowany

Fig. 1. A map showing sites of sampling the leaves; source: www.onet.pl, maps – modified

Każda pojedyncza próba liczyła 10 liści. W przypadku gatunków o większych liściach, w próbie było proporcjonalnie mniej liści (np. lipa amerykańska 5 liści w próbie). Następnie przeprowadzono pomiar zawartości zanieczyszczeń mikropylowych oraz wosków epikutykularnych.

Metody wykorzystane w niniejszej pracy zostały opracowane w Samodzielnym Zakładzie Przyrodniczych Podstaw Ogrodnictwa w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego i w 2011 r. opublikowano je w *International Journal of Phytoremediation* [DZIERŻANOWSKI i in. 2011].

Po zebraniu prób liści, pozostawiono je do wysuszenia. Do pomiaru zawartości mikropylów użyto filtrów firmy Whatmann o średnicach porów odpowiadających poszczególnym frakcjom, wykonanym z tworzyw kompatybilnych z używanymi rozpuszczalnikami. Filtry przed filtrowaniem wstawiono na 30 min do komory cieplnej Premed KCW-100, nastawionej uprzednio na temperaturę 60°C. Po wyjęciu filtrów z komory cieplnej zostawiono je jeszcze na kolejne 30 min na zewnątrz komory, w temperaturze pokojowej, w chłodnym i suchym miejscu, w celu wyrównania wilgotności. Tak przygotowane filtry zważono na mikrowadze laboratoryjnej Radwag mxa 5/F. Zanotowano masę każdego filtra. Próbę liści (5–10 szt., w zależności od gatunku) umieszczono w krystalizatorze. Pierwszą czynnością, jaką wykonano na próbie liści umieszczonej w krystalizatorze, było staranne przepłukanie liści wodą destylowaną (250 ml) przez 1 min. W ten sposób wypłukały się pyły, które osadziły się na powierzchni blaszek liściowych. Wodę tę, wraz ze znajdującymi się w niej zanieczyszczeniami, przelano do czystego krystalizatora przez sito laboratoryjne o wielkości oczek 100 µm (aby nie mierzyć zawartości pyłów większych niż te, które są przedmiotem badań). Po przepłukaniu próby liści wodą destylowaną, te same liście odłożono do szklanego krystalizatora, a w zestawie filtracyjnym umieszczono największy z trzech używanych rozmiarów filtrów, czyli ten o średnicy otworów 10 µm. Zamontowano zestaw filtracyjny i włączono pompę. Do doświadczeń wykorzystano zestaw filtracyjny firmy Pall (fot. 1).

Zestaw filtracyjny podłączono do pompy ssącej KNF Laboport (fot. 1). Woda filtrowała się aż do momentu całkowitego oczyszczenia się wody z pyłów danej średnicy. Wodę znajdującą się w kolbie, po pierwszym filtrowaniu, poddano następnie kolejno filtrowaniu przez filtry o mniejszej średnicy oczek. Liście z tej samej próby, przepłukane uprzednio wodą, przemywano w krystalizatorze chloroformem w ilości 150 ml przez 40 s. Filtrowanie przeprowadzono analogicznie, jak w przypadku filtrowania wody, na zestawie tej samej firmy, w tej samej kolejności wkładania filtrów, z tą różnicą, że pozostały po filtrowaniu chloroform wlewno do uprzednio zważonej, pustej i czystej zlewki. Po odparowaniu chloroformu, co trwało od kilkunastu do nawet 48 h, zlewki wazono na mikrowadze laboratoryjnej. Z różnicy mas pustych zlewek i zlewek z woskiem wiadomo było, ile wosków znajdowało się w cm³ liścia. Po zakończonym filtrowaniu „brudne” filtry umieszczono na 30 min w komorze cieplnej (60°C), a następnie na 30 min w temperaturze pokojowej. Po upływie tego czasu filtry wazono na mikrowadze laboratoryjnej.



Fot. 1. Zestaw filtracyjny pod wyciągiem (fot. K. J. Sadowiec)

Phot. 1. The filtration set under the fume hood (photo K. J. Sadowiec)

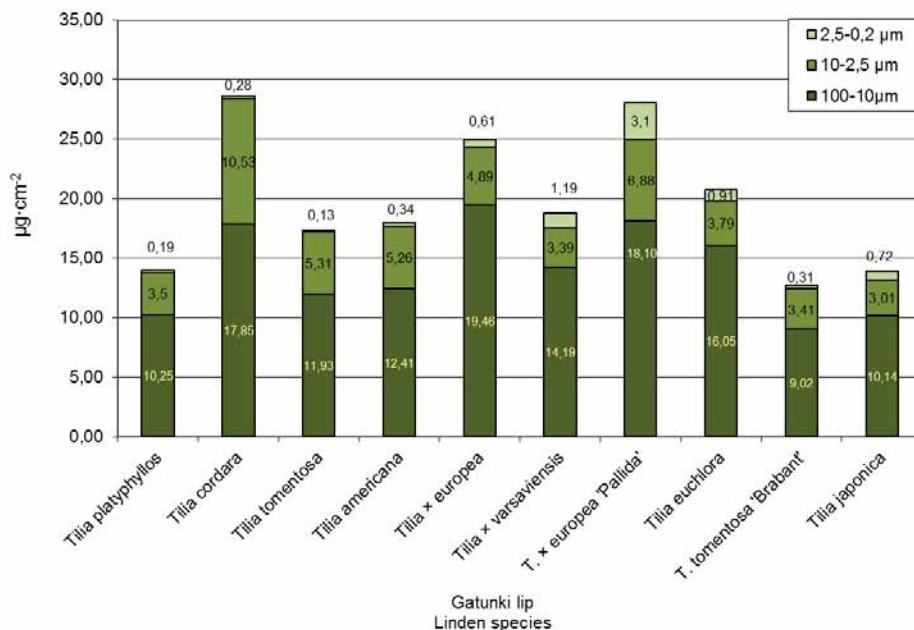
Liście z każdej próby po ostatnim płukaniu chloroformem suszono wyprostowane na papierowych kartkach, na blacie, w laboratorium, i tak przechowane przeszły i nie uległy zagięciu podczas filtrowania, dzięki czemu możliwy był pomiar ich powierzchni. Powierzchnię liści mierzono za pomocą urządzenia i programu Leaf Area, Root Lengh and Image Analysis Systems firmy SKY.

Uzyskane wyniki poddano analizie statystycznej. Wszystkie otrzymane dane poddano jednoczynnikowej analizie wariancji (ang. One-Way ANOVA) za pomocą programu Statgraphics Plus 4.1. Istotność różnic oceniono, stosując test Tukeya. Jest to tzw. test uczciwych istotnych różnic (ang. „honest significant difference” – HSD), na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Wyniki zaprezentowano w formie wykresów, które przedstawiają uśrednione wyniki uwzględniające błąd standardowy *SE* (ang. „standard error”).

WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

Sprawdzano zawartość zanieczyszczeń mikropyłowych oraz wosków epikutularnych w liściach lip należących do ośmiu gatunków i dwóch odmian lip i u wszystkich stwierdzono akumulację znacznej ilości mikropyłów. Przeanalizowano sumę wszystkich zmytych pyłów we wszystkich powtórzeniach i z uzyskanych wyników wynika, że największa zdolność do gromadzenia zanieczyszczeń cechuje lipę drobnolistną, która zakumulowała ich na swoich liściach $28,66 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Niewiele gorszym fitoremediantem okazała się odmiana ‘Pallida’ lipy holenderskiej ($28,08 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Najmniej mikropyłów nagromadziło się na lipie srebrzystej, odmiany Brabant ($12,74 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Nie odnotowano żadnych różnic istotnych statystycznie między wynikami (rys. 2).



Rys. 2. Suma całkowita zmytych pyłów we wszystkich powtórzeniach, zakumulowanych na powierzchni liści dziesięciu gatunków lipy z podziałem na poszczególne frakcje; źródło: wyniki własne

Fig. 2. Total mass of PM accumulated on leaves of the ten linden species (divided into size fractions of PM); source: own study

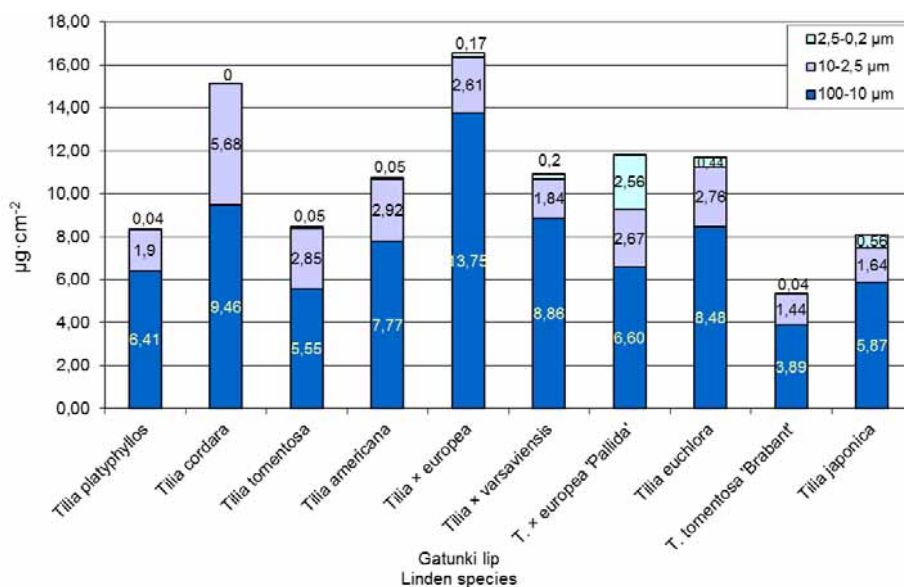
Zmierzono poziom depozycji pyłów o największej średnicy aerodynamicznej ($10\text{--}100 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), zmytych z powierzchni liści zarówno za pomocą wody, jak i chloroformu. Najwięcej stwierdzono ich na lipie holenderskiej ($19,46 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), niewiele mniej pyłów frakcji grubej zgromadziła lipa holenderska odmiana ‘Pallida’ ($18,10 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) oraz lipa drobnolistna ($17,85 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Najmniej pyłów PM_{10} ($9,02 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) znajdowało się na liściach lipy srebrzystej ‘Brabant’. Między wynikami nie odnotowano różnic istotnych statystycznie.

Pyłów frakcji $\text{PM}_{2,5}$ zgromadziło się najwięcej na liściach lipy drobnolistnej ($10,53 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Pomiedzy tym wynikiem, a pozostałymi, stwierdzono różnice istotne statystycznie. Najmniejsza ilość $\text{PM}_{2,5}$ znajdowała się na liściach lipy japońskiej ($3,01 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Ten wynik również różnił się w sposób istotny statystycznie od pozostałych.

W przypadku reszty wyników nie odnotowano różnic istotnych statystycznie. Najwięcej $PM_{0,2}$ osadziło się na liściach lipy holenderskiej ‘Pallida’ ($3,10 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$), a najmniej na liściach lipy srebrzystej ($0,13 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Różnice istotne statystyczne odnotowano między lipą warszawską a pozostałymi gatunkami (rys. 2).

Sprawdzono poziom depozycji mikrocząstek należących do poszczególnych frakcji, zmytych z powierzchni liści wodą destylowaną. Pyły te mogą być zmyte wraz z deszczem. Pyły o średnicy aerodynamicznej $10\text{--}100 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$, czyli należące do największej frakcji, w największym stopniu (w ilości $13,75 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) osadziły się na liściach lipy holenderskiej. Najmniej pyłów PM_{10} zmyto wodą z powierzchni liści lipy srebrzystej ‘Brabant’ ($3,89 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Nie odnotowano żadnych istotnych statystycznie różnic.

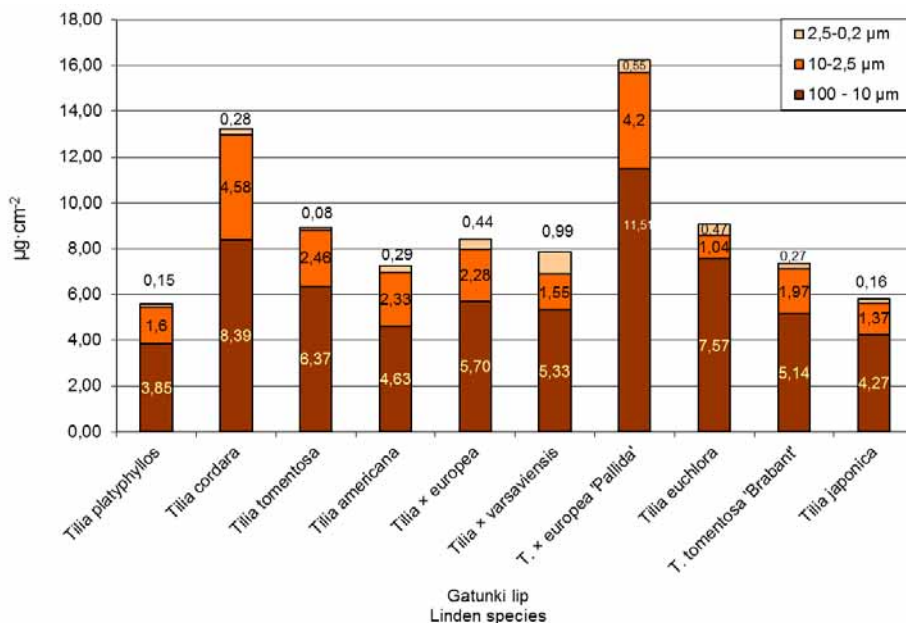
Pyłów o średnicy $2,5\text{--}10 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ zmyto najczęściej z liści lipy drobnolistnej ($5,68 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Odnotowano statystycznie istotne różnice pomiędzy tym wynikiem a pozostałymi. Najmniej $PM_{2,5}$ zmyto z powierzchni lipy srebrzystej ‘Brabant’ ($1,44 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Pyłów najdrobniejszej frakcji, zmytych za pomocą wody destylowanej, zgromadziło się najczęściej na powierzchni liści lipy holenderskiej ‘Pallida’ ($2,56 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Najmniej, bo śladowe ilości ($0,02 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) pyłów $PM_{0,2}$ zmyto z liści lipy szerokolistnej i srebrzystej ‘Brabant’, natomiast w wodzie po opłukaniu liści lipy drobnolistnej nie wykryto żadnych zanieczyszczeń $PM_{0,2}$. Pomiędzy wynikami nie ma różnic istotnych statystycznie (rys. 3).



Rys. 3. Pyły frakcji PM_{10} , $PM_{2,5}$ i $PM_{0,2}$ zmyte wodą destylowaną; źródło: wyniki własne

Fig. 3. PM_{10} , $PM_{2,5}$ and $PM_{0,2}$ washed with distilled water; source: own study

Nie wszystkie zanieczyszczenia mikropyłowe można zmyć z powierzchni liści za pomocą wody destylowanej. W doświadczeniu liście przepłukano również chloroformem, pozyskując w ten sposób cząstki, które są związane z woskami epikutylarnymi, pokrywającymi powierzchnię liści. W doświadczeniu sprawdzono łączną ilość wosków, które rozpuściły się w roztworze chloroformu (rys. 4). Zdecydowanie najwięcej wosków stwierdzono na liściach lipy holenderskiej ‘Pallida’, bo aż $120,32 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. Wynik ten różnił się od pozostałych w sposób istotny statystycznie. Najmniej ($41,92 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) wosków epikutylarnych znajdowało się na liściach lipy krymskiej (rys. 4).



Rys. 4. Suma całkowita pyłów zmytych chloroformem z liści 10 gatunków lip (z podziałem na poszczególne frakcje); źródło: wyniki własne

Fig. 4. Total mass of PM washed out with chloroform from leaves of 10 linden species (divided into size fractions of PM); source: own study

Zmierzono w ten sposób ilość pyłów wszystkich trzech frakcji zawartych w woskach. Najwięcej pyłów o średnicy aerodynamicznej cząstek 10–100 μg zgromadziło się w woskach liści lipy holenderskiej ‘Pallida’ ($11,51 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Pomiędzy tym wynikiem a wynikami lip: drobnolistnej, srebrzystej i krymskiej odnotowano różnice istotne statystycznie. Najwięcej pyłów $\text{PM}_{2,5}$ było w woskach lipy drobnolistnej ($4,58 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Wynik ten wykazuje istotne różnice statystyczne w stosunku do pozostałych wartości. Najmniej pyłów znajdowało się w woskach lipy krymskiej ($1,04 \mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Pomiędzy tym wynikiem a pozostałymi istnieją

istotne statystycznie różnice. W obrębie pozostałych wyników nie stwierdzono istotnych statystycznie różnic. Najwięcej pyłów PM_{0,2} zgromadziło się w woskach liści należących do lipy warszawskiej (0,99 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$). Pomiędzy tym, a pozostałymi wynikami są różnice istotne statystycznie. Najmniej pyłów frakcji najdrobniejszej było w woskach liści lipy srebrzystej (0,08 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) i tu też istnieją istotne różnice w stosunku do pozostałych wyników (rys. 4).

Określono stopień depozycji zanieczyszczeń mikropyłowych na liściach ośmiu gatunków i dwóch odmian lip. Drzewa te rosły w podobnym oddaleniu od ulic, w zbliżonych warunkach środowiskowych. Opisane gatunki i odmiany różnią się m.in. wielkością i pokrojem drzewa, wielkością i strukturą liści, obecnością kutneru, ilością i rodzajem wosków, stopniem pofałdowania blaszki liściowej i cechy te powodują różnice w zdolności do gromadzenia zanieczyszczeń powietrza. Przeprowadzone analizy pokazały, że najwięcej zanieczyszczeń mikropyłowych osadziło się na lipie drobnolistnej (28,66 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ liścia). Podobne wyniki dla lipy drobnolistnej zaobserwowano w badaniach przeprowadzonych w latach 2007 i 2008, w których odnotowano wyniki kolejno: 20,28 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ i 22,11 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ pyłów [DZIERŻANOWSKI 2009].

Na podobne wyniki na pewno miały wpływ zbliżone warunki środowiskowe, ale również wyrównanie w obrębie gatunku, co potwierdzają wyniki badań, w których lipa rosnąca w warunkach wiejskich, z dala od zanieczyszczeń, zgromadziła podobną ilość pyłów: 20,52 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ [POPEK 2008]. Te podobne wyniki mogą być spowodowane przystosowaniem lip do warunków miejskich. Zbliżone badania przeprowadzono w Anglii na klonie jaworze (*Acer pseudoplatanus*), który zgromadził na swoich ilościach znaczne ilości pyłów, jednocześnie wykazując tolerancję na metale ciężkie, natomiast rosnące w Anglii, w warunkach przemysłowych i w pobliżu drogi, dęby czerwone (*Quercus robur*) zakumulowały podczas sezonu wegetacyjnego mikropyły, z czego najwięcej pyłów zebrały te rosnące w pobliżu drogi [BECKETT i in. 1997]. W innych badaniach dotyczących fitoremediacji powietrza z 2008, prowadzonych na szesnastu różnych gatunkach drzew, w tym dwóch gatunkach lip, również z liści lipy drobnolistnej zmyto znacząco więcej pyłów o średnicy 2,5–10 μm niż z odmiany warszawskiej [POPEK 2008]. Sprawdzone również, jaką ilość pyłów najdrobniejszych, respirabilnych, zmyto z liści chloroformem. Lipa warszawska wykazała zdecydowanie największą zdolność do akumulacji w woskach pyłów najdrobniejszych. Zgromadziło się tam ich 0,99 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$. Tak niewielka ilość pyłów PM_{0,2} zgromadzonych w wosku, w porównaniu z ilością dwóch pozostałych frakcji pyłów, we wszystkich gatunkach lip, jest spowodowana zapewne tym, że to woski epikutylarne zatrzymują najwięcej pyłów PM₁₀ i PM_{2,5} [GAWROŃSKI 2009]. W badaniach przeprowadzonych na szesnastu różnych gatunkach drzew, wśród których były dwie lipy drobnolistna i warszawska, również lipa warszawska zgromadziła w woskach epikutylarnych więcej pyłów najdrobniejszych [POPEK 2008].

Wszystkie badane gatunki lipy wykazywały, w mniejszym lub większym stopniu, zdolność do kumulowania zanieczyszczeń mikropyłowych z powietrza.

WNIOSKI

Uzyskane wyniki badań nad zdolnością fitoremediacyjną wybranych gatunków lip, umożliwiły sformułowanie następujących wniosków:

1. Gatunki lip, a nawet odmiany w obrębie jednego gatunku, różnią się zdolnością gromadzenia pyłów zawieszonych.

2. Najlepszym fitoremediantem okazała się lipa drobnolistna, która zgromadziła najwięcej pyłów $PM_{2,5}$, zarówno łącznie, jak i tych zmytych wodą i zmytych chloroformem. Co istotne, gatunek ten nadaje się do sadzenia w mieście. Lipa warszawska zakumulowała w woskach epikutylarnych najwięcej pyłów najdrobniejszych ($PM_{0,2}$). Najwięcej wosków i tym samym dużo pyłów PM_{10} i $PM_{2,5}$, stwierdzono na liściach lipy holenderskiej 'Pallida'.

3. Małą akumulację mikrocząstek wykazały lipa japońska, lipa srebrzysta 'Brabant' i lipa szerokolistna.

LITERATURA

- ARIOLA V., D'ALESSANDRO A., LUCARELLI F., MARCAZZAN G., MAZZEI F., NAVA S., GARCIA-ORELLANA I., PRATI P., VALLI G., VECCHI R., ZUCCHAITTI A. 2006. Elemental characterization of PM_{10} , $PM_{2,5}$ and PM_1 in the Town of genoa (Italy). *Chemosphere*. Vol. 62. Iss. 2 s. 226–232.
- Barcham 2010. *Tilia tomentosa* 'Brabant' [online]. [Dostęp 13.06.2013]. Dostępny w Internecie: <http://www.bath.ac.uk/estates/landscaping/autumncolour.shtml>
- BECKETT K.P., FREER-SMITH P., TAYLOR G. 1997. Urban woodlands: their role in reducing the effects of particulate pollution. *Environmental Pollution*. Vol. 99. Iss. 3 s. 347–360.
- BELL J.N.B., TRESHOW M. 2002. *Air pollution and plant life*. Wyd. 2. New York. John Wiley and Sons. ISBN 978-0-471-49091-3 ss. 480.
- BÖHM A. 1999. Stan zasobów przyrody. Raport o stanie środowiska miasta Krakowa w latach 1994–1999. Biblioteka Monitoringu Środowiska. Kraków ss. 14.
- BOROWSKI J. 2009. Wzrost rodzimych gatunków drzew przy ulicach Warszawy. *Rozprawy Naukowe i Monografie*. Wydaw. SGGW. Warszawa s. 124–125, 144–146.
- BRACK C.L. 2002. Pollution mitigation and carbon sequestration by an urban forest. *Environmental Pollution*. Vol. 116 s. 195–200.
- DARLEY E.F. 1966. Studies of the effect of cement-kilndust on vegetation. *Journal of the Air Pollution Control Association*. Vol. 16 s. 145–150.
- DZIERŻANOWSKI K., POPEK R., GAWROŃSKA H., SÆBO A., GAWROŃSKI S.W. 2011. Deposition of particulate matter of different size fractions on leaf surfaces and in waxes of Urban forest species. *International Journal of Phytoremediation*. Vol. 13 s. 1037–1046.
- FERNÁNDEZ ESPINOZA A.J., ROSSINI OLIVA S. 2006. The composition and relationships between trace element levels in inhalable atmospheric particles (PM_{10}) and in leaves of *Nerium oleander* L. and *Lantana camara* L. *Chemosphere*. Vol. 62 s. 1665–1672.
- FOWLER D., CAPE J.N., UNSWORTH M.H. 1989. Deposition of atmospheric pollutants on forests. *Philosophical Transactions of The Royal Society Of London*. Vol. 324 s. 247–265.

- FREER-SMITH P.H., BECKETT K.P., TAYLOR G. 2005. Deposition velocities to *Sorbus aria*, *Acer campe*, *Populus deltoids* × *tricarpa* 'Beaupré', *Pinus nigra* and × *Cupressocyparis lylandii* for coarse, fine and ultra-fine particles in the Urban environment. *Environmental Pollution*. Vol. 113 s. 157–167.
- GAWROŃSKI S.W. 2009. Fitoremediacja – rośliny jako narzędzia w oczyszczaniu powietrza na terenach zurbanizowanych. *Materiały z seminarium II Wiosennej Wystawy Szkółkarskiej* s. 5–12.
- JANKOWSKA E., SOŚNIAK M. 2006. Występowanie pyłów w powietrzu otaczającym człowieka. *Bezpieczeństwo Pracy*. Nr 5 s. 16–19.
- JOURAeva V.A., JOHNSON D.L., HASSETT J.P., NOWAK D.J., SHIPUNOVA N.A., BARBAROSSA D. 2006. Role of sooty mold fungi in accumulation of fine-particle-associated PAHs and metals on deciduous leaves. *Environmental Research*. Vol. 102 s. 271–282.
- KEMP K. 2002. Trends and sources of heavy metals in urban atmosphere. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*. Vol. 189 s. 227–232.
- KRÜSSMANN G. 1985. *Manual of cultivated broad leaved trees and Shrubs*. Vol. III. Beaverton Oregon. Timber Press. s. 383–400.
- MARECİK R., KRÓLICZAK P., CYPLIK P. 2006. Fitoremediacja – alternatywa dla tradycyjnych metod oczyszczania środowiska. *Biotechnologia*. Nr 3 s. 88–97.
- MCDONALD A.G., BEALEY W.J., FOWLER D., DRAGOSITS U., SKIBA U., SMITH R.I., DONOVAN R.G., BRETT H.E., HEWITT C.N., NEMITZ E. 2007. Quantifying the effect of Urban tree planting on concentrations and depositions of PM10 in two UK conturbations. *Atmospheric Environment*. Vol. 41. Iss. 38 s. 8455–8467.
- MITCHELL A. 1979. *Die Wald- und Parkbäume Europas*. Hamburg, Berlin. Verlag Paul Parey s. 364–367.
- PASTUSZKA J.S. 2007. Wpływ aerozoli ziarnistych na jakość powietrza. *Metody identyfikacji i oceny. Ekoprofit*. Nr 86 s. 7–15.
- PERERA F.P., HEMMINKI K., GRZYBOWSKA E., MOTYKIEWICZ G., MICHALSKA J., SANTELLA R.M., YOUNG T., DICKEY C., BRANDT-RAUF P., DEVIVO I., BLANER W., TSAI W., CHORAŻY M. 1992. Molecular and genetic damage in humans from environmental pollution in Poland. *Nature*. Vol. 390 s. 256–258.
- POPEK R. 2008. Ocena zdolności do fitoremediacji mikrocząsteczek zawartych w powietrzu przez szesnaście gatunków drzew zalecanych do uprawy w terenach zurbanizowanych. *Pr. magisterska. Maszynopis*. Warszawa. SGGW ss. 32.
- PYE K. 1987. *Aeolian Dust and Dust Deposits*. Cambridge University Press, Cambridge.
- RAO D.N. 1971. A study of the air pollution problem due to coal unloading in Varnasi, India. *Proceedings of the Second International Clean Air Congress*. Pr. zbior. Red. H.M. Enlund, W.T. Berry. New York. Academic Press s. 273–276.
- RĄCZKA M., GAWROŃSKI S.W. 2004. Ocena przydatności do fitoremediacji wybranych gatunków drzew i krzewów ozdobnych z rodziny motylkowych. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu* 356 s. 181–187.
- ROSSELLI W., KELLER C., BOSCHI K. 2003. Phytoextraction capacity of trees growing on a metal contaminated soil. *Plant and Soil*. Vol. 256 s. 256–272.
- SANTELMANN M.V., GORHAM E. 1988. The influence of airborne road dust on the chemistry of *Sphagnum* mosses. *Journal of Ecology*. Vol. 76 s. 1219–1231.
- SALT D.E., SMITH R.D., RASKIN I. 1998. Phyto remediation. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. Vol. 49 s. 643–681.
- SENETA W., DOLATOWSKI J. 2006. *Dendrologia*. Wyd. 3. Warszawa. Wydaw. Nauk. PWN. s. 399–410.
- WHO 2010. [online]. [Dostęp 13.06.2013]. Dostępny w Internecie: www.who.int

Katarzyna J. SADOWIEC, Stanisław W. GAWROŃSKI

**THE USEFULNESS OF SELECTED LINDEN SPECIES (*Tilia* sp.)
FOR PHYTOREMEDIATION OF AIRBORNE PARTICULATE MATTER**

Key words: *air pollution, particulate matter, Tilia, urban forest*

S u m m a r y

Progressing urbanization, development of transport and industry are the sources of particulate matter, which decrease air quality and pose a threat to human health. Plants are the only natural organism to clean the air. Trees are more and more appreciated as natural air filters that remove particulate matter. Linden are very common in cities, in parks and even near streets in our climatic zone. In this paper, selected species of linden were compared in order to determine their ability to accumulate particulate matter. These linden trees have different morphology and requirements. The accumulation of particulate matter of the size: 10–100 μm , 2.5–10 μm and 0.2–2.5 μm was analysed within this study. *Tilia cordata* turned out to be the best phytoremediant. *Tilia* \times *europaea* ‘Pallida’ was also very good in accumulating particulate matter on its leaves.

Adres do korespondencji: mgr inż. K. J. Sadowiec, Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach, Zakład Biologii Środowiska i Higienizacji Wsi, 05-090 Raszyn, al. Hrabaska 3; tel. +48 22 735-75-28, e-mail: K.Sadowiec@itep.edu.pl