

Paweł KRÓL¹, Piotr MAŁKA¹, Alberto GALLINA²

¹ Politechnika Krakowska

² Akademia Górniczo-Hutnicza

MODELOWANIE DMUCHAW W OCZYSZCZALNI NA PODSTAWIE DANYCH POMIAROWYCH

Streszczenie. We wprowadzeniu przedstawiono podstawowe mechanizmy działania komunalnych oczyszczalni ścieków na przykładzie obiektu oczyszczania w Krakowie-Płaszowie. W szczególności opisano system nadmuchu powietrza reaktora biologicznego. W części numerycznej opisano przykładowe dane pomiarowe oraz przeprowadza ich analizę statystyczną. Następnie przeprowadzono regresję liniową na podstawie tych danych. Otrzymane charakterystyki dmuchaw wykorzystano w symulacji modelu, w którym zaimplementowano autorski algorytm. Wyniki tych symulacji zestawiono i porównano.

BLOWERS MODELING IN WASTEWATER TREATMENT PLANT BASED ON MEASURED DATASET

Summary. The introduction outlines the fundamental operating mechanisms of municipal sewage treatment plants, using the Krakow-Płaszów treatment facility as an example. In particular, the air blowing system of the biological reactor is described. The numerical part describes sample measurement data and performs their statistical analysis. Then, linear regression was performed on the basis of these data. The characteristics of blowers were used in the simulation of the model in which the author's algorithm was implemented. The results of these simulations were compared and compared.

1. Opis obiektu badań

1.1. Opis oczyszczalni ścieków – studium przypadku

Oczyszczalnia miejska zlokalizowana w Krakowie-Płaszowie to nowoczesny obiekt oczyszczający ścieki z aglomeracji krakowskiej (rys. 3).

Głównym zadaniem każdej komunalnej oczyszczalni jest utylizacja ścieków. Odpowiednie przepisy prawa regulują procesy tak, aby wpływ na środowisko był jak najmniejszy. Utylizacja ścieków obejmuje etapy oczyszczania mechanicznego i biologicznego oraz utylizację i spalanie pozyskanych w ten sposób osadów. Oczyszczanie mechaniczne polega na usunięciu ze ścieków substancji stałych i zawieszonych poprzez procesy mechaniczne tj. rozdrabnianie, sedymentację, flotację,

spienianie i wirowanie. Ścieki oczyszczone biologicznie poddane są recyrkulacji pomiędzy reaktorami i osadnikami wtórnymi. W trakcie tej recyrkulacji aktywnie działają mikroorganizmy tlenowe i beztlenowe, w wyniku których oddzielają się ścieki oczyszczone oraz osad zawierający biomasę wraz z zawartymi w niej zanieczyszczeniami. Części bakterii do odpowiedniego wzrostu potrzebuje tlenu, który dostarcza się w niektórych komorach reaktora biologicznego. Odpowiednie natlenienie ścieków jest kluczowe dla zachowania stabilności procesów rozwoju mikroorganizmów, które nieustannie działają w ściekach [1],[5].



Rys. 1. Oczyszczalnia Kraków – Płaszów z lotu ptaka [6]

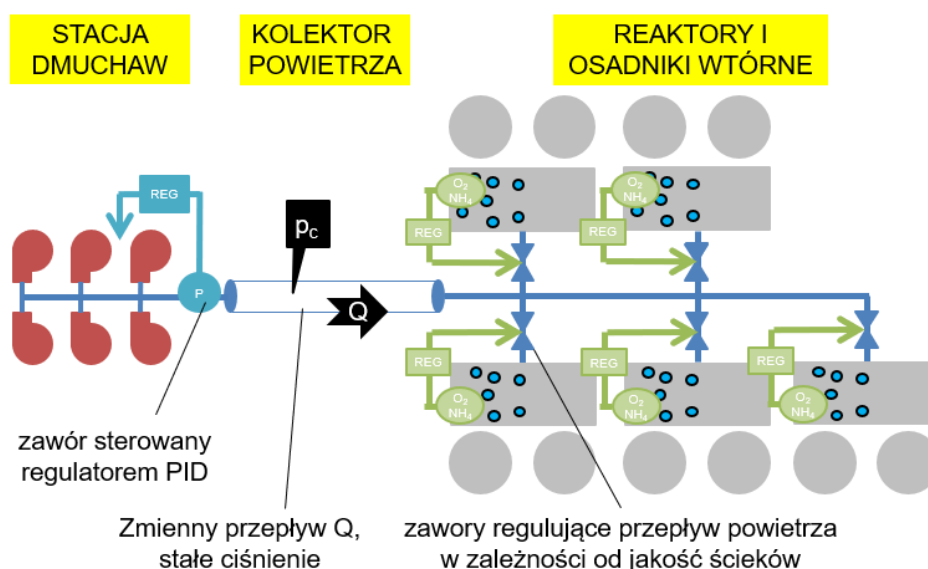


Rys. 2. Reaktory OŚ Płaszów z kolektywami doprowadzającymi powietrze [6]

Oczyszczalnia ścieków w Krakowie – Płaszowie oczyszcza ścieki zarówno mechanicznie, jak i biologicznie. Biologiczne oczyszczanie ścieków w krakowskiej oczyszczalni odbywa się pięciu reaktorach biologicznych recyrkulujących ścieki do dziesięciu osadników wtórnych (rys. 1). Do poszczególnych reaktorów powietrze rozprowadzane odpowiednimi kolektorami (rys. 2). Tlen tłoczy się w budynku, w którym znajduje się sześć niezależnie pracujących dmuchaw.

1.2. Proces natleniania

Przepływ powietrza sterowany sterowany w kolektorach. Zapotrzebowanie na przepływ powietrza wynika z obserwacji procesu w reaktorze. Otwarcie zaworu powoduje zmniejszenie ciśnienia w kolektorach (p_c), co następnie obserwowane na stacji dmuchaw. Dmuchawy sterowane są za pomocą regulatora PID, który utrzymuje ciśnienie w kolektorze na stałym, zadanym poziomie. Zatem układ dostosowuje przepływ powietrza (Q) dążąc do utrzymania stałego ciśnienia (p_c) z zachowaniem pewnej histerezy [4]. Na rysunku 3 przedstawiono schemat układu sterowania napowietrzaniem.



Rys. 3. Sterowanie napowietrzaniem w oczyszczalni ścieków [4]

Tłoczenie powietrza jest procesem energochonnym, dlatego dąży się do minimalizacji ilości. W dalszej części pracy numerycznej opisano przykładowe dane pomiarowe oraz przeprowadzono ich analizę statystyczną. Następnie zauważono pewne zależności, które wykorzystano w algorytmie sterowania modelem dmuchaw.

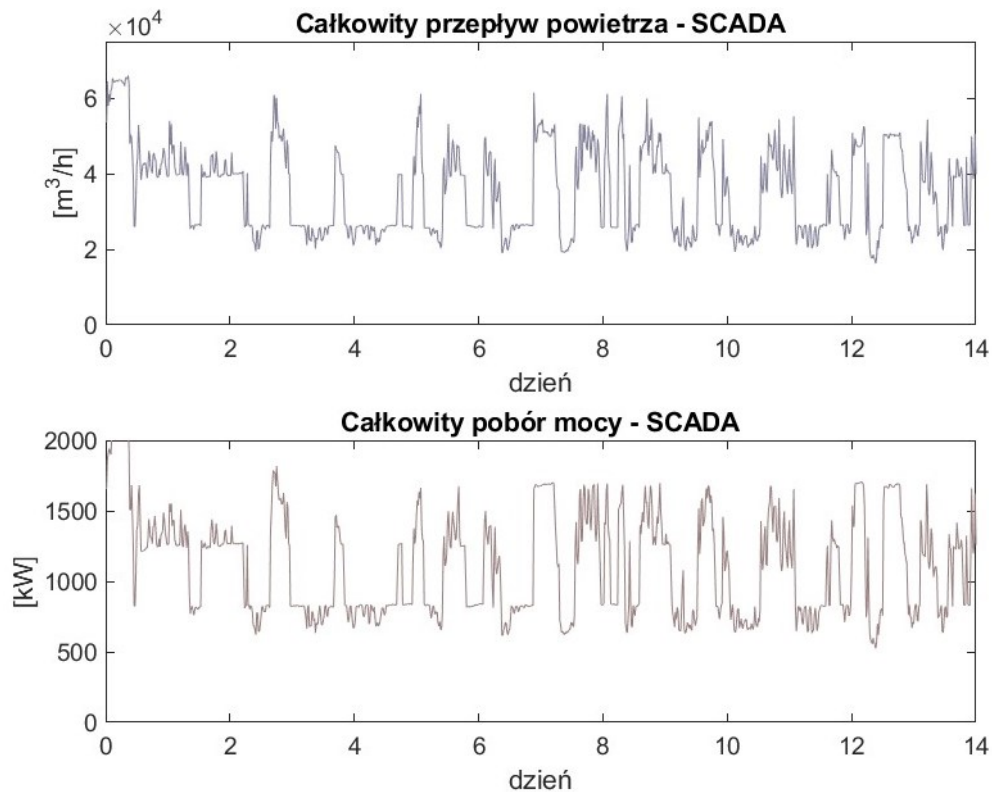
2. Model numeryczny dmuchaw

2.1. Opis danych numerycznych

Nadmuchem powietrza w każdej oczyszczalni sterują algorytmy, które dążą się do maksymalizacji efektywności skutkującej racjonalizacją zużycia energii elektrycznej.

Powstały liczne modele numeryczne, dzięki którym można badać te procesy bez konieczności modyfikacji sterowania prawdziwego obiektu.

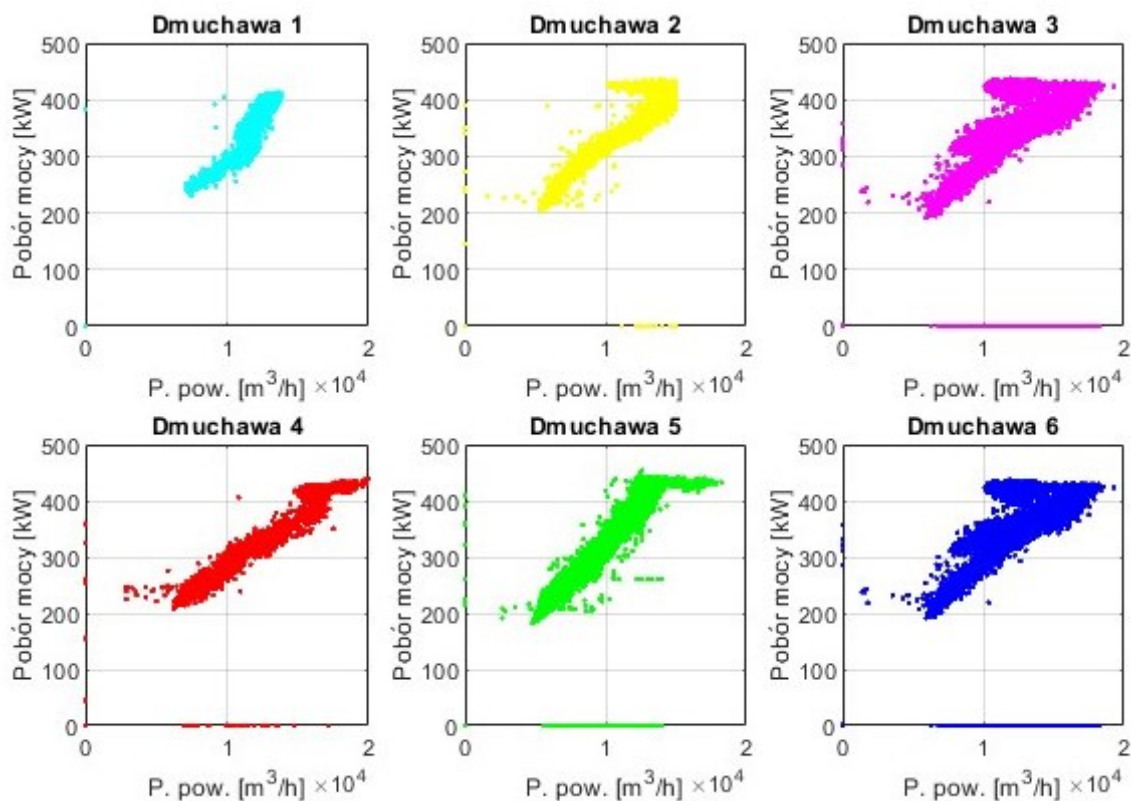
W rozprawie doktorskiej [4] opisano model numeryczny dmuchaw na podstawie dostępnych pomiarów SCADA, tj. chwilowe wartości poboru mocy i przepływu powietrza w odstępach godzinnych. Dane objęły wszystkie dmuchawy niezależnie, ale dla ostatniej (6) dmuchawy zebrano niewiele danych ze względu na jej sporadyczne użytkowanie. Założono zatem, że jej charakterystyka jest taka sama jak dmuchawa o podobnej specyfikacji (dmuchawa 3). Poniżej pokazano zbiorcze wartości poboru mocy i przepływu powietrza w przykładowym okresie 21 dni (rys. 4).



Rys. 4. Obserwacja dmuchaw – przepływ powietrza i pobór mocy (na bazie [4])

W dalszej pracy autorzy wykorzystali dostępne dane z okresu prawie roku. Wyświetlono zależność zużycia energii od przepływu w danym momencie dla całego roku pomiarów. Zaobserwowane zależność zużycia energii elektrycznej od przepływu przedstawiono na wykresie przedstawionym na rysunku 5. Można zauważyć, że charakterystyka każdej dmuchawy jest inna. Jakość chmury punktów różni się w zależności od konkretnej dmuchawy. Wynika to zapewne z faktu różnego rozmieszczenia dmuchaw w obiekcie i różnego ich zużycia.

Jest jednak wspólna cecha każdej dmuchawy. Wzrost oczekiwanego przepływu powietrza skutkuje większym poborem mocy w sposób liniowy. Chmury punktów posłużą do określenia liniowej charakterystyki przepływu powietrza w dmuchawie.



Rys. 5. Zmierzony pobór mocy dmuchawy dla różnych wartości oczekiwanego przepływu powietrza (P. pow.) – dane czyste (na bazie [4])

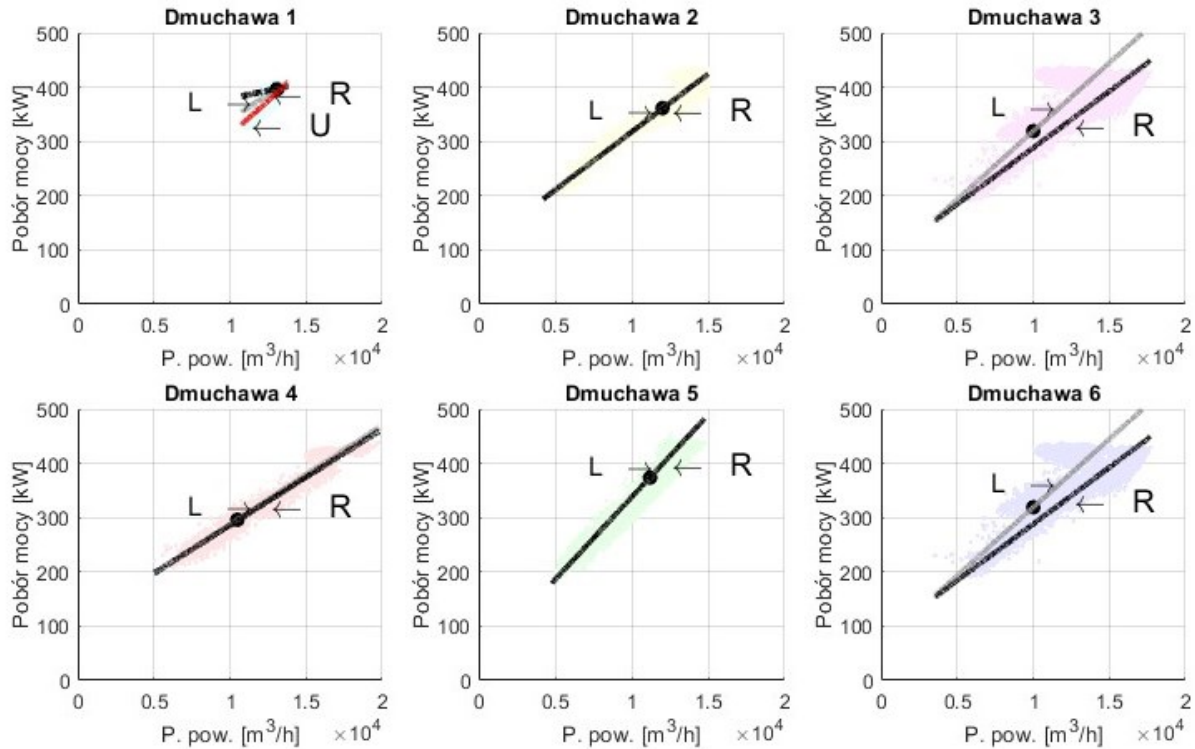
2.2. Analiza danych numerycznych

W niniejszej pracy przeprowadzono analizę numeryczną danych przedstawionych na powyższej chmurze punktów (rys. 5). W rozprawie doktorskiej [4] dokonano linearyzacji przepływu i zużycia na podstawie przybliżonych charakterystyk. W tej pracy autorzy opisali szczegółowo analizę numeryczną jakości tych pomiarów.

W pierwszej kolejności wykorzystano dwie metody usuwania pomiarów odstających. W pierwszej kolejności usunięto pomiary, w których występuje zero w przepływie lub mocy. Pomiary te wynikają z błędu odczytu czujnika przepływu i/lub miernika mocy dmuchawy. Następnie zaimplementowano algorytm detekcji obserwacji odstających. Wartości oddające na płaszczyźnie dwuwymiarowej policzono jako odległości Mahalanobisa [7]. Użyto rozkładu chi-kwadrat do ustalenia progu wykrywania wartości odstających. Proóg wyznaczono na 99%.

W celu wyznaczenia charakterystyki każdej dmuchawy przeprowadzono regresję chmur punktów. W pierwszej kolejności wykonano klasyczną regresję liniową. Następnie wykonano regresję typu robust w wersji bisquare, która minimalizuje ważoną sumę kwadratów, gdzie waga nadawana każdemu punktowi danych zależy od odległości punktu od dopasowanej linii [3]. Na rysunku 6 pokazano chmurę punktów po oczyszczeniu wraz z zaznaczonymi liniami regresji, które zobrazowano w postaci odcinków w granicach skrajnych punktów tych chmur. Rysunek 6. zawiera odcinki regresji liniowej (L) oraz regresji typu robust (R). Na rysunkach zaznaczono punkty będące średnimi chmurami punktów. Uzasadnia to fakt, dlaczego linia regresji liniowej

dmuchawy 1 odstaje od pomiarów – w górnej części chmury punktów jest nagromadzenie pomiarów. Dlatego przypadek dmuchawy 1 zastąpiono wartościami granicznymi dla obu symulacji (linia U na rysunku 6). Ostatecznie do dalszej analizy wybrano następujące przypadki – regresję liniową (L), regresję robust (R) i ręcznie dobraną wersję regresji liniowej (U).



Rys 6. Zmierzony pobór mocy dmuchawy dla różnych wartości oczekiwanego przepływu powietrza (P. pow.) – chmury punktów z zaznaczonymi liniami regresji

Wskaźnikiem, który pozwoli ocenić dopasowanie obu regresji do posiadanej chmury punktów jest współczynnik determinacji. Parametr ten policzono dla wszystkich omówionych powyżej regresji. Wyniki analizy przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Współczynnik determinacji R^2 dla poszczególnych dmuchaw
(dla dmuchawy 1 wprowadzono dwie charakterystyki – domyślną i dostrojoną)

Regresja	Dm. 1	Dm.2	Dm.3	Dm.4	Dm.5	Dm.6
liniowa	0.4887	0.9794	0.6869	0.9742	0.9697	0.6869
	-0.0891					
robust	0.2637	0.9792	0.5406	0.9729	0.9696	0.5406
	-0.0891					

Z przedstawionej powyżej analizy numerycznej wynika, że współczynnik determinacji R^2 różni się dla poszczególnych dmuchaw. Wynika to z faktu, że proste regresji są tylko przybliżeniem chmury punktów. Dopasowanie modelu jest tym lepsze, im wartość jest bliższa jedności. Dopasowanie dla dmuchaw 2, 4 i 5 jest bardzo bardzo dobre. Dopasowanie dla dmuchaw 3 i 6 jest znacznie gorsze. Ręczna zmiana regresji

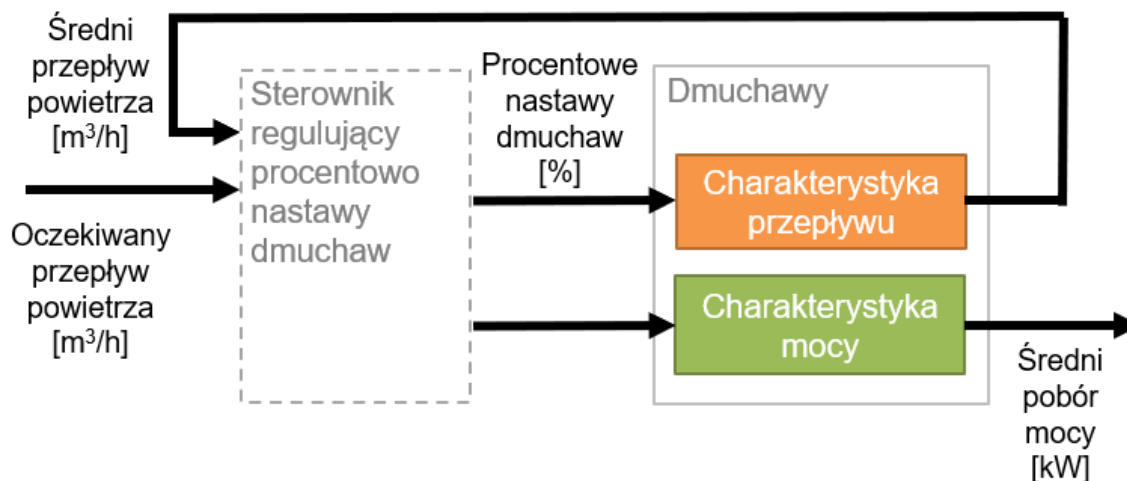
dmuchawy 1 okazała się całkowicie nieopłacalna – współczynnik determinacji R^2 pogorszył się do wartości ujemnej (co oznacza, że dostrojona linia regresji jest gorzej dopasowana do danych niż prosta pozioma linia reprezentująca średnią tych danych).

Powyższe krzywe wyznaczone numerycznie zostaną porównane dla autorskiego algorytmu sterowania dmuchawami.

3. Wykorzystanie charakterystyk dmuchaw w ich sterowaniu

W rozprawie doktorskiej [4] zbudowano w Matlab/Simulink wirtualny model dmuchawy oraz zaimplementowano powyższą metodę sterowania nimi.

Gdy przepływ powietrza w kolektorze jest niższy od oczekiwanego przepływu sterownik zwiększa wykorzystanie dmuchaw poprzez zwiększenie kąta łopatek dla najdłuższej działającej dmuchawy. Sterownik załącza kolejną dmuchawę jeśli wcześniej załączone dmuchawy pracują już na 100% kąta łopatek przez pewien czas. W przypadku uruchomienia nowej dmuchawy, sterownik wybiera pierwszą dmuchawę z kolejki oczekujących dmuchaw uporządkowanych według ich efektywność. Jest ona jednak ograniczona maksymalną liczbą czterech dmuchaw, które można załączyć. I odwrotnie, jeśli przepływ powietrza jest większy od oczekiwanego przepływu, sterownik zmniejsza kąt pochylenia łopatek. Dmuchawa pracująca przy minimalnym obciążeniu zostaje wyłączona, gdy suma wykorzystania dmuchaw nie przekroczy wydajności dmuchaw po wyłączeniu tej dmuchawy z pewnym czasem zwłoki. Podobnie ograniczeniem jest minimalna liczba włączonych dmuchaw. Na rysunku 7 pokazano schemat sterowania dmuchawami.



Rys. 7. Uproszczony schemat sterowania dmuchawami

Sterownik dmuchaw wykorzystuje omówione powyżej liniowe charakterystyki poszczególnych dmuchaw. Przy najniższej sprawności wynoszącej 0% każda dmuchawa generuje stały minimalny przepływ przy minimalnym poborze mocy – odpowiada to lewej stronie odcinka z rysunku 6. Natomiast 100% sprawności znamionowej oznacza osiągnięcie maksymalnej wydajności przy maksymalnej mocy - odpowiada to prawej stronie odcinka z rysunku 6. Pośrednie wartości zmieniają się liniowo zgodnie z charakterystykami wyznaczonymi na rysunku 6.

Zgodnie z powyższym opisem wybór krzywej dopasowania ma znaczenie. Przeprowadzono zatem symulacje pracy tak zamodelowanych dmuchaw o różnych charakterystykach w celu oszacowania energochłonności nadmuchu powietrza w trakcie procesu czyszczenia. Wyniki symulacji przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2

Średnie wartości przepływu powietrza i mocy w omawianych symulacjach

Regresja	Średni przepływ powietrza [m ³ /h]	Średni pobór mocy [kW]
liniowa	33 013	1001.76
liniowa poprawiona	33 013	998.13
robust	33 013	982.65
robust poprawiona	33 013	975.97

Wyraźnie widać, że pobór mocy zmienia się odpowiednio dla regresji liniowej i typu robust. Zmiana sposobu linearyzacji dmuchawy wpływa na szacowany średni pobór mocy, co ostatecznie wpływa na koszty eksploatacyjne. Te błędy wynikają czysto z numerycznych cech symulacji i nie powinny wystąpić.

4. Podsumowanie

W pierwszej kolejności omówiono kontekst badawczy i zaprezentowano analizę numeryczną chmury punktów. Na jej podstawie zaprezentowano dwie metody regresji – liniową i typu robust. Następnie wykorzystano je w istniejącym modelu dmuchaw. Fakt, że pobór mocy zmienia się w zależności od charakterystyki dmuchaw jest kwestią intuicyjnie uzasadnioną. W tej pracy postarano się to udowodnić.

W obu przypadkach autorzy musieli zastosować własne przybliżenie charakterystyki dmuchawy 1, ponieważ numeryczne rozwiązanie prowadzi do błędnej regresji. Z tego wynika fakt, że każda regresja jest tylko oszacowaniem pomiarów.

Linearyzacja chmury punktów jest ważnym zagadnieniem w analizie danych. Regresja liniowej dmuchaw ma znaczenie również w przytoczonej symulacji oczyszczalni ścieków. Charakterystyka ta ma bezpośredni wpływ na szacunek kluczowego parametru – poboru energii elektrycznej w trakcie tłoczenia powietrza.

LITERATURA

1. Biedrzycka A.: Utylizacja osadów ściekowych w: Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne; Maj – Czerwiec 2008.
2. Biedrzycka A.: Kierunek: pasywna oczyszczalnia Płaszów w: Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne; Listopad – Grudzień 2016.
3. Fox J., Weisberg S.: Robust Regression, 2013, Accessed: Aug. 28, 2024. [Online]. Available: <http://users.stat.umn.edu/~sandy/courses/8053/handouts/robust.pdf>
4. Król P.: The Optimization of Control in Industrial Facilities Considering Minimization of Energy Consumption 2022. Accessed: Aug. 28, 2024. [Online]. Available: https://www.eaiib.agh.edu.pl/wp-content/uploads/2022/12/Krol_Pawel-DISSERTATION-FINAL-3.pdf

5. Kudłacz T., Musiał-Malago M.: Funkcjonalne miasto w teorii i praktyce na przykładzie Krakowa i Krakowskiego Obszaru Metropolitarnego, no. 12. 2018. Accessed: Aug. 28, 2024. [Online]. Available: <https://wydawnictwo.uek.krakow.pl/images/pdf/kudlacz-musial-malago-funkcjonalne-miasto.pdf>.
6. Strona przedsiębiorstwa Wodociągi Krakowskie S.A. Accessed: May 25, 2024. [Online]. Available: <https://wodociagi.krakow.pl>
7. Wołyński W., Górecki T.: Analiza skupień 2013. Accessed: Aug. 29, 2024. [Online]. Available: https://wmi.amu.edu.pl/__data/assets/pdf_file/0024/216429/was_wyklad_6_marca_2013_prezentacja.pdf.