



Raport końcowy z realizacji projektu
pt. „Wieże fotokatalityczne do oczyszczania powietrza w
aglomeracjach miejskich”
numer umowy WFOŚ/D/210/4/2018

Zespół wykonawców:

Prof. dr hab. inż. Adriana Zaleska-Medynska
Dr Mirosław Czapiewski
Dr hab. Marek Gołębiowski, Prof. UG
Dr inż. Anna Malankowska
Dr inż. Marta Paszkiewicz-Gawron
Mgr inż. Marek Kobyłański
Mgr Patrycja Parnicka
Mgr Mateusz Baluk

Gdańsk,

październik

2020

1. Cel projektu oraz najważniejsze etapy realizacji projektu

Celem projektu było zaprojektowanie, zbudowanie i przetestowanie wieży fotokatalitycznej służącej do oczyszczania powietrza w aglomeracjach miejskich. Proponowana wieża fotokatalityczna pozwoli na jednoczesne usuwanie lotnych związków organicznych (VOCs), związków nieorganicznych (takich jak NO_x oraz SO₂), pyłów oraz mikroorganizmów, a tym samym na polepszenie jakości powietrza w aglomeracjach miejskich. W ramach realizacji projektu „Wieże fotokatalityczne do oczyszczania powietrza w aglomeracjach miejskich” zaproponowano i zrealizowano poniższy harmonogram prac.

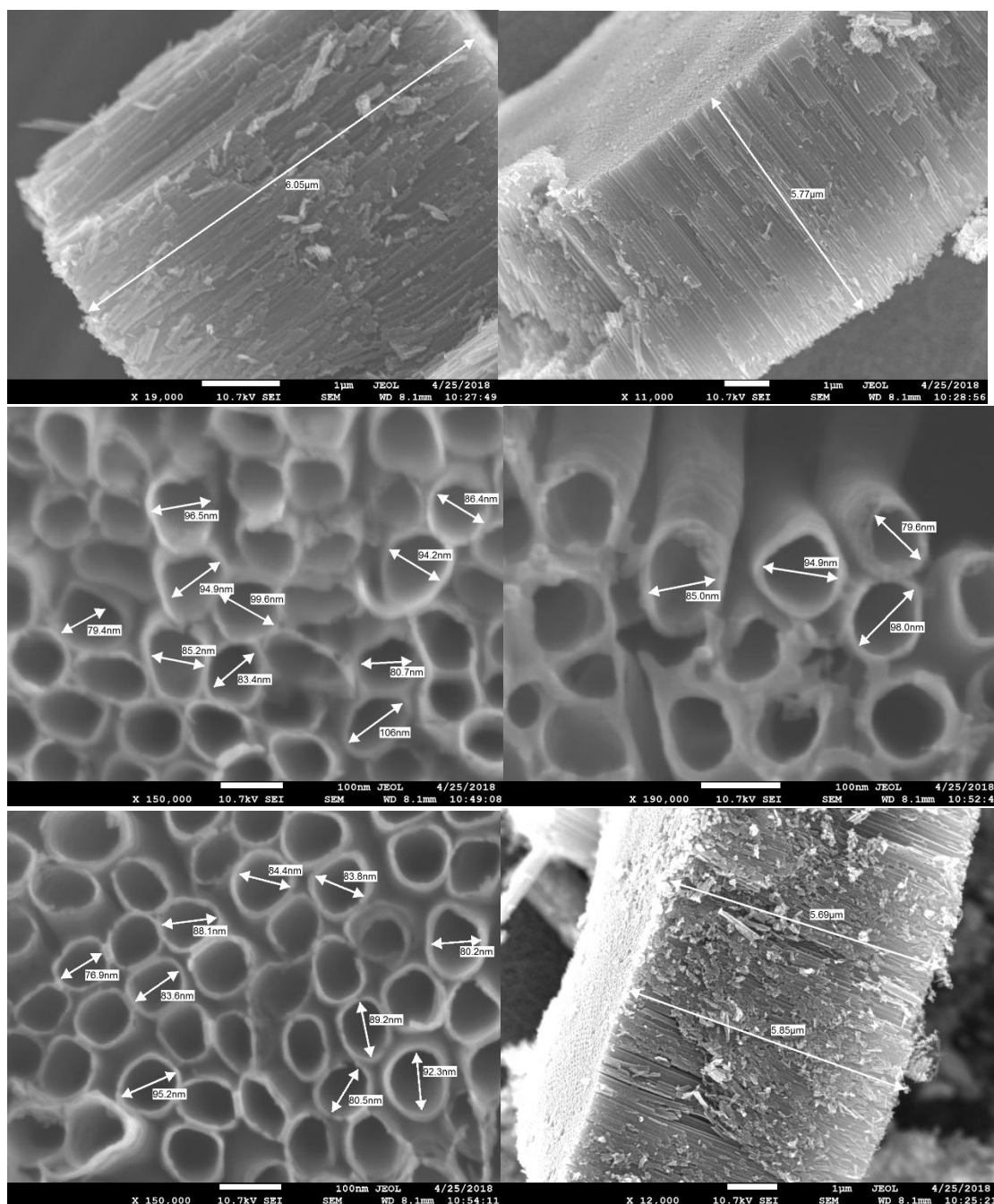
Tabela 1. Etapy realizacji projektu wieże fotokatalityczne do oczyszczania powietrza w aglomeracjach miejskich

Lp.	Etap projektu	Termin realizacji (m-c, rok)
1	Opracowanie układu do wytwarzania warstw nanorurek w skali ułamkowo-technicznej.	18.01.2018- 1.08.2018
2	Wytworzenie warstw nanorurek TiO ₂ o wymiarach dostosowanych do rozmiarów instalacji	1.05.2018-1.03.2019
3	Projektowanie oraz budowa wieży fotokatalitycznej o wysokości 2,5-3,5m do oczyszczania powietrza	1.06.2018-1.09.2019
4	Instalacja wieży w miejscu docelowym oraz ocena efektywności oczyszczania powietrza na terenie kampusu Uniwersytetu Gdańskiego	1.01.2020-31.10.2020
5	Przygotowanie raportu końcowego	1.01.2020-31.10.2020

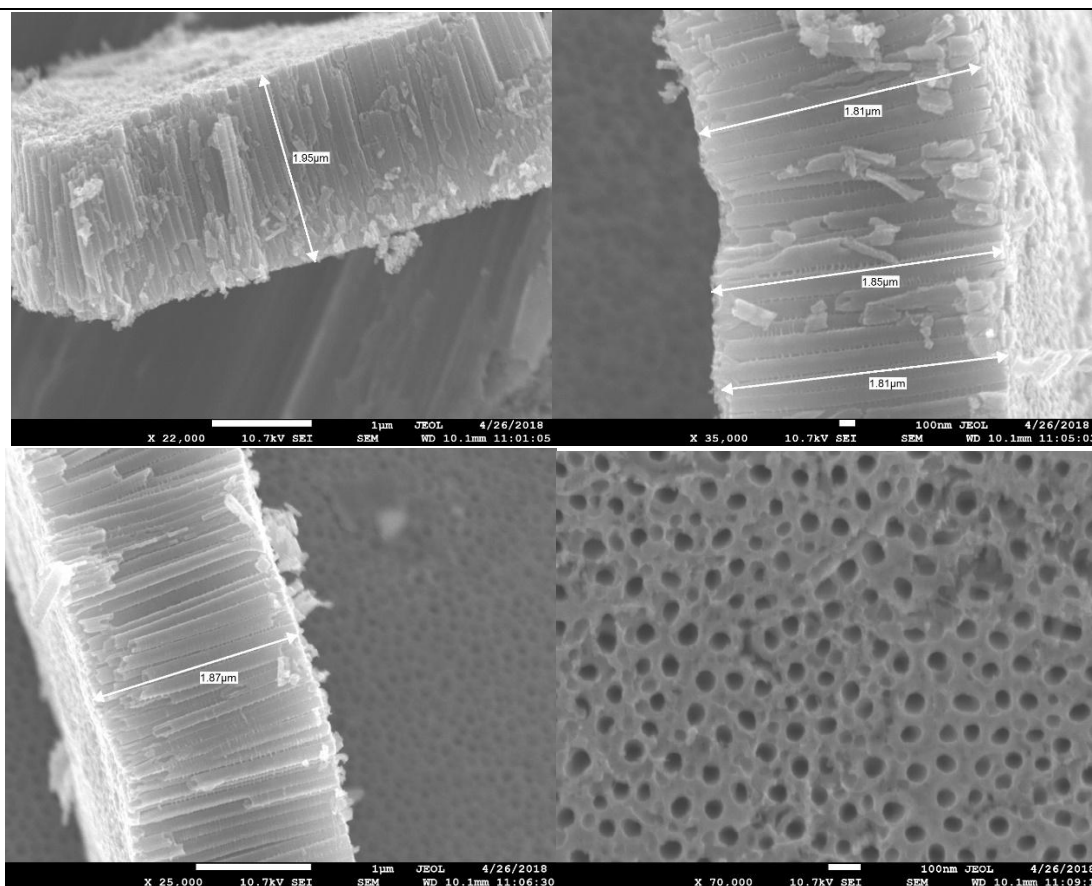
Zadanie 1. Opracowanie układu do wytwarzania warstw nanorurek w skali ułamkowo-technicznej.

Cel zadania:
Celem tego zadania było zaprojektowanie, zbudowanie i przetestowanie opracowanie układu pozwalającego na otrzymywanie arkuszy nanorurek o wymiarach 300 x 200 mm
Najważniejsze prace wykonane w ramach zadania
1. Budowa układu składającego się z (i) naczynia reakcyjnego z płaszczem chłodzącym; (ii) wielko-płaskczyznowej elektrody platynowej; (iii) zasilacza; (iv) mieszadła mechanicznego, oraz (v) chwytaka do elektrody pracującej (wykonanej z blachy tytanowej)
2. Wyznaczenie warunków prowadzenia anodyzacji w skali laboratoryjnej dla tytanu

technicznego (optymalizacja czasu anodyzacji, wpływ rodzaju zastosowania rozpuszczalnika, wpływ napięcia stosowanego podczas anodyzacji, wpływ wielokrotnego wykorzystywania elektrolitu, wpływ temperatury elektrolitu podczas anodyzacji) oraz wpływ zastosowanych warunków wytwarzania nanorurek na ich morfologię (długość) oraz aktywność fotokatalityczną w modelowej reakcji degradacji toluenu w fazie gazowej (Rys. 1-2)



Rys.1 Zdjęcia SEM dla nanorurek otrzymanych po 4 cyklu anodyzacji w układzie bez stabilizacji temperatury elektrolitu



Rys. 2. Zdjęcia SEM dla nanorurek otrzymanych po 4 cyklu anodyzacji w układzie ze stabilizacją temperatury elektrolitu

Najważniejsze wnioski

1. Opracowano parametry anodyzacji skali laboratoryjnej pozwalające na uzyskiwanie nanorurek o odpowiedniej morfologii oraz fotoaktywności
2. Nanorurki otrzymywane w skali laboratoryjnej mają długość od 1,5 do 3,6 μm i pozwalają na degradację modelowego zanieczyszczenia w fazie gazowej (toluen o stężeniu początkowym 200 ppm). Efektywność degradacji toluenu po 10 min. naświetlania promieniowaniem UV wynosiła do 90%.
3. Otrzymane wyniki wykazały, że lepkość elektrolitów nie zmienia się znacząco w stosunku do zwiększającej się szybkości ścinania. Na lepkość znacząco nie ma również wpływu ilość przeprowadzanych cykli anodyzacji, wymiana elektrolitu lub dodatek glikolu z fluorkami.
4. Przeprowadzone badania wykazały, w przypadku zastosowania 15 oraz 30 minutowej regeneracji - aktywność fotokatalityczna warstw TiO_2 obniżała się wraz z kolejnymi cyklami pomiarowymi (spadek aktywności o około 50% i 28% w piątym cyklu pomiarowym, odpowiednio dla 15 i 30 min). Z kolei zwiększając czas regeneracji do 60 minut – fotoaktywność w 5 cyklach charakteryzowała się względnym ustabilizowaniem.

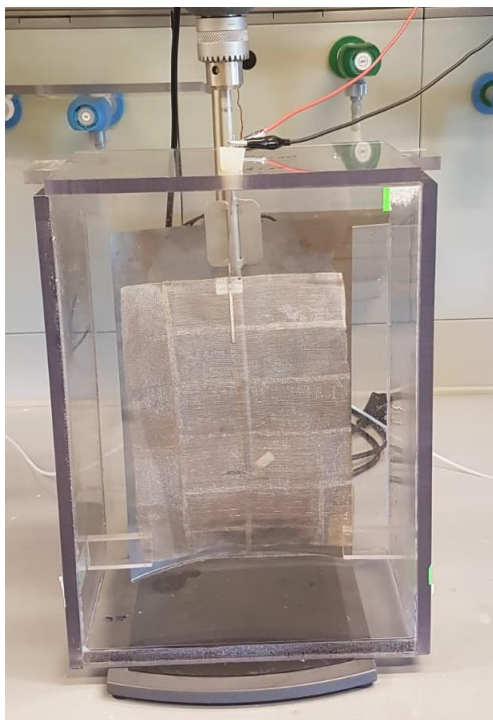
Zadanie 2. Wytworzenie warstw nanorurek TiO_2 o wymiarach dostosowanych do rozmiarów instalacji

Cel zadania:

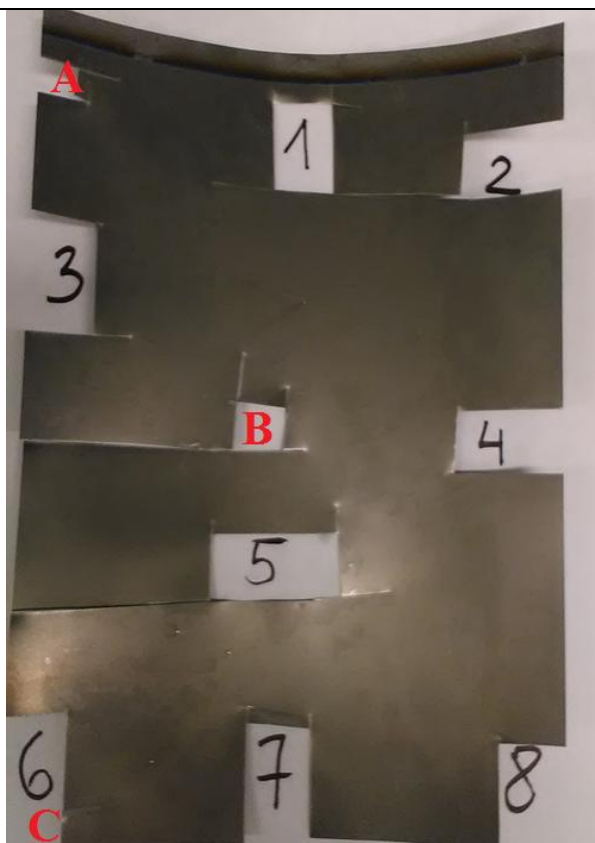
Celem tego zadania było opracowanie metody otrzymywania nanorurek wykazujących aktywność fotokatalityczną na arkuszach blachy tytanowej o wymiarach 300 x 200 mm

Najważniejsze prace wykonane w ramach zadania

1. Zbudowano układ do anodyzacji w skali ułamkowo-technicznej (i przeprowadzono optymalizację tego układu) – Rys. 3
2. Przeprowadzenie serii anodyzacji blachy tytanowej o wymiarach 300 x 200 mm (zbadano wpływ warunków anodowania, składu elektrolitu, czasu usuwania warstwy inicjacyjnej, mieszania elektrolitu podczas anodyzacji, wielkości reaktora, położenia mieszadła w reaktorze) – Rys. 4, Tabela 1-2
3. Zbadano aktywność otrzymanych nanorurek w modelowej reakcji degradacji toluenu w fazie gazowej (Tabela 3, Rys. 5)
4. Opracowano metodę regeneracji elektrolitu (Tabela 4)
5. Przeprowadzono badanie aktywności fotokatalitycznej wybranej próbki nanorurek TiO_2 przez okres 22 tygodni (celem określenia stabilności otrzymanych warstw) – Rys. 6.



Rys. 3. Prototyp reaktora o wymiarach 130 x360x250 mm.



Rys. 4 Fragmenty folii tytanowej zsyntezowanej w skali ułamkowo-technicznej pobrane do dalszych badań A-C – badania morfologii, 1-8 badania fotoaktywności.

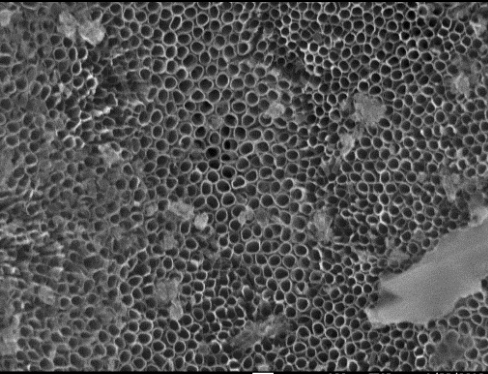
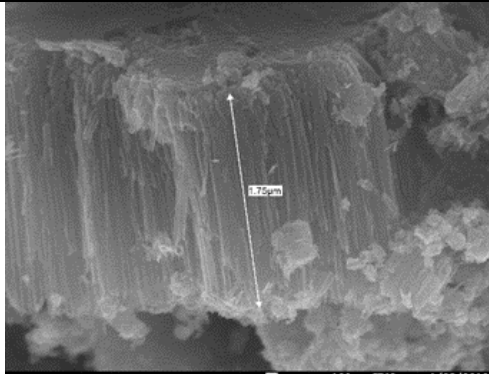
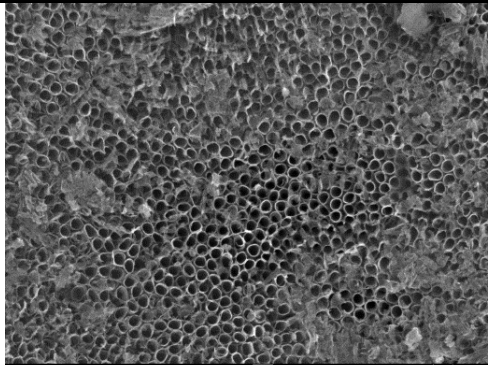
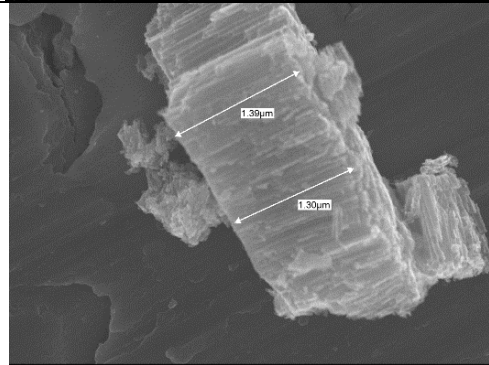
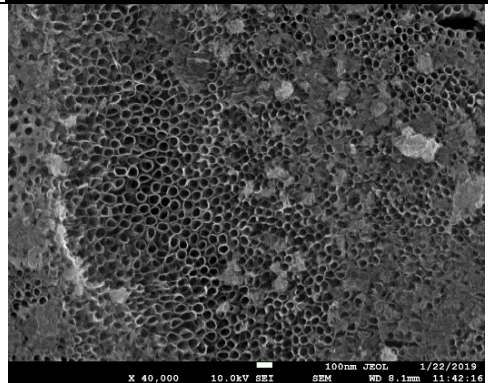
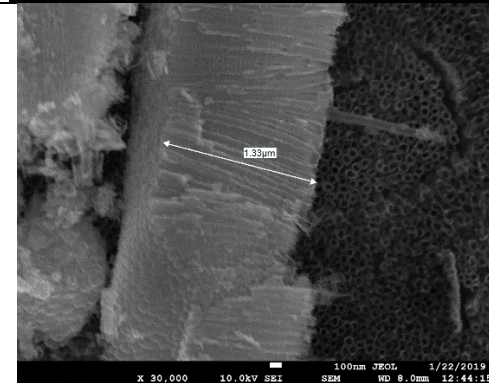
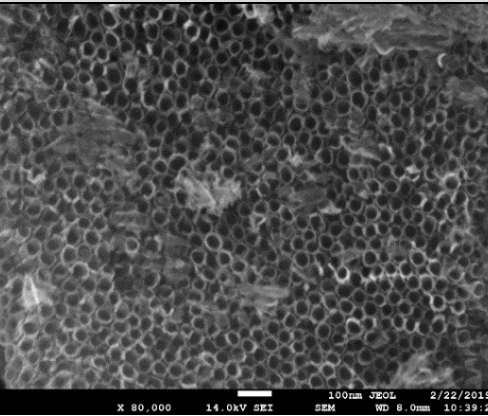
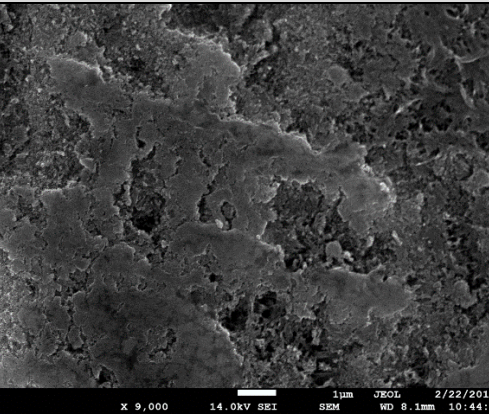
Tabela 1. Morfologia warstw TiO_2 otrzymywanych w skali ułamkowo-technicznej

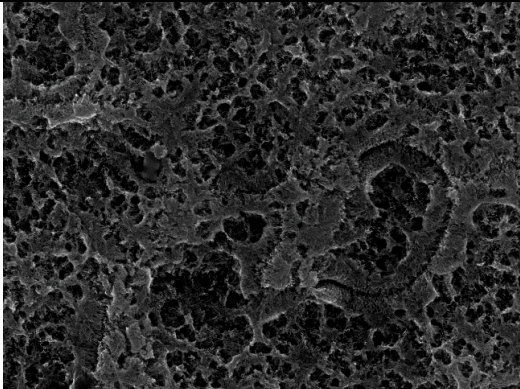
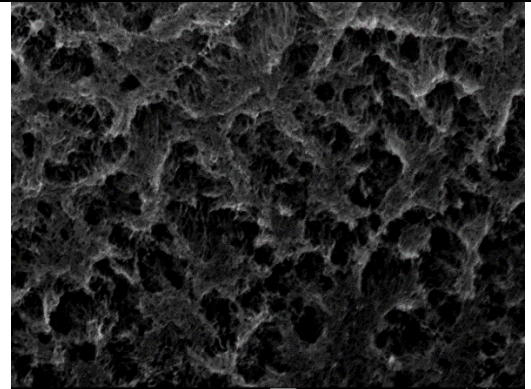
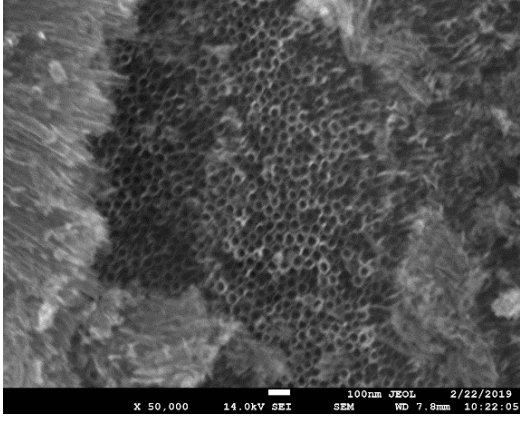
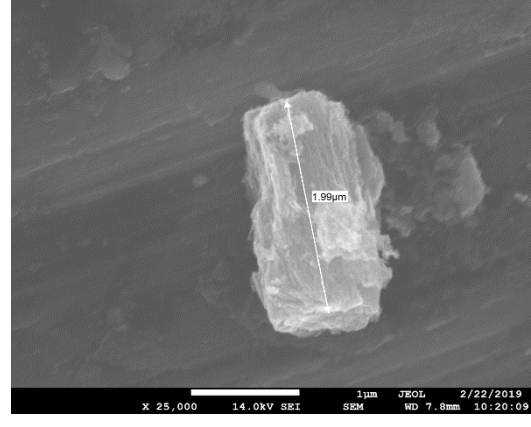
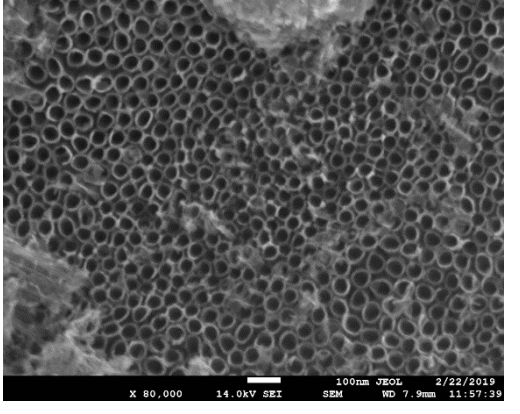
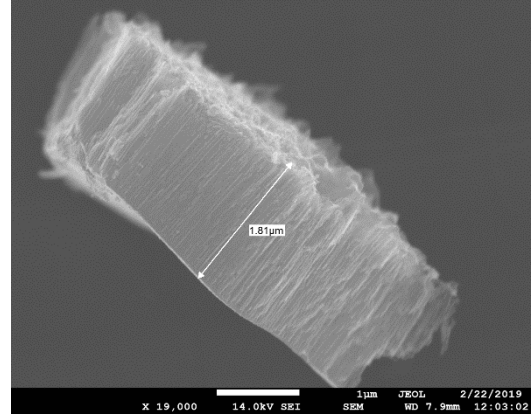
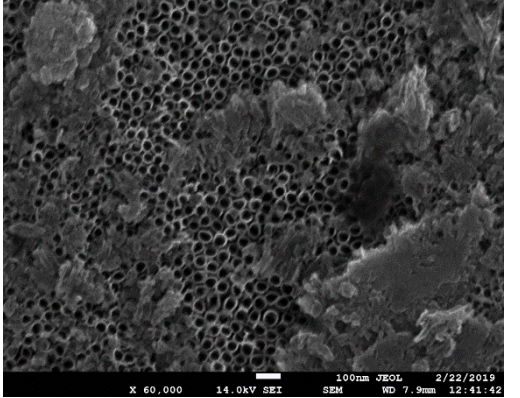
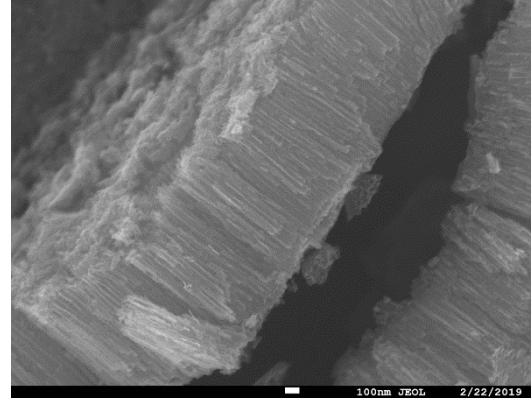
Nazwa próbki	Wymiary nanorurek			
	Nr wycinka	Długość [μm]	Średnica [nm]	Grubość ścian [nm]
D	1	1,5	47	7
	2	1,18	50	7
	3	1,74	60	6
	5	1,3	55	10
	8	1,35	57	10
E	1	-	40	4
	2	brak nanorurek – porowata struktura		
	3	1,99	44	5
	5	1,81	45	5
	8	1,77	46	5
F	1	1,72	47	6
	2	1,15	48	10
	3	0,629	29	7
	5	brak nanorurek – porowata struktura		
	8	1,87	32	6
G	1	0,668	20	7
	2	1,32	48	10

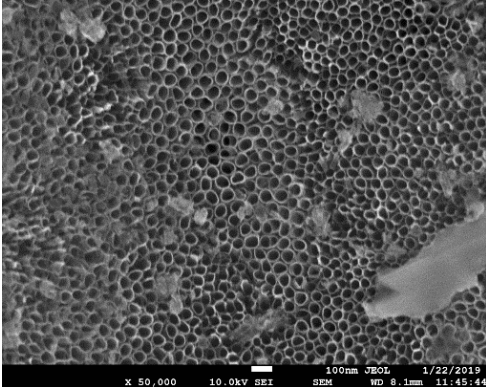
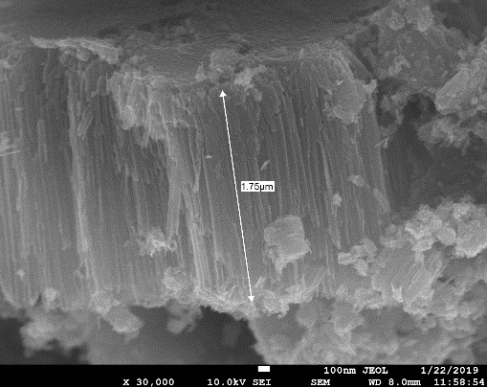
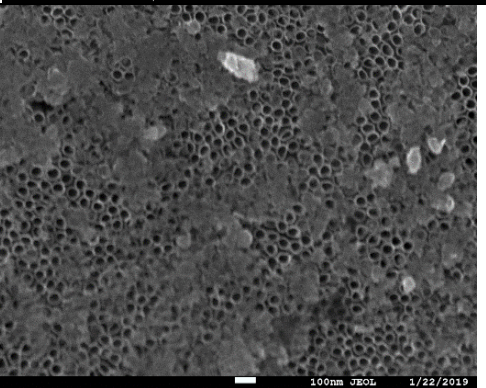
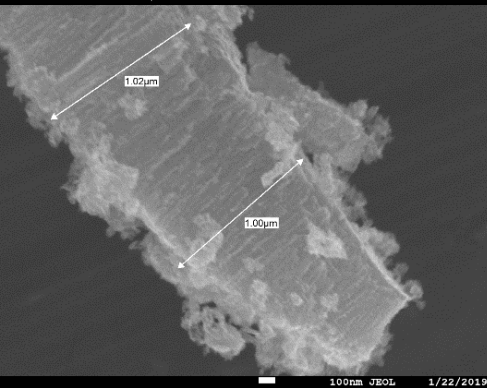
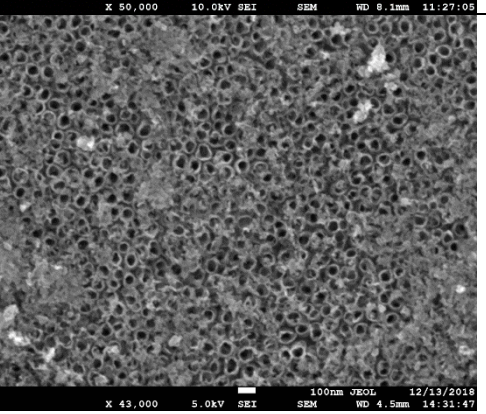
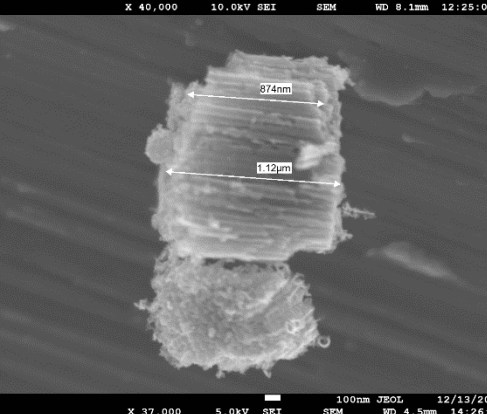
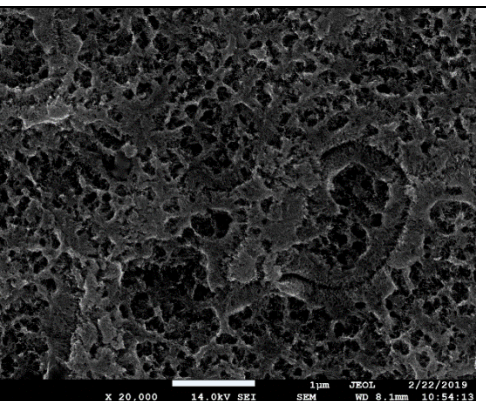
		3	1,27	28	7
		5	brak nanorurek – porowata struktura		
		8	0,598	32	6
	H	1	1,14	59	7
		2	1,40	56	6
		3	1,31	56	7
		5	1,32	45	7
		8	1,45	46	7
	I	1	2,71	45	8
		2	4,49	44	8
		3	3,48	47	5
		5	3,35	50	8
		8	3,52	49	8
	J	1	5,12	85	6
		2	5,32	98	8
		3	5,52	111	11
		5	5,90	109	14
		8	6,26	85	6

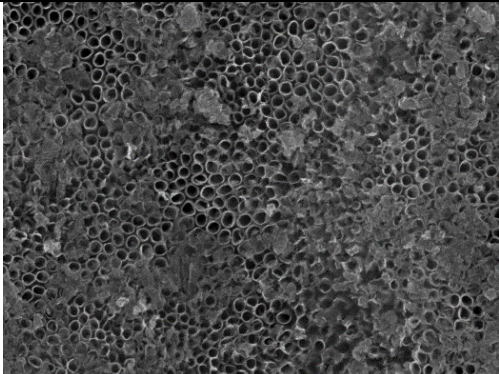
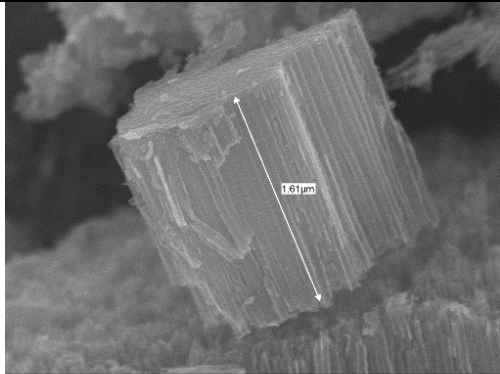
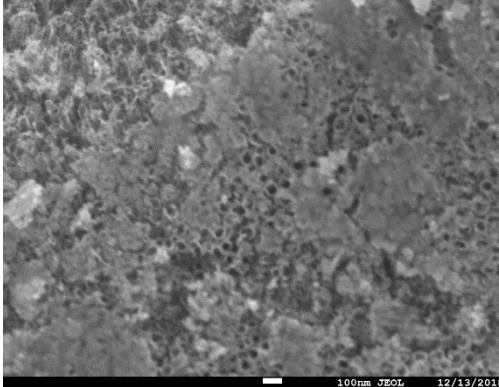
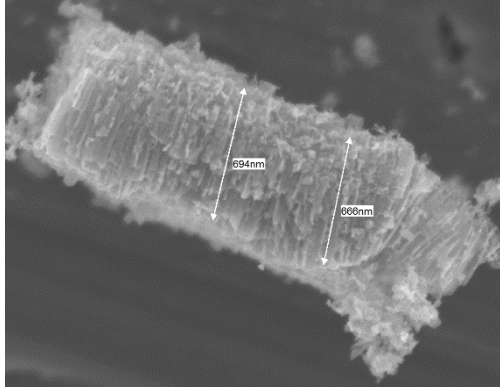
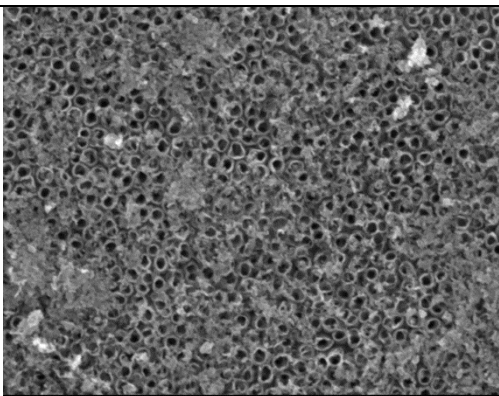
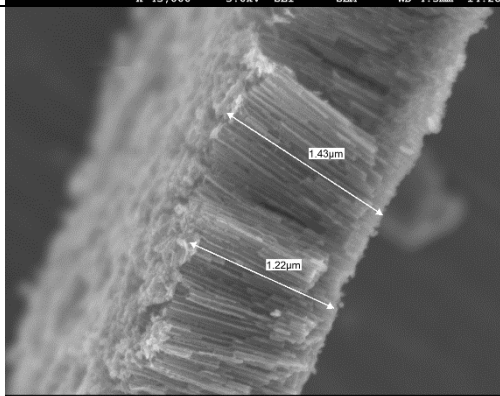
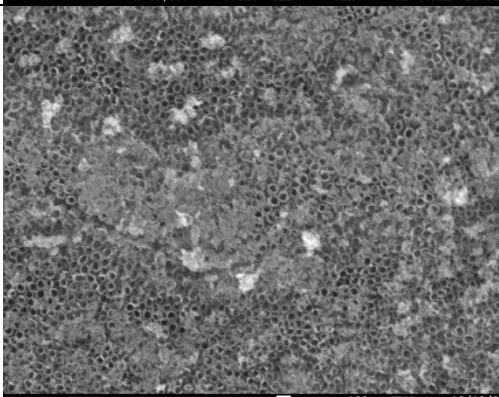
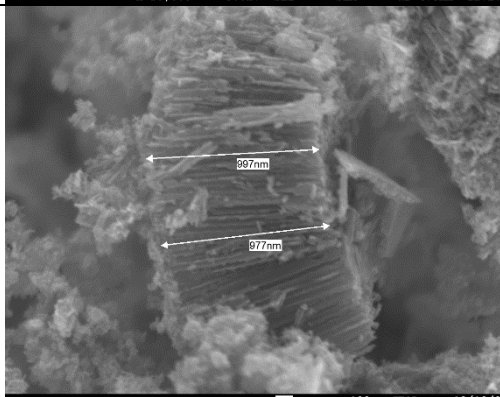
Tabela 2. Zdjęcia SEM fragmentów folii tytanowej (D-J) zsyntezowanej w skali ułamkowo technicznej.

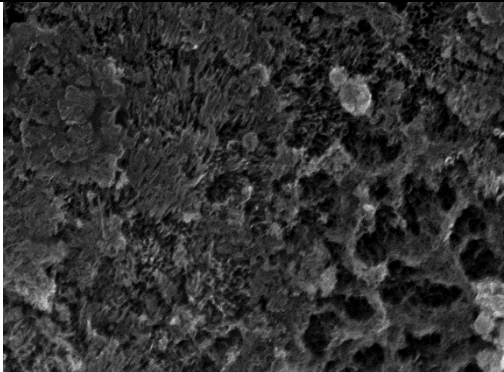
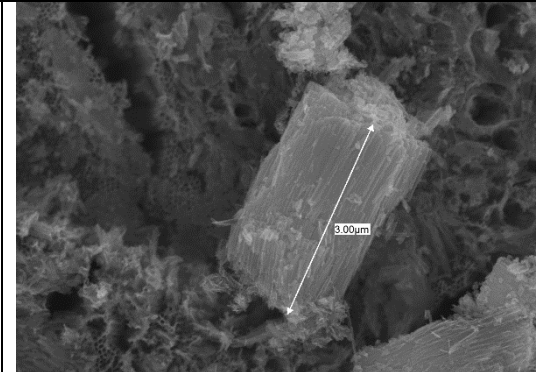
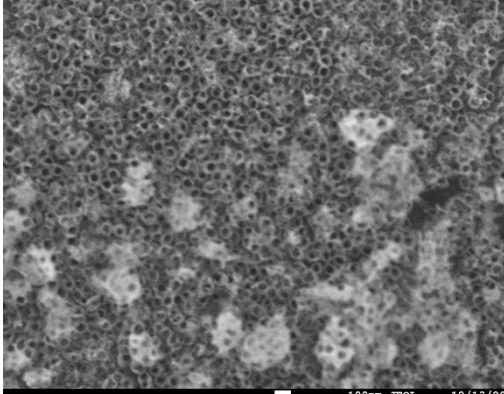
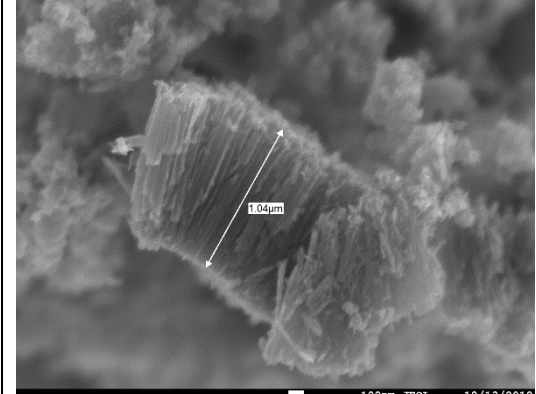
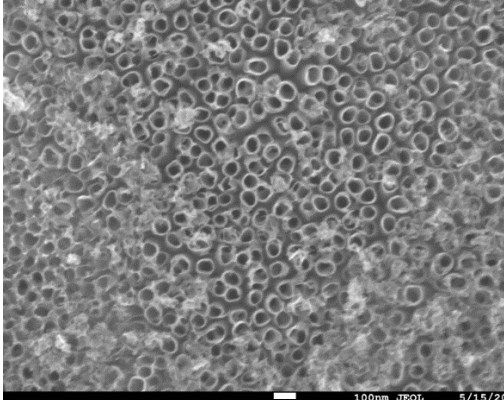
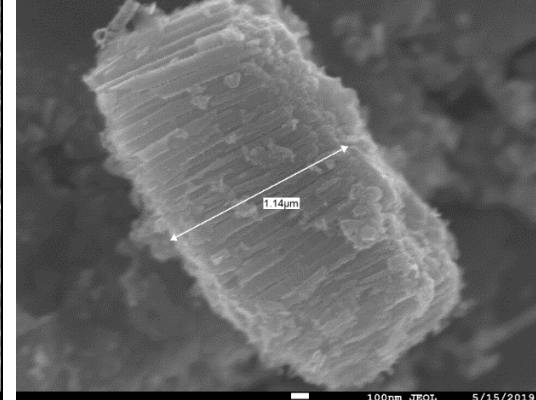
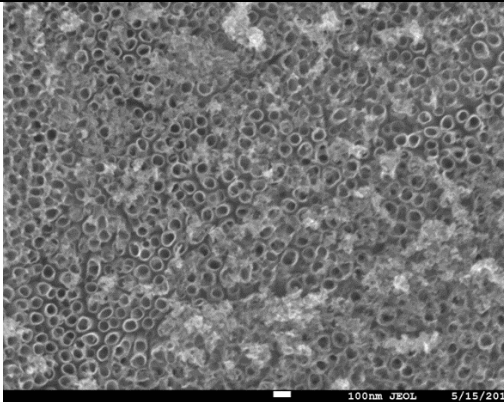
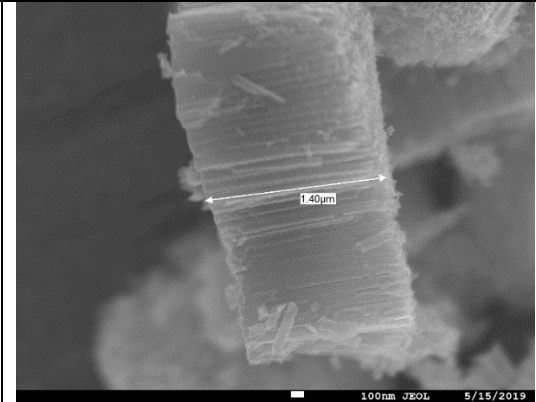
Nr. wycinka		Morfologia	
PRÓBKA D			
1			
2			

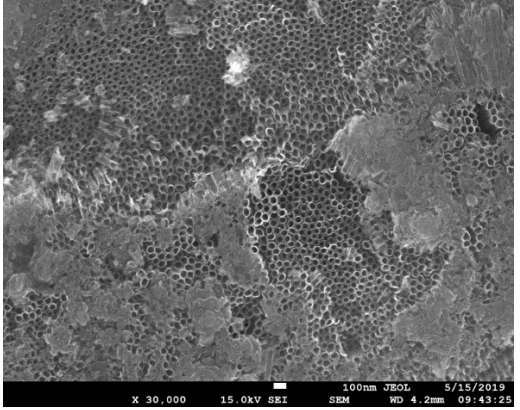
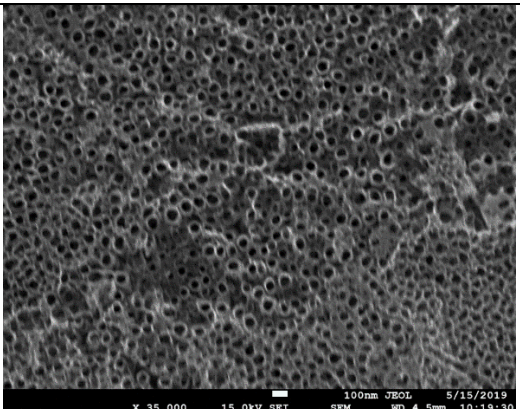
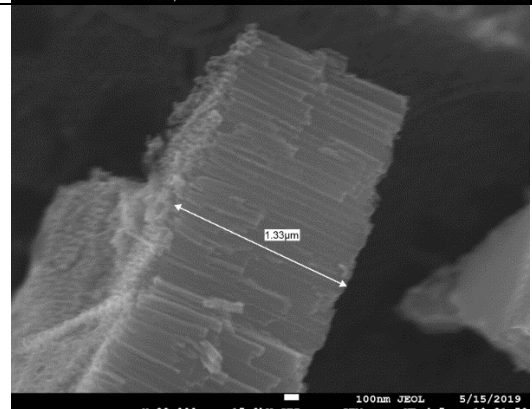
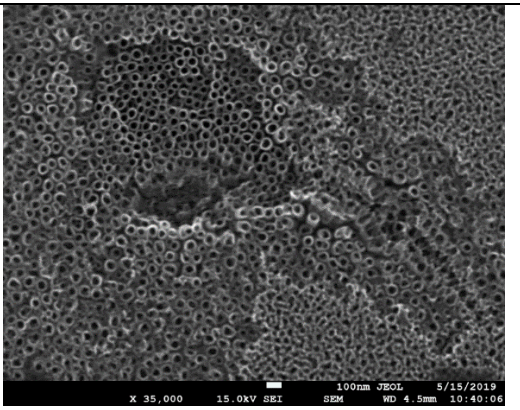
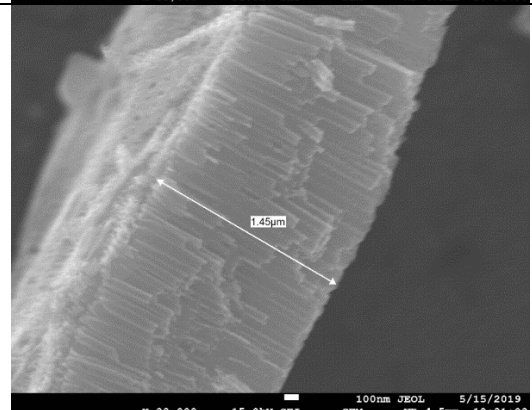
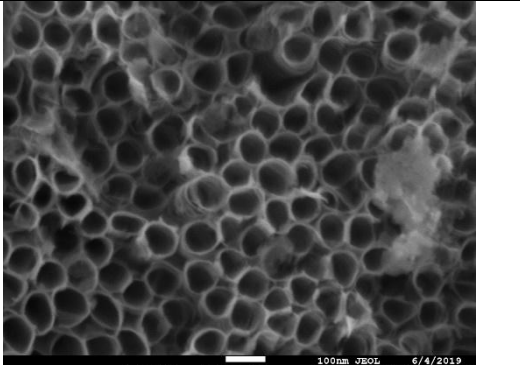
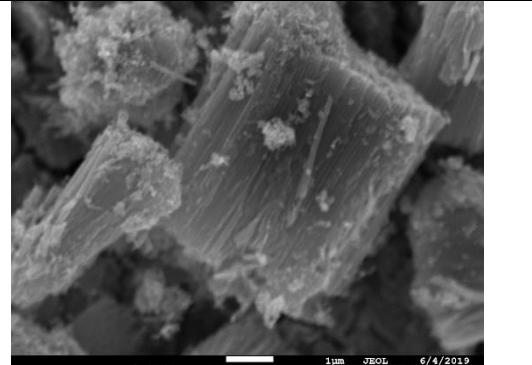
3		
5		
8		
PRÓBKA E		
1		

2	 X 20,000 14.0kV SEI SEM 1μm JEOL 2/22/2019 WD 8.1mm 10:54:13	 X 60,000 14.0kV SEI SEM 100nm JEOL 2/22/2019 WD 8.1mm 10:56:08
3	 X 50,000 14.0kV SEI SEM 100nm JEOL 2/22/2019 WD 7.8mm 10:22:05	 X 25,000 14.0kV SEI SEM 1μm JEOL 2/22/2019 WD 7.8mm 10:20:09
5	 X 80,000 14.0kV SEI SEM 100nm JEOL 2/22/2019 WD 7.9mm 11:57:39	 X 19,000 14.0kV SEI SEM 1μm JEOL 2/22/2019 WD 7.9mm 12:03:02
8	 X 60,000 14.0kV SEI SEM 100nm JEOL 2/22/2019 WD 7.9mm 12:41:42	 X 33,000 14.0kV SEI SEM 100nm JEOL 2/22/2019 WD 7.9mm 12:55:32
PRÓBKA F		

1	 100nm JEOL 1/22/2019 X 50,000 10.0kV SEI SEM WD 8.1mm 11:45:44	 100nm JEOL 1/22/2019 X 30,000 10.0kV SEI SEM WD 8.0mm 11:58:54
2	 100nm JEOL 1/22/2019 X 50,000 10.0kV SEI SEM WD 8.1mm 11:27:05	 100nm JEOL 1/22/2019 X 40,000 10.0kV SEI SEM WD 8.1mm 12:25:02
3	 100nm JEOL 12/13/2018 X 49,000 5.0kV SEI SEM WD 4.5mm 14:31:47	 100nm JEOL 12/13/2018 X 37,000 5.0kV SEI SEM WD 4.5mm 14:26:34
5	 100nm JEOL 2/22/2019 X 20,000 14.0kV SEI SEM WD 8.1mm 10:54:13	

8		
PRÓBKA G		
1		
2		
3		

5	 100nm JEOL 2/22/2019 X 60,000 14.0kV SEI SEM WD 8.1mm 10:57:37	 1µm JEOL 5/30/2019 X 16,000 12.0kV SEI SEM WD 7.8mm 11:40:19
8	 100nm JEOL 12/13/2018 X 37,000 5.0kV SEI SEM WD 4.5mm 14:48:20	 100nm JEOL 12/13/2018 X 35,000 5.0kV SEI SEM WD 4.5mm 14:42:58
PRÓBKA H		
1	 100nm JEOL 5/15/2019 X 50,000 9.0kV SEI SEM WD 4.5mm 09:01:01	 100nm JEOL 5/15/2019 X 40,000 9.0kV SEI SEM WD 4.5mm 09:09:04
2	 100nm JEOL 5/15/2019 X 40,000 9.0kV SEI SEM WD 4.5mm 09:14:11	 100nm JEOL 5/15/2019 X 30,000 9.0kV SEI SEM WD 4.5mm 09:14:11

3		
5		
8		
PRÓBKA J		
1		

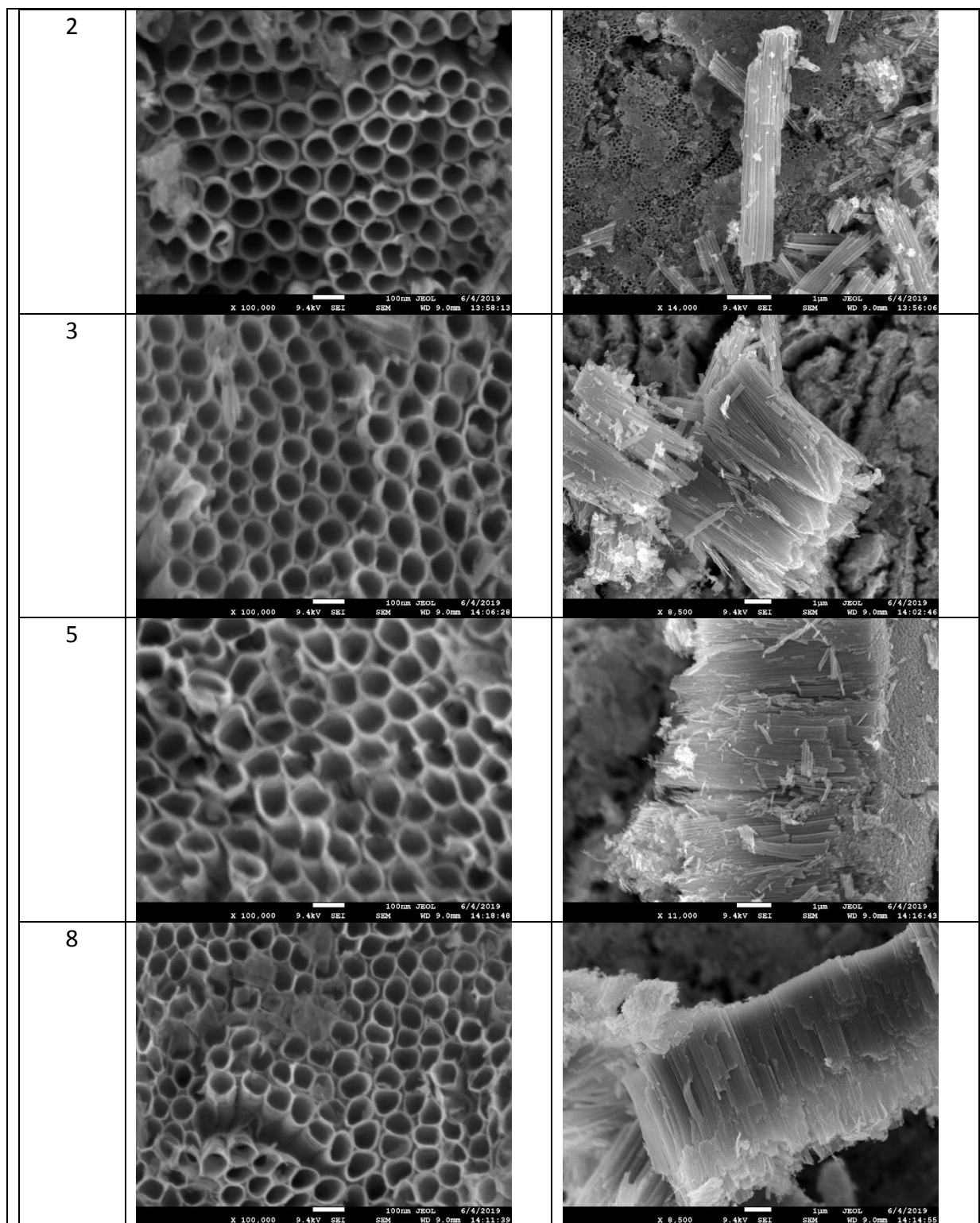
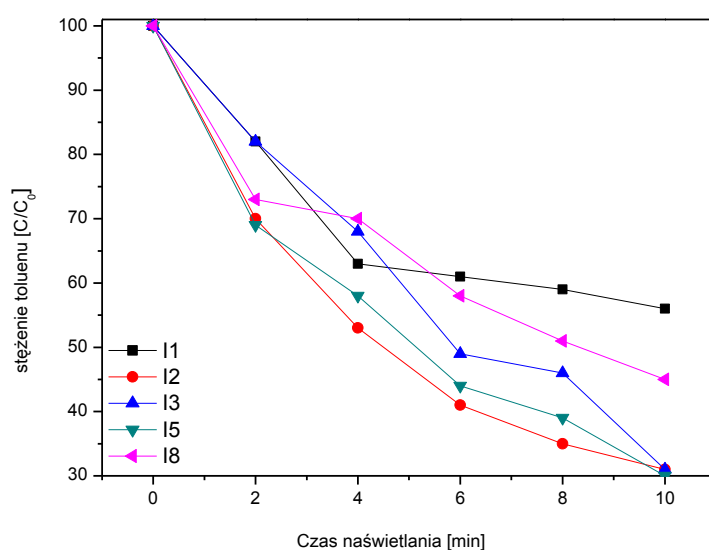


Tabela 3. Fotoaktywność próbki DS_I (warunki anodyzacji: 40V, 1h)

Stężenie toluenu C/C_0 [%]					
Czas [min]	DS_I_1	DS_I_2	DS_I_3	DS_I_5	DS_I_8
0	100	100	100	100	100
2	82	70	82	69	73
4	63	53	68	58	70
6	61	41	49	44	58

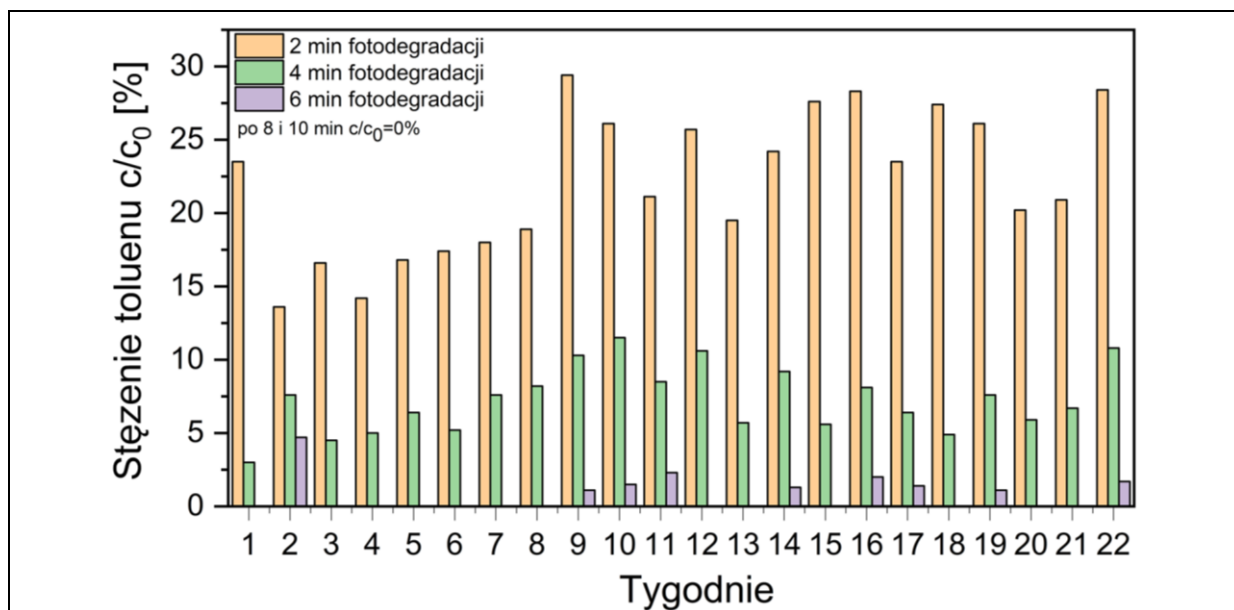
8	59	35	46	39	51
10	56	31	31	30	45



Rys. 5. Fotoaktywność próbki DS_I (warunki anodyzacji: 40V, 1h, skład elektrolitu: glikol etylenowy 99%, woda 1%, fluorek amonu 0.2M, czas w łaźni 10 minut)

Tabela 4. Wyniki zbiorcze fotoaktywności po naświetlaniu próbki przez 10 minut diodami LED 375 nm

Nazwa próbki	Numer wycinka				
	1	2	3	5	8
D	69	80	60	71	66
E	38	71	33	44	46
F	66	40	56	75	93
G	52	82	60	87	56
H	36	74	47	74	80
I	56	31	31	30	45
J	58	41	58	33	47



Rys. 6. Fotoaktywność próbki pobranej z płyty P10 (badanie stabilności w czasie długoterminowego przechowywania)

Najważniejsze wnioski

Opracowane parametry anodyzacji pozwalają na otrzymanie nanorurek o długości około 3,3 μm , które charakteryzują się zdolnością do fotodegradacji toluenu na poziomie około 70% w ciągu 10 minut naświetlania (dla toluenu o stężeniu 200 ppm).

Po 5, 10 i 15 cyklu utleniania anodowego wymieniano 2 l elektrolitu na nowo otrzymany roztwór i stwierdzono, że \ że aktywność fotokatalityczna wycinków próbek nieznacznie spada wraz z kolejną anodyzacją wykonaną w tym samym elektrolicie. Dla próbki otrzymanej w 20 cyklu po 10 minutach naświetlania zaobserwowano około 80% degradacji toluenu.

Otrzymane próbki były stabilne i aktywne po 22 tygodniach

Zadanie 3. Projektowanie oraz budowa wieży fotokatalitycznej o wysokości 2,5-3,5m do oczyszczania powietrza

Cel zadania:

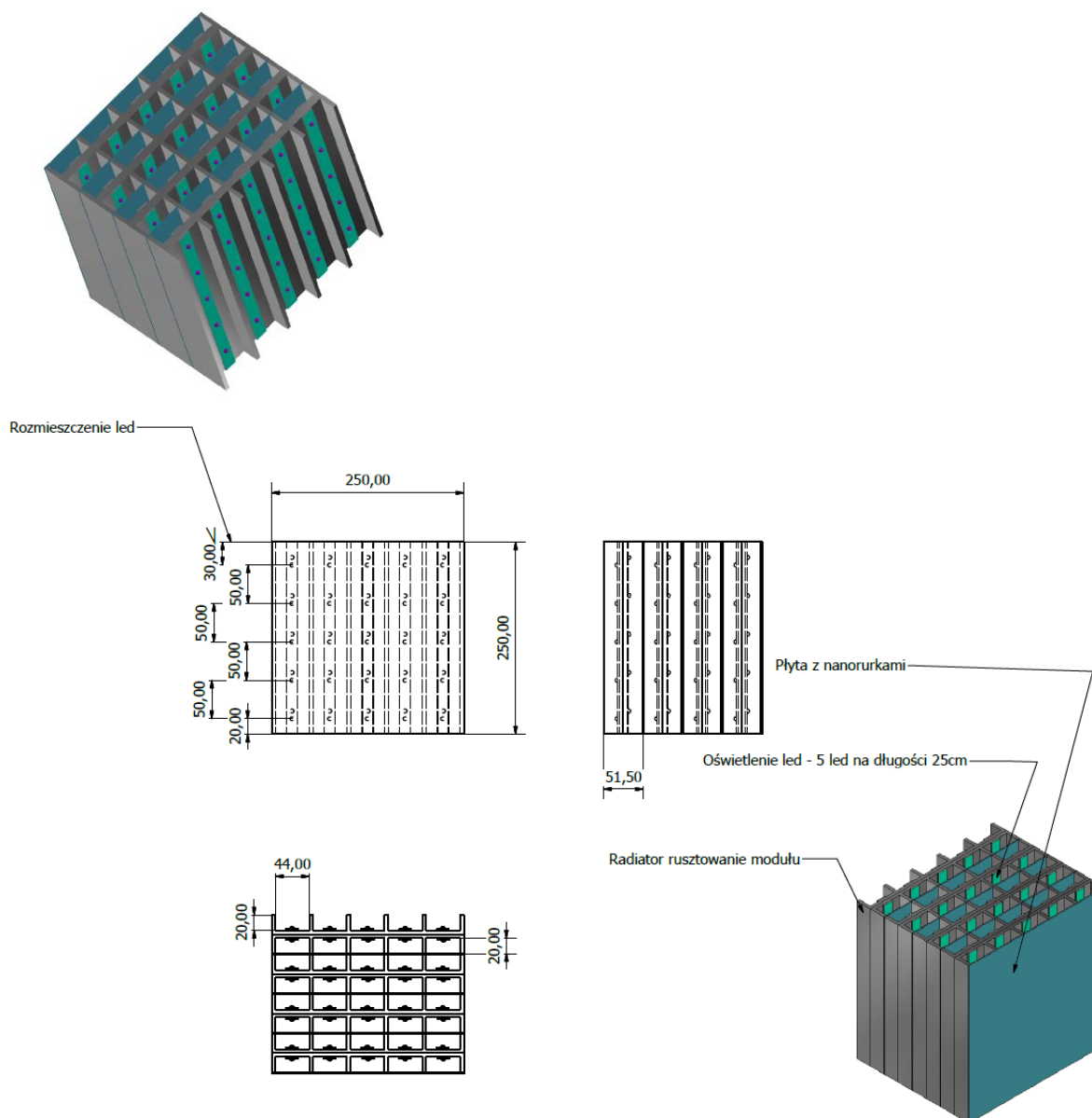
Celem zadania było opracowanie wytycznych do budowy wieży, zaprojektowanie oraz budowa wieży fotokatalitycznej.

Najważniejsze prace wykonane w ramach zadania

1. Opracowanie wytycznych do budowy wieży

- kanał fotokatalityczny o wymiarach 500 x 500 mm, umożliwiający zamontowanie warstw fotokatalitycznych w postaci nanorurek TiO_2 o sumarycznej powierzchni co

najmniej 2 m^2 . Kanał fotokatalityczny umożliwi wstawienie warstw w postaci żaluzji; (Rys. 7);



Rys. 7. Rozmieszczenie warstw fotokatalitycznych w kanale fotokatalitycznym.

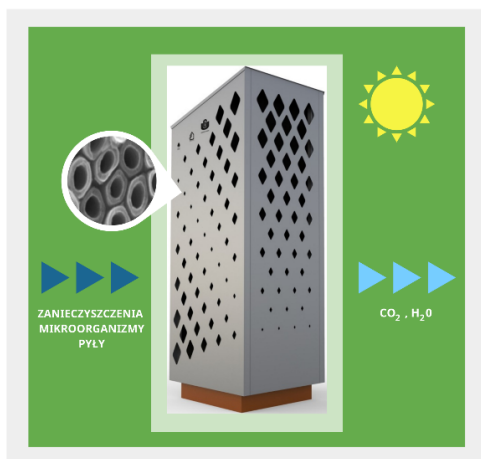
- warstwy fotokatalityczne powinny być oświetlane z obu stron diodami LED ($\lambda = 365\text{-}375 \text{ nm}$) o natężeniu promieniowania $\geq 15 \text{ mW/cm}^2$ na całej powierzchni warstw fotokatalitycznych (mierzone na powierzchni warstw fotokatalitycznych oraz zachowując dystans dzielący źródło światła od warstw fotokatalitycznych);
- urządzenie powinno zawierać układ odpylania pyłu zawieszonego PM2.5 oraz PM10 tuż za wejściem zanieczyszczonego powietrza do komory fotokatalitycznej; poziom

dopuszczalny, odpowiednio dla PM10 –40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, a dla pyłu PM2,5 - 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;

- na wlocie oraz wylocie instalacji oraz po każdym module powinny zostać umieszczone króćce poboru próbek powietrza umożliwiające pobór próbek o objętości co najmniej 0,5 – 1,0 litra;
- instalacja zawierająca warstwy fotokatalityczne nie powinna powodować spadku natężenia przepływu powietrza większego niż 35%;
- instalacja powinna być wyposażona w czujniki które pozwolą mierzyć stężenie VOC przed oraz po wejściu zanieczyszczonego powietrza do wieży fotokatalitycznej (stężenie mierzone w zakresie 10 do 20 000 ppb);
- wieża powinna posiadać wyświetlacz ciekłokrystaliczny wyświetlający stężenie VOC przed oraz po wejściu zanieczyszczonego powietrza do wieży,
- instalacja powinna być wyposażona w wentylatory; średnia liniowa szybkość przepływu powietrza przez instalacje powinna być regulowana w zakresie 0,02 – 0,3 m/s; i umożliwiać ustawienie następujących średnich liniowych szybkości przepływu powietrza: 0,02; 0,05; 0,1; 0,2 oraz 0,3 m/s;
- instalacja powinna być wyposażona w panele fotowoltaiczne,
- instalacja powinna być wyposażona w czujnik temperatury, który będzie wskazywał temperaturę panującą wewnątrz instalacji,
- wieża powinna być wyposażona w wyświetlacz ciekłokrystaliczny wyświetlający stężenie VOC na wejściu i na wyjściu z instalacji,
- instalacja ma być odporna na warunki atmosferyczne oraz działanie czynników powodujących korozję,
- wydajność instalacji powinna wynosić min. 95%
- instalacja ma być odporna na warunki atmosferyczne oraz działanie czynników powodujących korozję.

2. Zaprojektowano tablicę informacyjną opisującą zasadę działania wieży fotokatalitycznej (Rys. 8).

WIEŻA FOTOKATALITYCZNA DO OCZYSZCZANIA POWIETRZA



Projekt i budowa wieży fotokatalitycznej został dofinansowany przez Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Gdańsku w ramach projektu nr WFOŚ/D/210/4/2018 na zadanie pt. „Wieże fotokatalityczne do oczyszczania powietrza w aglomeracjach miejskich”

Co to jest wieża fotokatalityczna ???

Wieża fotokatalityczna jest nowatorskim urządzeniem służącym do oczyszczania powietrza w aglomeracjach miejskich, które pozwala na jednoczesne usuwanie lotnych związków organicznych (VOCs), związków nieorganicznych (takich jak NO_x oraz SO_2), pyłów oraz mikroorganizmów, a tym samym na polepszenie jakości powietrza w aglomeracjach miejskich. Urządzenie wykorzystuje innowacyjny proces fotokatalizy heterogenicznej, w którym aktywne formy tlenu skutecznie unieszkodliwiają zanieczyszczenia chemiczne, mikroorganizmy patogenne oraz nieprzyjemne zapachy.

Jak działa wieża fotokatalityczna ???

Powietrze z otoczenia przepływa przez filtry wstępne celem usunięcia cząstek stałych (pyłów) z powietrza, a następnie jest kierowane do przestrzeni pomiędzy warstwą fotokatalityczną a źródłem promieniowania UV, które stanowią niskenergetyczne diody LED. Warstwa fotokatalityczna ma postać blachy tytanowej pokrytej przestrzennie zorientowanymi nanorurkami z tlenu tytanu (IV) (TiO_2). W wyniku naświetlania TiO_2 promieniowaniem UV następuje wzbudzenie półprzewodnika i wytworzenie nośników ładunków (dziur i elektronów), które w wyniku reakcji z tlenem cząsteczkowym oraz z cząsteczkami wody powodują generowanie aktywnych form tlenu. Tak wytworzone aktywne formy tlenu reagują z zanieczyszczeniami z powietrza, powodując ich rozkład lub inaktywację. Górna powierzchnia wieży fotokatalitycznej została pokryta ogniwami słonecznymi (celem zmniejszenia zużycia energii ze źródeł nieodnawialnych). Ponadto wieża wyposażona jest w czujniki, pozwalające na pomiar zawartości lotnych związków organicznych w strumieniu wlotowym oraz wylotowym, co umożliwia stałą ocenę efektywności degradacji zanieczyszczeń organicznych.



WFOŚiGW
w Gdańsku



Rys. 8. Projekt tablicy informacyjnej.

Najważniejsze wnioski

1. Opracowano wytyczne i projekt do budowy wieży

Zadanie 4. Instalacja wieży w miejscu docelowym oraz ocena efektywności oczyszczania powietrza na terenie kampusu Uniwersytetu Gdańskiego

Cel zadania:

Celem tego zadania było zainstalowanie wieży fotokatalitycznej w miejscu docelowym (kampus UG) oraz ocena efektywności pracy wieży

Najważniejsze prace wykonane w ramach zadania

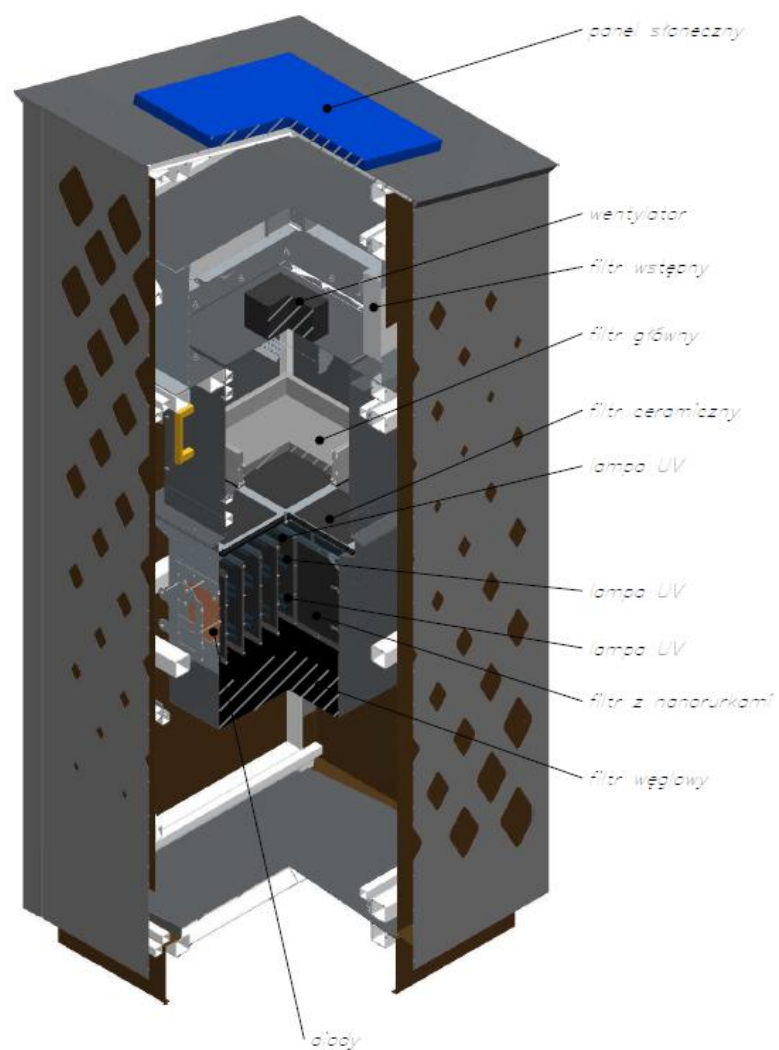
1. Instalacja wieży na kampusie Uniwersytetu Gdańskiego

Wieża fotokatalityczna (Rys.9-11) oczyszczająca powietrze posiada panel sterujący zamontowany na zewnętrznej ścianie z wyłącznikiem głównym stacyjkowym oraz z wyświetlaczami ciekłokrystalicznymi przedstawiającymi odczyty parametrów powietrza z czujników na wejściu powietrza do wieży oraz na wyjściu z wieży. Za pośrednictwem panelu sterującego możliwa jest płynna regulacja prędkości obrotowej wentylatora za pomocą potencjometru umieszczonego wewnątrz panelu. W celu precyzyjnej regulacji prędkości

przepływającego powietrza przez urządzenie został zastosowany przepływomierz powietrza z możliwością odczytu prędkości. Układ zasysania powietrza posiada zespół filtrów oczyszczających powietrze z cząstek stałych tj. dwa filtry na wejściu powietrza z otoczenia do wieży oraz trzeci filtr przed warstwami fotokatalitycznymi. Powietrze przepływa przez pierwszy zespół czujników znajdujący się w komorze filtracyjnej - wstępnego przygotowania powietrza do procesu oczyszczania, dalej kierowane jest do właściwego procesu fotokatalicznego. Warstwy fotokatalityczne ceramiczne oświetlane są siedmioma lampami UV-C o mocy 36 W każda. Po przejściu powietrza przez pierwszy etap układu fotokatalitycznego oczyszczania powietrze trafia na ekrany z aktywnymi nanorurkami, które są oświetlane 14 lampami UV-C o mocy 36W każda oraz modulem Led UV o całkowitej mocy 150W z aktywnym układem chłodzenia. Po wyjściu strumienia powietrza z modułu fotokatalitycznego oczyszczania powietrze przepływa przez złożę węgla aktywnego, gdzie trafia do komory pomiarowej wyjściowej i ostatecznie oczyszczone kierowane jest na zewnątrz konstrukcji wieży. Dolna komora pomiarowa posiada zawór do poboru próbek powietrza wyjściowego. Do sterowania funkcjami wieży fotokatalitycznej zastosowano tablet z odpowiednimi aplikacjami.



Rys. 9. Obudowa wieży fotokatalitycznej zlokalizowana na terenie UG.



Rys. 10. Schemat wieży fotokatalitycznej wraz z wyszczególnionymi komponentami.

(a)



(b)



Rys. 11. Wieża fotokatalityczna zlokalizowana na terenie UG: (a) widok zewnętrzny wieży fotokatalitycznej; (b) widok wnętrza wieży fotokatalitycznej.

2. Efektywność działania wieży fotokatalitycznej prowadzono *in-situ* z wykorzystaniem sztucznie generowanego toluenu jako modelowego zanieczyszczenia w fazie gazowej (z wykorzystaniem mieszaniny zawierającej 500 oraz 100 ppm toluenu) – Tabela 5

Tabela 5. Efektywność usuwania toluenu o stężeniu 100 ppm o natężenie przepływu 0,2; 0,4 lub 0,8 m/s

C ₀ = 100 ppm Natężenie przepływu 0,2 m/s			
Czas [min]	WLOT	WYLOT	Efektywność [%]
	TVOC [mg/m ³]	TVOC [mg/m ³]	
0	0,001	0,002	0
2	0,263	0,001	99,6
4	0,378	0,003	99,2
6	0,547	0,003	99,5
8	0,501	0,000	100,0
10	0,472	0,004	99,2
12	0,441	0,003	99,3
14	0,402	0,000	100,0
16	0,514	0,003	99,4
18	0,514	0,003	99,4
20	0,413	0,000	100,0
22	0,492	0,003	99,4
24	0,650	0,000	100,0
26	0,522	0,003	99,4
28	0,560	0,003	99,5
30	0,575	0,001	99,8
Średnia efektywność [%]			93,4

C ₀ = 100 ppm Natężenie przepływu 0,8 m/s			
Czas [min]	WLOT	WYLOT	Efektywność [%]
	TVOC [mg/m ³]	TVOC [mg/m ³]	
0	0,001	0,001	0
2	0,457	0,049	89,3
4	0,532	0,044	91,7
6	0,560	0,046	91,8
8	0,558	0,052	90,7
10	0,529	0,061	88,5
12	0,528	0,051	90,3
14	0,535	0,056	89,5
16	0,515	0,083	83,9
18	0,580	0,053	90,9
20	0,580	0,059	89,8
22	0,560	0,059	89,5
24	0,581	0,072	87,6
26	0,547	0,049	91,0
28	0,563	0,052	90,8
30	0,562	0,083	85,2
Średnia efektywność [%]			83,8

3. Badania skuteczności wieży w miejscu docelowym (Tabela 6)

Tabela 6. Zdjęcia panelu przedstawiającego odczyty parametrów powietrza z czujników na wejściu do wieży oraz na wyjściu z wieży.

DATA	ZDJEĆIE MONITORA
31.08	
1.09	

2.09	Wejscie TVOC: 3 ppb Temp.: 28.1 T[C] Wilg.: 47 RH[%] PRACA Top button: Lit (Blue) Bottom buttons: Not lit Wyjscie TVOC: 12 ppb Temp.: 40.6 T[C] Wilg.: 25 RH[%]	
3.09	Wejscie TVOC: 18 ppb Temp.: 28.1 T[C] Wilg.: 47 RH[%] PRACA Top button: Lit (Blue) Bottom buttons: Not lit Wyjscie TVOC: 7 ppb Temp.: 40.6 T[C] Wilg.: 25 RH[%]	
4.09	Wejscie TVOC: 11 ppb Temp.: 29.7 T[C] Wilg.: 41 RH[%] PRACA Top button: Lit (Blue) Bottom buttons: Not lit Wyjscie TVOC: 6 ppb Temp.: 43.7 T[C] Wilg.: 21 RH[%]	
09.09	Wejscie TVOC: 13 ppb Temp.: 30.4 T[C] Wilg.: 37 RH[%] PRACA Top button: Lit (Blue) Bottom buttons: Not lit Wyjscie TVOC: 5 ppb Temp.: 43.3 T[C] Wilg.: 20 RH[%]	
10.09	Wejscie TVOC: 10 ppb Temp.: 24.1 T[C] Wilg.: 41 RH[%] PRACA Top button: Not lit Bottom buttons: Not lit Wyjscie TVOC: 16 ppb Temp.: 34.0 T[C] Wilg.: 25 RH[%]	
11.09	Wejscie TVOC: 19 ppb Temp.: 30.9 T[C] Wilg.: 24 RH[%] PRACA Top button: Lit (Blue) Bottom buttons: Not lit Wyjscie TVOC: 17 ppb Temp.: 43.6 T[C] Wilg.: 13 RH[%]	
14.09	Wejscie TVOC: 21 ppb Temp.: 34.5 T[C] Wilg.: 25 RH[%] PRACA Top button: Not lit Bottom buttons: Not lit Wyjscie TVOC: 6 ppb Temp.: 47.5 T[C] Wilg.: 14 RH[%]	
15.09	Wejscie TVOC: 142 ppb Temp.: 36.0 T[C] Wilg.: 34 RH[%] PRACA Top button: Not lit Bottom buttons: Not lit Wyjscie TVOC: 4 ppb Temp.: 43.4 T[C] Wilg.: 24 RH[%]	
16.09	Wejscie TVOC: 17 ppb Temp.: 32.5 T[C] Wilg.: 37 RH[%] PRACA Top button: Lit (Blue) Bottom buttons: Not lit Wyjscie TVOC: 12 ppb Temp.: 28.6 T[C] Wilg.: 31 RH[%]	

17.09	Wejscie TVOC 13 ppb Temp. 20.2 T[C] Wilg. 40 RH[%] PRACA Wyjscie TVOC 23 ppb Temp. 18.9 T[C] Wilg. 35 RH[%]
18.09	Wejscie TVOC 21 ppb Temp. 25.5 T[C] Wilg. 34 RH[%] PRACA Wyjscie TVOC 1 ppb Temp. 23.2 T[C] Wilg. 31 RH[%]
21.09	Wejscie TVOC 16 ppb Temp. 32.3 T[C] Wilg. 33 RH[%] PRACA Wyjscie TVOC 7 ppb Temp. 27.3 T[C] Wilg. 31 RH[%]
22.09	Wejscie TVOC 24 ppb Temp. 32.6 T[C] Wilg. 37 RH[%] PRACA Wyjscie TVOC 11 ppb Temp. 28.6 T[C] Wilg. 31 RH[%]
28.09	Wejscie TVOC 12 ppb Temp. 17.9 T[C] Wilg. 60 RH[%] PRACA Wyjscie TVOC 11 ppb Temp. 15.7 T[C] Wilg. 35 RH[%]
30.09	Wejscie TVOC 10 ppb Temp. 28.0 T[C] Wilg. 45 RH[%] PRACA Wyjscie TVOC 39 ppb Temp. 40.8 T[C] Wilg. 24 RH[%]
1.10	Wejscie TVOC 17 ppb Temp. 25.8 T[C] Wilg. 45 RH[%] PRACA Wyjscie TVOC 3 ppb Temp. 39.1 T[C] Wilg. 22 RH[%]
2.10	Wejscie TVOC 19 ppb Temp. 22.6 T[C] Wilg. 49 RH[%] PRACA Wyjscie TVOC 20 ppb Temp. 35.1 T[C] Wilg. 25 RH[%]
5.10	Wejscie TVOC 11 ppb Temp. 25.0 T[C] Wilg. 45 RH[%] PRACA Wyjscie TVOC 10 ppb Temp. 38.0 T[C] Wilg. 23 RH[%]

6.10	
7.10	
8.10	
9.10	
12.10	
13.10	
15.10	
16.10	

Najważniejsze wnioski

1. Przeprowadzone testy wykazały wysoką skuteczność wieży fotokatalitycznej w oczyszczaniu powietrza. Efektywność oczyszczania fazy gazowej wynosiła powyżej 86% oraz 71%, odpowiednio przy stężeniu toluenu wynoszącym 100

i 50 ppm. Natężenie przepływu ma kluczowe znaczenie, najskuteczniejsze działanie układu fotokatalitycznego uzyskano przy natężeniu wynoszącym 0,2 m/s; efektywność wynosiła powyżej 99% oraz 98%, odpowiednio dla $C_0 = 100$ i 50 ppm

2. Badania wstępne wykazały, że przeprowadzone pomiary wykazały skuteczność układu fotokatalitycznego w oczyszczaniu powietrza w warunkach rzeczywistych. Niemniej jednak, w niektóre dni pomiarowe obserwowano wyższe wyniki na wylocie niż na wlocie do układu – wynika to z dokładności zamontowanych czujników i jest to związane z niskim poziomem zanieczyszczeń lotnych w obrębie wieży fotokatalitycznej. Badania, w których zastosowane wysokie stężenia zanieczyszczenia modelowego (toluenu) wyraźnie pokazały wysoką skuteczność działania opracowanego urządzenia prototypowego. Największym problemem jest monitorowanie w sposób ciągły stężenia związków organicznych oraz nieorganicznych na wlocie i wylocie w warunkach atmosferycznych. Urządzenia, które są wykorzystywane do monitorowania powietrza w stacjach pomiarowych są kosztowne i mają duże gabaryty, stąd nie można ich wykorzystać do monitorowania pracy wieży fotokatalitycznej. Małe czujniki, charakteryzujące się również niższą ceną, mają niższą dokładność i łatwo ulegają „zatruciu” w warunkach pracy długoterminowej

Inne działania dotyczące realizacji projektu

Przygotowanie oraz zgłoszenie wniosku patentowego pt.: *Materiał z tytanu do oczyszczania powietrza z lotnych związków organicznych, związków nieorganicznych, pyłów oraz mikroorganizmów oraz sposób otrzymywania materiału z tytanu do oczyszczania powietrza z lotnych związków organicznych, związków nieorganicznych, pyłów oraz mikroorganizmów*. Zgłoszenie oznaczono numerem: P.433355.

Zgłoszenie patentowe zastrzega metodę otrzymywania warstwy fotokatalitycznej w postaci nanorurek w skali ułamkowo-technicznej w oparciu o badania przeprowadzone w projekcie. Zastrzeżono sposób otrzymywania nanorurek w skali ułamkowo-technicznej.

8. Efekt ekologiczny zrealizowanego projektu

Zaproponowane urządzenie fotokatalityczne jest pierwszym rozwiązaniem w skali ułamkowo-technicznej, które pozwala na punktowe oczyszczania powietrza atmosferycznego w aglomeracjach miejskich.

Zaproponowane rozwiązanie przede wszystkim intensyfikuje działania mające na celu ochronę środowiska naturalnego przy maksymalnym wsparciu środowiska naturalnego (proces przyjazny dla środowiska).

Prototypowa wieża fotokatalityczna charakteryzuje się następującymi cechami:

1. Posiada warstwę fotokatalityczną w postaci blachy pokrytej nanorurkami zbudowanymi z ditlenku tytanu, otrzymanego w procesie łatwego i powtarzalnego utleniania anodowego (proces utleniania anodowego pozwala na łatwą kontrolę długości nanorurek – kluczowego parametru wpływającego na ich fotoaktywność, a ponadto proces jest dobrze poznany i jak wykazano w projekcie możliwy do przeniesienia na skalę przemysłową).
2. Fotokatalizator w postaci nanorurek jest trwale przyczepiony do podłoża (nie wymaga to stosowania metody nakładania nanocząstek na podłoże z wykorzystaniem takich metod jak metoda zanurzeniowa (pokrywanie przez zanurzenie w roztworze zolu, będącego prekursorem fotokatalizatora), metodą nakładania pasty zawierającej nanocząstki fotokatalizatora czy metodą wirową (*spin-coating*). Eliminuje to m.in. zastosowanie rozpuszczalników organicznych czy substancji umożliwiających adhezję nanocząstek TiO_2 do podłoża (np. Triton X 100, kwas octowy, poli(winylopirolidon), acetyloaceton, etanol, glikol polietylenowy, et.) na etapie produkcji warstw fotokatalitycznych otrzymywanych poprzez immobilizację nanocząstek TiO_2 na powierzchni nośnika.
3. Fotokatalizator w postaci warstw zorientowanych nanorurek ma wysoką aktywność fotokatalityczną, ze względu na lepszą separację fotogenerowanych par elektron-dziura i może być aktywowany za pomocą energooszczędnych diod LED (mniejsze zużycie energii w procesach fotokatalitycznych). Dodatkowo, część energii wykorzystywanej przez wieżę fotokatalityczną jest wytwarzana przez ogniwo fotowoltaiczne, zlokalizowane na górnej pokrywie wieży fotokatalitycznej,

4. Zastosowanie warstwy fotokatalitycznej w postaci nanorurek umożliwia łatwe, wielokrotne wykorzystywanie tego samego fotokatalizatora (warstwa jest trwała mechanicznie i łatwa do regeneracji, np. poprzez naświetlenie dawką promieniowania UV o większym natężeniu).
5. Urządzenie pozwala na eliminację zanieczyszczeń znajdujących się w powietrzu atmosferycznych wokół wieży. Zastosowanie takich urządzeń może pozwolić na punktową poprawę jakości powietrza w aglomeracjach miejskich a tym samym na poprawę stanu środowiska i zdrowia ludzi.