

„Woda 4,0” jako narzędzie służące do zwiększenia efektywności ekonomicznej, jak i ochrony Bałtyku

Robert Kijak, Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne (PNTTE) / Asset Management & Sustainability

Artur Dmowski, Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji (WSEI) w Lublinie / PNTTE

Spis treści

Streszczenie.....	1
1. Wstęp	1
2. Idea pojęcia Woda 4,0	2
3. Korzyści i bariery związane z wdrożeniem technologii Wody 4,0.....	3
4. Studia przypadku.....	5
5. Podsumowanie	24
Materiały źródłowe.....	25

Streszczenie

Podobnie jak w wielu innych krajach Unii Europejskiej obiekty przemysłowe w Polsce tylko w niewielkim stopniu odzwierciedlają postęp naukowo-techniczny związany z Czwartą Rewolucją Przemysłową i wizją „Przemysłu 4,0”, która powstała jeszcze na targach Hanover Messe na początku poprzedniej dekady.

W kontekście gospodarki wodnej (w tym gospodarki wodno-ściekowej) używany jest termin „Woda 4,0”, który uwzględnia całą gamę technologii, metod i narzędzi informatycznych. W tym artykule zasadniczo skupiono się na *digital twins*, zarządzaniu *big data* i analityce predykcyjnej na podstawie ciągłego i bezprzewodowego monitoringu urządzeń związanych z przesyłem i oczyszczaniem ścieków. Analityka predykcyjna może być wykorzystywana dla celów sterowania układem kanalizacyjnym lub obsługi predykcyjnej aktywów (utrzymania ruchu).

Większa implementacja technologii „Wody 4,0” miałyby szereg korzyści założonych na wstępie w niniejszym artykule (opierając się na dostępnych publikacjach), a później wykazanych i zilustrowanych na podstawie studiów przypadku z różnych krajów i wykorzystujących różne technologie, metody i narzędzia.

1. Wstęp

Podobnie jak w wielu innych krajach Unii Europejskiej (UE) obiekty przemysłowe w Polsce są często oparte jeszcze na technologiach z początku XXI wieku lub starszych, a zatem nie odzwierciedlają jeszcze postępu naukowo-technicznego związanego z Czwartą Rewolucją Przemysłową i wizją „Przemysłu 4,0”, która powstała na targach Hannover Messe na początku poprzedniej dekady. Przemysł 4,0 z reguły wykorzystuje *digital twins* („cyfrowe bliźniaki”), bezprzewodowe sondy zintegrowane z aktywami ¹, przemysłowy internet rzeczy, przetwarzanie danych w chmurze i analitykę predykcyjną coraz częściej z wykorzystaniem sztucznej inteligencji,

¹ „Aktywa” są definiowane w tym artykule zgodnie z PN-ISO 55000:2017-09. Aktywa materialne to np. maszyny, urządzenia, infrastruktura i flota.

tj. zautomatyzowanego „uczenia maszynowego”.

Dotychczasowy niski stopień implementacji technologii Przemysłu 4,0 w Polsce wiąże się po części z faktem, że wiele z zakładów przemysłowych zostało przeniesionych do Polski po akcesji naszego kraju do UE. Dotyczy to także powiązanych z nimi oczyszczalni (lub podczyszczalni) ścieków przemysłowych. O ile oczyszczalnie ścieków komunalnych w Polsce były zbudowane lub rozbudowane / zmodernizowane przez ostatnie 10-15 lat w dużej mierze ze środków UE to wiele oczyszczalni ścieków przemysłowych, jak i same obiekty przemysłowe które je wytwarzają są często ciągle w przededniu modernizacji. W przypadku odprowadzania i oczyszczania ścieków bytowych / komunalnych w Polsce stopień wykorzystania technologii ery Czwartej Rewolucji Przemysłowej jest często wyższy niż w samym przemyśle. (Przykłady ich wykorzystania są uwzględnione w rozdz. 4 – Studia przypadku.)

Największe zakłady przemysłowe w Polsce zwłaszcza w przemyśle energetycznym, chemicznym, petrochemicznym i rafineryjnym odprowadzają najczęściej swoje ścieki po oczyszczeniu tak aby spełnić standardy emisyjne, bezpośrednio do wód. Pozostałe zakłady zrzucają zazwyczaj ścieki do zbiorczej kanalizacji komunalnej po podczyszczeniu tak aby dostosować je do możliwości odbioru przez oczyszczalnie komunalne - zgodnie z *Rozporządzeniem Ministra Budownictwa w sprawie realizacji obowiązków dostawców ścieków przemysłowych oraz warunków wprowadzania ścieków do urządzeń kanalizacyjnych*. Mieszanina ścieków przemysłowych i ścieków bytowych po oczyszczeniu jest odprowadzana do wód.

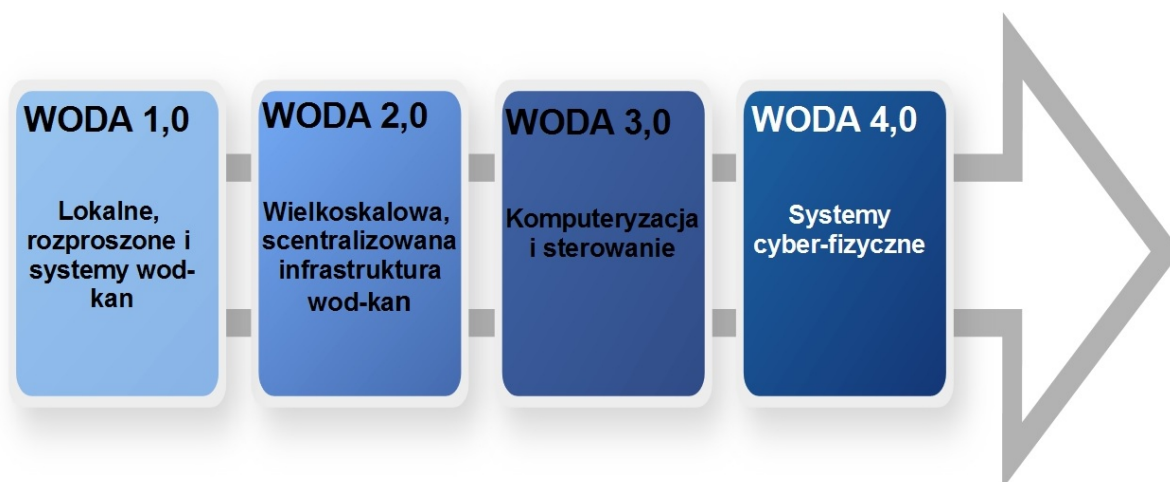
2. Idea pojęcia Woda 4,0

W kontekście gospodarki wodnej (w tym gospodarki wodno-ściekowej) używany jest termin „Woda 4,0”. (Inne nazwy „4,0” stosuje się w przypadku innych gałęzi przemysłu.) Rys. 2-1 przedstawia etapy rozwoju gospodarki wodno-ściekowej (wod-kan) od „Wody 1,0”, która miała miejsce jeszcze w czasach Cesarstwa Rzymskiego, jak zaproponował to Alabi et al. (2019). Kolejne etapy rozwoju, jak i sama Woda 4,0 mogą być nieco odmiennie definiowane w literaturze (np. Sedlak 2015²). Autorzy przyjęli tutaj dla celów niniejszego artykułu definicję etapów z publikacji Alabi et al. (2019), a uszczegółowioną definicję Wody 4,0 z tematycznej broszury German Water Partnership.

Zgodnie z definicją German Water Partnership, Woda 4,0 „*kładzie nacisk na cyfryzację i automatykę jako narzędzia efektywnego gospodarowania zasobami, elastycznej i konkurencyjnej gospodarki wodnej. W tym celu, Woda 4,0 uwzględnia te same główne charakterystyki i używane terminy jak rewolucja przemysłowa Przemysł 4,0, tzn.: połączenia sieciowe pomiędzy maszynami, procesami, systemami przechowywania danych i zasobami, inteligentne sieci, internet rzeczy oraz powiązane z nimi usługi, które stosuje się w systematyczny sposób w kontekście gospodarki wodnej.*

Wdrożenie Wody 4,0 opiera się na systemach cyber-fizycznych w celu zapewnienia optymalnych połączeń sieciowych z wykorzystaniem narzędzi informatycznych pomiędzy wirtualnymi i materialnymi obiektami gospodarki wodnej na etapie ich planowania, budowy i eksploatacji ...”.

2 Sedlak (2015) skupił się, po części, definiując Wodę 4,0 na wadach współczesnych scentralizowanych systemów gospodarki wod-kan w tym recyklingu wody, odsalania wody morskiej i efektywności wykorzystania wody, promując zdecentralizowane systemy i obiegi zamknięte jako integralną część Wody 4,0.



Rys. 2-1: Etapy rozwoju infrastruktury wod-kan (Źródło: na podstawie Alabi et al. 2019)

Natomiast w kontekście eksploatacji, obsługi czy utrzymania ruchu stosuje się termin Eksploatacja 4,0 i terminy powiązane, np. Niezawodność 4,0 i Jakość 4,0. Podobnie jak w przypadku Wody 4,0, jej główne charakterystyki i używane terminy pochodzą także z Przemysłu 4,0 (np. Almagor 2019). Terminy spotykane w publikacjach branżowych zostały przedstawione na rys. 2-2.



Rys. 2-2: Zależność pomiędzy gałęziami przemysłu 4,0 a procesami inżynierskimi i biznesowymi 4,0 (Źródło: opracowanie własne autorów)

3. Korzyści i bariery związane z wdrożeniem technologii Wody 4,0

Zastosowanie technologii Wody 4,0 może wydłużyć życie, jak i poprawić wydajność oczyszczalni ścieków, a zatem i jakość ścieków oczyszczonych. Podobnie jak w przypadku samych obiektów przemysłowych obsługiwanych przez oczyszczalnie jest możliwe stopniowe wdrażanie technologii Czwartej Rewolucji Przemysłowej (np. Greenfield 2020) co zwiększa efektywność ekonomiczną. Pomimo, że istnieje cała gama technologii, metod i narzędzi w tym artykule

zasadniczo skupiono się na *digital twins*, zarządzaniu *big data* i analityce predykcijnej na podstawie ciągłego i bezprzewodowego monitoringu urządzeń (aktywów) układu kanalizacyjnego ³. Analityka predykcijna może być wykorzystywana głównie dla celów:

- sterowania układem kanalizacyjnym, lub
- obsługi predykcijnej (utrzymania ruchu).

Niezależnie od tego zatem czy same obiekty przemysłowe będą modernizowane do standardu Przemysłu 4,0 czy nie, korzyści modernizacji samych oczyszczalni / podczyszczalni ścieków przemysłowych, a także komunalnego układu kanalizacyjnego odbierającego ścieki przemysłowe, można podsumować w następujący sposób: (1) racjonalność gospodarowania środkami i wykorzystania środków odtworzeniowych (*CapEx*), (2) efektywność ekonomiczna (niższy *OpEx*, jak i *TotEx* ⁴), (3) możliwość planowania obsługi / konserwacji i zwiększenie bezpieczeństwa (BHP), jak i (4) korzyści środowiskowe (tj. zapewnienie jakości ścieków oczyszczonych) w tym ochrona Bałtyku przed zanieczyszczeniem.

Jak wspomniano na wstępie, największe korzyści związane z wdrożeniem technologii ery Czwartej Rewolucji Przemysłowej mogą zostać uzyskane przez zakłady przemysłowe odprowadzające oczyszczone ścieki bezpośrednio do wód, zwłaszcza w tych zakładach, w których stan techniczny urządzeń wod-kan pozostawia jeszcze wiele do życzenia. Korzyści będą oczywiście jeszcze większe, gdy wdrożenie technologii Wody 4,0 zostanie połączone z rehabilitacją infrastruktury wod-kan.

Korzyści wdrożenia ciągłej obsługi predykcijnej

Samo wdrożenie ciągłej obsługi predykcijnej daje już wiele korzyści (dla jakiegokolwiek zakładu przemysłowego) w porównaniu do obsługi nieplanowanej i usuwania nieprzewidzianych awarii (np. SKF 2020).

W przypadku obsługi predykcijnej aktywów korzystne może być stopniowe wdrożenie technologii, które zazwyczaj rozpoczyna się od połączenia istniejących urządzeń i umożliwienie im komunikowania się poprzez internet, tak aby można je zdalnie monitorować (Greenfield 2020). Wykorzystywane są bezprzewodowe czujniki (sondy), które pozwalają na ciągłe zbieranie danych (ibid). Kolejnym krokiem mogą być zdalne pomiary wibroakustyczne („wibrodiagnostyka”), temperatury lub zużycia energii, które potwierdzą stan techniczny urządzeń, a w razie konieczności pozwolą na zaplanowanie obsługi. Zapobiegnie to w przyszłości awarii, tj. nieplanowanej obsłudze, a zatem ewentualnym zrzutom ścieków nieoczyszczonych lub niespełniających standardów emisyjnych (ibid).

W tym celu wykorzystuje się najczęściej akcelerometry, które wykonują ciągły pomiar charakterystyki drganiowej urządzeń / maszyn wirnikowych (np. pomp) zakładając, że procesy dynamiczne wewnątrz urządzenia odzwierciedlają jego stan techniczny (ibid). Aby wdrożenie zakończyło się sukcesem konieczne jest zainstalowanie odpowiedniego sprzętu pomiarowego, a jego wybór powinien odbyć się w procesie oddolnym (*bottom-up*) z udziałem Eksploatacji (Grievson 2018). Dane gromadzone w chmurze są analizowane przez predykcyjne narzędzia informatyczne, które są nadzorowane przez doświadczonych operatorów i/lub docelowo przez sztuczną inteligencję (uczenie maszynowe). Operator jest nie tylko powiadamiany o zbliżającej się awarii, ale mogą być też szacowane wartości mierników niezawodności takich jak „średni czas do wystąpienia awarii” (*mean-time-to-failure, MTTF*), a w przypadku zastosowania uczenia maszynowego może także zostać przeprowadzana zautomatyzowana „analiza przyczyn źródłowych” (*root cause analysis, RCA*), tak aby zapobiec takim awariom w przyszłości (SKF 2020).

³ Dla potrzeb niniejszego artykułu, „układ kanalizacyjny” został zdefiniowany jako sieć kanalizacyjna wraz z oczyszczalnią.

⁴ „TotEx” (*Total Expenditure*) to suma *CapEx* (*Capital Expenditure*) i *OpEx* (*Operational Expenditure*) w zdefiniowanym okresie (*ISO/TS 55010:2019*).

Jedną z barier związanych z dotychczasowym niskim poziomem zastosowania technologii Czwartej Rewolucji Industrialnej w kraju jest ogólnie dość niski poziom inwestycji ukierunkowanych na wdrażanie innowacyjnych rozwiązań, a także ogólnie niski poziom zainteresowania współczesnymi metodami zarządzania aktywami materialnymi i inżynierią niezawodności w tym diagnostyką / obsługą predykcyjną. Upowszechnienie stosowania metodyki ToTex zgodnie z *ISO/TS 55010:2019* w szacunkach kosztów i korzyści (np. dla celów *business case*) wpłynęłoby zapewne na zmianę tej niekorzystnej sytuacji.

Warto też zwrócić uwagę, że Polska jest krajem, któremu grozi deficyt wody, zwłaszcza, że prawie 1/3 rzek w Polsce posiada wody pozaklasowe z 60% wskaźnikiem skażenia (wodkany.pl). Deficyt będzie się pogłębiał wraz ze zmianami klimatu. Woda 4,0 poprzez poprawę efektywności wykorzystania wody procesowej i oczyszczania ścieków przemysłowych (w tym stopnia odzysku wody) może także zmniejszyć ślad węglowy i wodny, a z pewnością poprawić naszą odporność na zmiany klimatu.

4. Studia przypadku

Poniżej zaprezentowano szereg tematycznych studiów przypadku pochodzących z różnych krajów (w tym Polski), które są powiązane z tematyką Wody 4,0 w kontekście zarządzania ściekami przemysłowymi.

Przedstawione studia przypadku dotyczą **(1) optymalizacji efektywności / wydajności oczyszczalni komunalnych i powiązanych z nimi sieci kanalizacyjnych**, które otrzymują ścieki przemysłowe. Optymalizacja zmniejsza liczbę przelewów burzowych / bypassów oczyszczalni, a zarazem stanowi „ochronę” oczyszczalni (przed nadmiernym natężeniem przepływu i ładunkiem zanieczyszczeń) i zapewnia niezmienną jakość ścieków oczyszczonych. Zmniejsza to oddziaływanie ścieków przemysłowych i substancji w nich zawartych na wody odbiornika. Przedstawiono także studia przypadku dotyczące **(2) identyfikacji źródeł ścieków przemysłowych odprowadzanych niezgodnie z przepisami do kanalizacji**. Te same technologie, metody czy narzędzia informatyczne mogą jednak zostać zastosowane do dużych oczyszczalni przemysłowych i ich sieci kanalizacyjnych, zwłaszcza w przemyśle energetycznym, chemicznym, petrochemicznym i rafineryjnym, które otrzymują z wewnętrznych bloków i wydziałów często ścieki niejednorodne, a których źródła są trudne do identyfikacji.

Kolejne studia przypadku dotyczą **(3) obsługi predykcyjnej (utrzymania ruchu), której celem jest identyfikacja uszkodzeń systemów pompowych stosowanych w gospodarce wod-kan** w celu zapobieżenia awariom, które mogą powodować przelewy / bypassy i zrzuty ścieków nieoczyszczonych do wód.

Zaprezentowane w tym rozdziale trzy rodzaje studiów przypadku (jw.) bazowane są na informacjach pochodzących z publikacji dostawców technologii, metod i narzędzi lub otrzymanych w czasie osobistej komunikacji autorów z dostawcami. Nie wszystkie szczegóły studiów przypadku, jak i samej technologii są zatem dostępne autorom tego artykułu. Niemniej jednak wydaje się, że wykazują one podstawowe korzyści płynące z wdrożenia analityki predykcyjnej Wody 4,0 (i Eksploatacji 4,0) omawiane wcześniej w rozdz. 3. Ponadto wydaje się, że pod względem technologicznym zaprezentowane studia przypadku mogą zostać pogrupowane w następujący sposób:

1. *Digital twins*, sondy połączone systemem SCADA ⁵, „analityka hybrydowa” ⁶ dla celów

⁵ SCADA znaczy: *Supervisory control and data acquisition*

⁶ Dla celów tego artykułu, „analityką hybrydową” nazywane jest analizowanie danych historycznych i danych

- optymalizacji procesów sterowania
2. *Digital twins*, sondy połączone systemem SCADA, analityka predykcyjna dla celów optymalizacji procesów sterowania
 3. Sondy *online* (internet rzeczy), „analityka hybrydowa” w chmurze dla celów utrzymania ruchu
 4. Sondy *online* (internet rzeczy), analityka predykcyjna w chmurze dla celów identyfikacji źródeł zrzutów ścieków przemysłowych do sieci kanalizacyjnej.

DIGITAL TWINS, SONDY POŁĄCZONE SYSTEMEM SCADA, „ANALITYKA HYBRYDOWA” DLA CELÓW OPTYMALIZACJI PROCESÓW STEROWANIA

1.	Danish Hydraulic Institute - DHI (Dania)
	Opis technologii, metody i narzędzi informatycznych
	<p>Cyfrowe narzędzia informatyczne, które stosują się do procesów oczyszczania ścieków (DHI), ale także z zastosowaniem, na przykład, do dystrybucyjnych sieci wodociągowych, sieci kanalizacyjnych i rzek (DHI b, DHI c i DHI g) to:</p> <p>WEST - modelowanie (<i>digital twins</i>), symulacja and ocena procesów fizycznych, biologicznych i/lub chemicznych (DHI i DHI c)</p> <p>DIMS.CORE - centralny magazyn danych w celu zastosowania indywidualnie zaprojektowanych rozwiązań w czasie rzeczywistym: monitoringu, przekazywania raportów i sterowania. Przetwarza dane w informację. Udostępnia dane / informację do globalnych użytkowników poprzez zindywidualizowane raporty (DHI i DHI b).</p> <p>MIKE OPERATIONS - zarządzanie danymi w czasie rzeczywistym w tym raporty zgodności wraz z danymi ją potwierdzającymi. Modelowanie <i>online</i> w celu prognozowania i sterowania (DHI i DHI g).</p> <p>Poniższe studia przypadków skupiają się na WEST i DIMS.CORE.</p>
	Wybrane studia przypadku (cel, metoda, wynik)
	<p>DIMS.CORE</p> <p><u>Przedsiębiorstwo wod-kan w Aarhus (Dania) (DHI b):</u></p> <p>Celem było obniżenie kosztów eksploatacyjnych (OpEx) przedsiębiorstwa wod-kan, które jest operatorem oczyszczalni ścieków o łącznej przepustowości 500.000 równoważnej liczby mieszkańców (RLM). Wzrost liczby mieszkańców wiązał się koniecznością oczyszczania dodatkowej ilości ścieków. Mogło to zostać zrealizowane poprzez nową infrastrukturę (co natomiast wiązało się z nakładami inwestycyjnymi - CapEx) lub optymalizację istniejących procesów.</p> <p>W czasie optymalizacji zostały zainstalowane sondy dla kluczowych parametrów chemicznych, które przesyłały dane do DIMS.CORE w celu uzyskania wymaganych informacji operacyjnych i poprawienia efektywności procesów, jak i jakości ścieków oczyszczonych. Równolegle zmniejszone zostało zużycie energii i poprawiona została efektywność wykorzystania odczynników chemicznych.</p> <p>OpEx został zmniejszony o 250.000 EUR / rok, a jednocześnie zmniejszone zostały opłaty za korzystanie ze środowiska o 150.000 EUR / rok.</p>

uzyskiwanych w czasie rzeczywistym, ale może uwzględniać formę predykcji wykonanej przez narzędzia informatyczne i / lub operatora na podstawie wykonanej analizy w/w danych.

Oczyszczalnia Ścieków (OŚ) Suwałki (Polska) (DHI f)

System DIMS.CORE został zastosowany w Polsce w oczyszczalni w Suwałkach jako element systemu optymalizacji usuwania azotu ze ścieków. System steruje pracą ciągu reaktorów biologicznych, osadników wtórnych oraz zbiornikiem odcieków. Ponadto przetwarza, gromadzi i przechowuje dane w bazie danych. Informacje te stanowią dane wejściowe dla algorytmów sterujących pracą obiektu.

Wyniki wygenerowane za pomocą systemu mogą być wykorzystywane do fizycznego sterowania urządzeniami (np. otwarcie zaworu w przypadku niewystarczającego stężenia tlenu w reaktorze), jak również wyniki takie mogą zostać wyświetlone operatorowi w formie ostrzeżenia / monitu (np. ilość nadmiernego osadu czynnego w systemie). Oprócz poprawy wyników technologicznych uzyskiwanych dzięki inteligentnemu sterowaniu, DIMS.CORE ma wkład w poprawę bilansu energetycznego systemu (np. wyłączanie zbędnych dmuchaw gdy występują tylko niewielkie stężenia azotu amonowego).

WEST

Władze samorządowe Lüleburgaz, Kirklareli i MASS Construction Co., Kocaeli (Turcja) (DHI d)

Cele projektu były następujące: zweryfikowanie projektu oczyszczalni wraz ze zwiększeniem niezawodności, zgodność z standardami emisyjnymi związanymi ze zrzutem ścieków oczyszczonych oraz zmniejszenie CapEx.

Zostały opracowane modele procesowe zarówno stacjonarne, jak i dynamiczne w oparciu o dane z systemu SCADA. Pozwoliło to na ocenę i optymalizację wszystkich parametrów procesowych zgodnie z celami projektu.

Zakład Odzysku Zasobów Wodnych w West Lafayette, stan Indiana (Stany Zjednoczone) (DHI e):

Celem było zmniejszenie śladu węglowego o 50% do 2025 przy jednoczesnej poprawie jakości ścieków oczyszczonych. Była dopuszczalna tylko niewielka przebudowa infrastruktury.

Modelowanie procesów oczyszczalni odbyło się z wykorzystaniem WEST co umożliwiło testowanie w czasie rzeczywistym i w środowisku wirtualnym różnych strategii sterowania napowietrzaniem. Równoległa optymalizacja komór fermentacyjnych zidentyfikowała potencjał podwojenia odzysku energii z biogazu.

W wyniku modelowania uzyskano lepszą jakość ścieków oczyszczonych. Oczyszczalnia stała się też w 60% neutralna energetycznie. Koszty eksploatacyjne (OpEx) obniżono o 293.000 USD.

2.

Endress+Hauser – E+H (Niemcy)

Opis technologii, metody i narzędzi informatycznych

Celem systemu Liquiline Control CDC81 (układ nadrzędny) jest osiągnięcie zadanych wartości związków azotu oraz fosforu przy jak najniższym: (1) zużyciu energii elektrycznej, i (2) dozowaniu odczynników chemicznych (E+H 2020).

Celem predykcyjnego systemu sterowania Liquiline Control jest też zautomatyzowanie procesu w celu szybkiej reakcji na: (1) błędne wskazania wartości mierzonych, jak i (2) awarie urządzeń, np. dmuchaw (zdalna diagnostyka) (ibid).

System wykorzystuje algorytmy predykcyjne wypracowane na modelu matematycznym (np. E+H i

E+H 2020). Z kilkugodzinnym wyprzedzeniem, na podstawie analizy napływu do reaktorów biologicznych, system dobiera nastawy urządzeń wykonawczych w celu optymalizacji warunków do zredukowania zanieczyszczeń (E+H).

Dzięki ciągłym pomiarom i sprawdzaniu jakości sygnału, Liquiline Control ma zapewnić stabilną pracę oczyszczalni i odpowiednie parametry ścieków oczyszczonych (E+H 2020). W przypadku błędnych wskazań lub awarii system ustawia daną pętlę sterowania w stan awaryjny i generuje komunikat błędu lub ostrzeżenia (ibid).

Wykorzystując sieci obiektowe lub technologie bezprzewodowe, Liquiline Control przesyła dane pomiarowe do centralnej dyspozytorni w celu monitorowania procesu i ewentualnej zmiany parametrów algorytmu sterowania (ibid). System wykorzystuje też mobilny komunikator umożliwiający zdalny dostęp (ibid), patrz rys. 4-1. Monitorowanie procesu za pośrednictwem sieci VPN jest uważane przez użytkowników jako bezpieczne, a także jako szybkie i proste (ibid).



Rys. 4-1: Zdjęcie ekranu mobilnego komunikatora (E+H)

Wybrane studia przypadku (cel, metoda, wynik)

Zakład Gospodarki Wodno-Kanalizacyjnej, Tomaszów Mazowiecki (Polska) (E+H 2020)

W oczyszczalni w Tomaszowie Mazowieckim system Liquiline Control ma zapewnić pełną automatyzację procesów od przepompowni ścieków surowych i stacji zlewnej z wozów asenizacyjnych do oczyszczalni ścieków. Algorytmy sterowania kierują procesami mechanicznego oczyszczania ścieków, pracą piaskownika, układem odprowadzania tłuszczu, pracą osadników wstępnych, zagęszczaczy osadu, osadników wtórnych i pracą reaktorów biologicznych.

System współpracuje z urządzeniami pomiarowymi i urządzeniami wykonawczymi oczyszczalni. Ma za zadanie analizować w trybie *online* dane pomiarowe, oblicza nastawy podległych urządzeń wykonawczych.

Algorytm pracy w czasie rzeczywistym analizuje parametry ścieków napływających (surowych) i na tej podstawie dobiera nastawy urządzeń wykonawczych w celu stworzenia warunków do optymalnego zredukowania zanieczyszczeń.

Parametry pracy / nastawy są podstawą do automatycznego prowadzenia procesu nityfikacji /

denitryfikacji. Wyznaczane są parametry pracy reaktora biologicznego takie jak czas trwania oraz intensywność napowietrzania, a także czas trwania warunków beztlenowych.

Algorytm systemu działa w czasie rzeczywistym i współpracuje z systemem SCADA. Monitoruje obciążenia ładunkiem zanieczyszczeń i w sposób predykcyjny zapewnia standardy emisyjne dla ścieków oczyszczonych.

Kluczową rolę w konfiguracji systemu / układu nadrzędnego do prowadzenia procesu nitrifikacji / denitryfikacji pełnią wytyczne definiowane przez operatora (w tym wypadku technologa). Wyznacza on obszar sterowania dla układu nadrzędnego. Określa zakresy zmienności dla poszczególnych parametrów. Definiuje on także wymagane parametry ścieków oczyszczonych na wylocie z reaktora i parametry prowadzenia procesu technologicznego. Układ nadrzędny zapewnia natomiast, że proces oczyszczania przebiega w sposób optymalny.

Wszelkie anomalie w działaniu sond pomiarowych i układów wykonawczych są monitorowane w czasie rzeczywistym. W ewentualnej sytuacji awaryjnej system może automatycznie podejmować zdefiniowane wcześniej działania, ale ostateczna decyzja pozostawiona jest operatorowi.

Automatyzacja procesu napowietrzania pozwala na redukcję kosztów eksploatacyjnych (OpEx). Jedną z głównych korzyści systemu jest zmniejszenie kosztów energii elektrycznej.

OŚ Stadtlahn (Niemcy)

OŚ Stadtlahn ma przepustowość ~21.000 RLM, przy czym 15 % stanowią ścieki przemysłowe. Dwa cyklicznie pracujące reaktory działają w sposób sekwencyjny (kaskada). System Liquiline Control steruje procesami usuwania azotu, jak i strącania fosfatów (np. E+H 2018 lub E+H 2018 b).

W kwestii usuwania azotu to operator wymagał: (1) zautomatyzowania procesu, jak i (2) zapewnienia zgodności z standardami emisyjnymi dla azotu ogólnego, tj. poniżej 8 lub 12 mg/l (w zależności od pory roku) (E+H 2018). System powinien także móc funkcjonować jak osadniki wtórne zostaną przełączone z pracy równoległej do sekwencyjnej (ibid). W każdym reaktorze została zainstalowana sonda tlenu i jonowo-selektywna sonda amonu i azotanów (ibid).

System Liquiline Control steruje napowietrzaniem w każdym reaktorze oddzielnie w zależności od ładunku (ibid). Na podstawie pomierzonej wartości, system konfiguruje dynamiczny nastaw dla tlenu, tak że podawana jest tylko dokładna ilość powietrza, która jest wymagana do usunięcia jonu amonowego (ibid). Powinno to zapewnić stabilność procesu przy jednoczesnym zmniejszeniu zużycia energii przez dmuchawy (ibid). Ponadto, system ustawia dynamicznie czas trwania faz nitrifikacji i denitryfikacji co może zwiększyć efektywność usuwania azotu ogólnego (tj. stałe stężenie azotu ogólnego na wylocie z oczyszczalni) (ibid).

System steruje chemicznym strącaniem fosforu (fosfatów) (E+H 2018b). Zapewnia to: (1) odpowiednie dozowanie odczynników strącających do osadnika wtórnego w zależności od aktualnego stężenia fosfatów w ściekach, i (2) takie same stężenie fosfatów na wylocie tylko 0,5 - 0,6 mg/l (prawnie wymagany standard emisyjny to 1,0 mg/l) oraz optymalizację dozowania odczynnika strącającego (ibid). (System może zapewnić też zgodność z bardziej wymagającą normą 0,3 mg/l, która jest przewidywana w przyszłości (ibid).)

Zgodnie z wymaganiami operatora, pomiary fosfatów są prowadzone w trzech punktach pobierania próbek, które są analizowane co 10 minut przez całkowicie zautomatyzowany analizator (ibid). System bierze pod uwagę pomierzoną wartość na wlocie do reaktora biologicznego w celu adaptacji do napływającego ładunku poprzez balansowanie okresów maksymalnego i niskiego ładunku (ibid). W oparciu o wartość pomierzoną na wylocie z reaktora, Liquiline Control dostosowuje odpowiednią dawkę odczynnika chemicznego co zwiększa efektywność strącania (ibid). Na wylocie z oczyszczalni następuje ostateczne sprawdzenie zgodności ze standardami emisyjnymi (ibid).

**DIGITAL TWINS, SONDY POŁĄCZONE SYSTEMEM SCADA, ANALITYKA PREDYKCYJNA
DLA CELÓW OPTIMALIZACJI PROCESÓW STEROWANIA**

3.

Xylem (Stany Zjednoczone)

Opis technologii, metody i narzędzi informatycznych

Poniższy opis i studia przypadku stosuje się do metody / narzędzia BLU-X firmy Xylem. BLU-X ma trzy główne zastosowania: jakość wody pitnej, zlewnie komunalnych oczyszczalni ścieków i *decision intelligence* (Xylem). W tym artykule skupiono się na dwóch ostatnich zastosowaniach.

Xylem nazywa swoją metodykę jako wywiad związany z podejmowaniem decyzji (*decision intelligence*). Metoda jest oparta na *big data*, a jej celem jest doskonalenie podejmowanych decyzji i przedstawianie zaleceń dotyczących zarówno eksploatacji, jak i planowania nowej infrastruktury (aktywów) (Xylem).

BLU-X oparty jest o zaawansowaną analitykę umożliwiającą przedsiębiorstwu wod-kan / operatorowi podejmowanie optymalnej decyzji, na przykład w celu zapewnienia odporności na zmiany klimatu, jak i pod względem optymalizacji kosztów (ibid). Zrozumienie jak czynniki zewnętrzne (np. pogodowe) oddziałują na parametry pracy i analizując w czasie rzeczywistym ogromną liczbę scenariuszy, pozwala przedsiębiorstwu zarządzać niepewnościami / ryzykami związanymi z planowaniem aktywów i zapewnić efektywność kosztową (ibid).

Zlewnie komunalnych oczyszczalni ścieków (Xylem)

- *Digital twins* układu kanalizacyjnego w czasie rzeczywistym, który optymalizuje, steruje and koordynuje wszystkie aktywa układu. Identyfikuje on wszelkie potencjalne uszkodzenia i awarie dla krytycznych aktywów z wykorzystaniem danych narzędzi diagnostycznych i uczenia maszynowego.
- Inteligentne systemy pompowe przekazują informację w czasie rzeczywistym i przez co mogą być pomocne w utrzymaniu niezawodności.
- Zgodnie z informacją Xylem, *digital twins* mogą być pomocne w optymalizacji procesu, zmniejszeniu zużycia energii i zapewnieniu stabilności procesu, przepustowości i jakości ścieków oczyszczonych.
- Jeśli nastąpiła integracja ze sterowaniem układem kanalizacyjnym w czasie rzeczywistym, *digital twins* może optymalizować wolumen ścieków dopływających do oczyszczalni.

Decision intelligence (Xylem)

Funkcjonalność ta umożliwia integrację danych oraz możliwości analityczne i wizualizacyjne tak aby umożliwić operatorowi (przedsiębiorstwu wod-kan): (1) sterowanie inteligentnym systemem, który został zainstalowany, jak i (2) wykorzystanie zebranych *big data*.

Wybrane studia przypadku (cel, metoda, wynik)

Miasto South Bend, stan Indiana (Stany Zjednoczone) (Xylem i Xylem 2019 c)

Celem było uniknięcie potencjalnych kosztów rzędu 1 mld USD związanych z wymaganiami prawnymi dot. ograniczenia częstych przelewów burzowych z kanalizacji ogólnospławnej Miasta wraz ze ściekami przemysłowymi.

Miasto South Bend wdrożyło inteligentne narzędzie dla kanalizacji BLU-X Intelligent Sewer w oparciu o bezprzewodowe sondy połączone systemem SCADA i uczenie maszynowe (sztuczną inteligencję) w celu wsparcia decyzji i sterowania procesem.

Zrzuty ścieków przemysłowych przez układ kanalizacyjny do rzeki Saint Joseph River były kluczową kwestią w związku z przemysłem ciężkim, który w przeszłości istniał w mieście (np. Singer Sewing Company). Ostatnio region ponownie przyciągał nowe zakłady przemysłowe i stał się centrum technologicznym (strefą przemysłową).

Miasto wdrożyło narzędzie Xylem dla zlewni oczyszczalni ścieków w celu zmniejszenia przelewów burzowych (4-8 miliony m³ rocznie) i celu optymalizacji istniejącej kanalizacji ogólnospławnej.

Początkowo zainstalowano i wdrożono monitoring w czasie rzeczywistym w oparciu o 120 sond zlokalizowanych w zlewni komunalnej oczyszczalni ścieków Miasta. Po gruntownej analizie danych w 2012 wspólnie przez Miasto i Xylem, wdrożono system wsparcia decyzji w czasie rzeczywistym (*real time decision support system, RT-DSS*) w oparciu o BLU-X. Uwzględniał on sondy, jak i siłowniki zaworów, co pozwala „handlować” dostępną pojemnością kanalizacji (tak jak na giełdzie), tak aby uniknąć wylewania ścieków.

BLU-X RT-DSS przekazuje informacje: do operatorów na ekrany SCADA, do pracowników w terenie na smartfony i tablety, przez portale internetowe do pracowników inżynierskich Miasta. (Operatorzy mogą w każdej chwili przejąć kontrolę nad systemem.)

W rezultacie Miasto zmniejszyło przelewy burzowe z kanalizacji ogólnospławnej o ponad 70% i stężenia bakterii E. Coli w rzece Saint Joseph River o 50%. Z tego powodu koszty zapewnienia zgodności zostały ograniczone o ponad 500 milionów USD.

Komunalna oczyszczalnia ścieków w Cuxhaven (Niemcy) (Xylem i Xylem 2019 b)

Duża oczyszczalnia w Cuxhaven, której operatorem była firma EWE WASSER GmbH („EWE”) zamierzała ograniczyć zużycie energii.

Z wykorzystaniem narzędzia BLU-X Treatment dla oczyszczalni, wdrożono strategię optymalizacyjną z modelami zbudowanymi o sztuczne sieci neuronowe dla procesów usuwania węgla, azotu i fosforu oraz dane z istniejącego systemu SCADA oczyszczalni. Modele przewidziały optymalne nastawy w celu sterowania pracą aeratorów w pięciu równoległych reaktorach biologicznych.

BLU-X pozwolił na zbudowanie *digital twins* działającego w czasie rzeczywistym dla całej oczyszczalni, tak, że każdy proces otrzymywał optymalne napowietrzanie i dozowanie odczynników chemicznych na podstawie BZT / ChZT.

Ponieważ EWE nie miał zainstalowanych sond *online*, które mogłyby mierzyć w czasie rzeczywistym stężenia napływających ścieków, zaprojektowano „sondy wirtualne” w celu oszacowania napływających ładunków węgla, azotu i fosforu. Sondy wirtualne były pomocne, tak aby EWE mógł efektywnie prowadzić proces napowietrzania i zapewnić zgodność z wymaganiami formalno-prawnymi.

W efekcie końcowym nastąpiło zmniejszenie energii zużywanej na napowietrzanie o 26%, co odpowiada ok. 1,1 mln kWh rocznie, bez zagrożenia wymaganych prawnie standardów emisyjnych dla ścieków oczyszczonych.

4.

Royal HaskoningDHV - RHDHV (Holandia)

Opis technologii, metody i narzędzi informatycznych

„Wirtualny operator” Aquasuite

Zgodnie z dostępną informacją, wirtualny operator jest narzędziem opartym na sztucznej inteligencji (automatycznym uczeniu maszynowym), które zostało zaprojektowane dla przedsiębiorstw wod-kan i różnych gałęzi przemysłu (RHDHV 2020). Wykonuje ono predykcje (sterowanie predykcyjne) w

oparciu o dane historyczne i informacje zewnętrzne, a następnie automatyzuje czynności powtarzalne w czasie rzeczywistym (monitoring i sterowanie) (ibid). W ten sposób wirtualny operator poprawia efektywność („uspokaja” i „wyrównuje” procesy zachodzące w sieci i zakładzie oczyszczalni) co pozwala fizycznemu operatorowi skupić się na bardziej istotnych zadaniach (np. strategicznych), które zwiększą produktywność i docelowo zmniejszą koszty (np. OpEx) (ibid).

Wirtualny operator monitoruje, analizuje, wizualizuje (kokpit) i steruje wydajnością gospodarki wod-kan. W oparciu o dane z sond, informacje nt. prognoz pogody i innych danych / informacji, zapewnia predykcje z dokładnością do 97% (ibid).

Wirtualny operator składa się z dwóch komponentów: (1) „analityka”, (2) „autopilota” (ibid).

Wirtualny analityk przekazuje informacje nt. wydajności czasie rzeczywistym, przepływu, ładunku i danych nt. jakości ze SCADA, sterowników PLC, baz danych dla procesów i sond połączonych poprzez internet rzeczy i porównując je z danymi historycznymi (ibid). Wizualizacja danych umożliwia (fizycznemu) operatorowi skupić się na właściwych zadaniach i podejmować szybkie decyzje na bazie dostępnej informacji (ibid).

Autopilot jest narzędziem samouczącym się i predykcyjnym, które pozwala (zgodnie z opisem) zapobiegać problemowi zanim on nastąpi poprzez monitoring wydajności i odpowiednią reakcję, gdyby była ona wymagana (ibid).

Wirtualny operator Aquasuite stosuje się do procesów i stosuje się do pięciu produktów / narzędzi (RHDHV 2020 i RHDHV 2020 c):

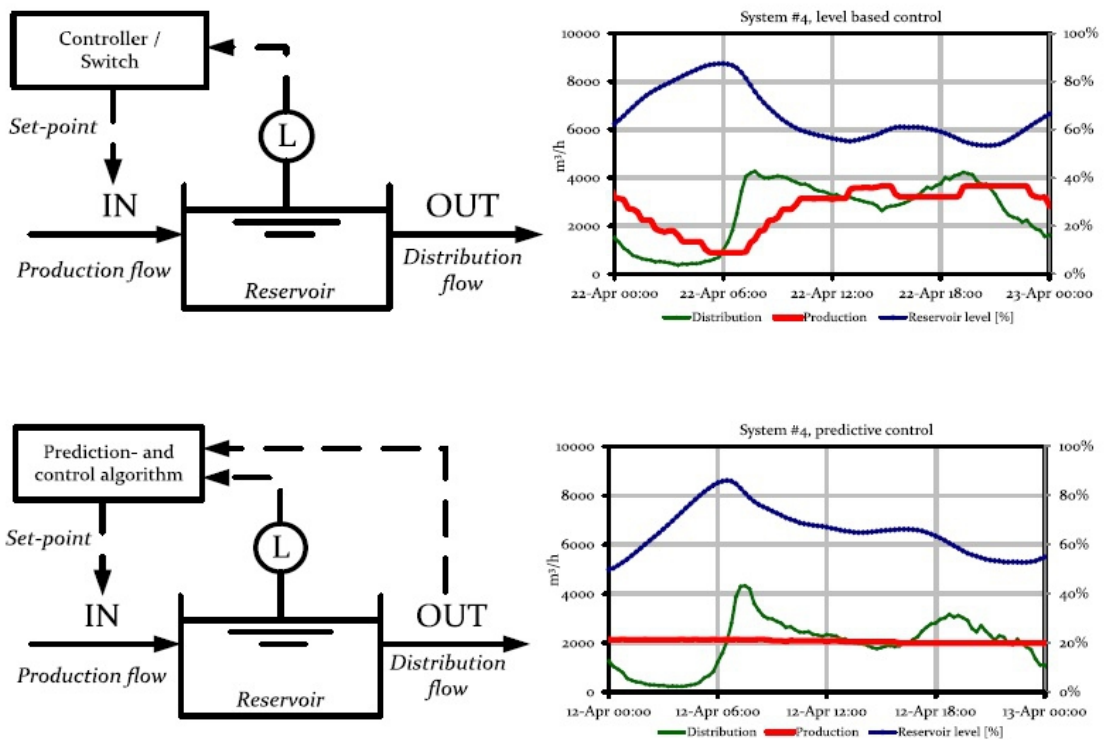
- Uzdatniania wody, magistral wodociągowych i sieci dystrybucyjnych (OPIR) (BURST wykrywa natomiast przecieki i awarie na sieci, a w tym celu wykorzystywane są sondy przekazujące sygnał poprzez internet rzeczy (de Koning 2020).)
- Sieci kanalizacyjnych / odbioru i przesyłu ścieków (FLOW)
- Oczyszczania ścieków (PURE, FLOW)
- Przetwarzania osadów (MINE).

W niniejszym artykule skupiono się narzędziach PURE i FLOW.

Układ kanalizacyjny / odbiór i przesył ścieków (RHDHV 2020)

Wirtualny operator (FLOW) może przewidywać, zidentyfikować i zmniejszyć przelewy burzowe z kanalizacji ogólnospławnej. Łączy prognozy pogody z danymi procesowymi w czasie rzeczywistym w celu prognozowania przyszłych wolumenów ścieków i ich wpływu na układ kanalizacyjny (RHDHV 2020). Może zidentyfikować anomalie występujące w sieci takie jak zatopy i bryły tłuszczów (*fatberg*). Może monitorować i sterować pompowniami w celu optymalizacji wydajności układu kanalizacyjnego (ibid). Przewiduje i zmniejsza przepływ / ładunki szczytowe napływające do oczyszczalni ścieków i przez to obejścia oczyszczalni (*bypassy*) (ibid).

FLOW wykorzystuje model hydrauliczny, który pozwala na predykcję opartą o aktualne warunki (Lubbers et al. 2018). Predykcja przepływu w czasie pogody bezdeszczowej odbywa się przy wykorzystaniu metody heurystycznej i adaptacyjnego modelu predykcyjnego, który był wcześniej stosowany przez RHDHV w optymalizacji produkcji wody pitnej (Lubbers et al. 2018), patrz rys. 4-2 poniżej.



Rys. 4-2: Zarządzanie predykcyjne produkcją wody pitnej (linia czerwona) na podstawie predykcji dystrybucji wody (linia zielona) i wysokości poziomu wody w zbiorniku (linia granatowa), a konwencjonalne zarządzanie na podstawie wyłącznie wysokości poziomu (odpowiednio dolny i górny wykres) (Bakker et al. 2013)

Oczyszczanie ścieków

Ponieważ wirtualny operator (PURE) przewiduje napływający ładunek do oczyszczalni, uczy się zatem jak działają procesy oczyszczania, i jak je optymalizować. PURE uczy się schematu napływających do oczyszczalni ścieków w oparciu o dane z istniejących sond pomiarowych i z innych źródeł (np. prognozy pogody lub typowe schematy wytwarzania ścieków w dni świąteczne) i przewiduje dzienne natężenie ścieków i zmiany ładunku (RHDHV 2020 b).

Jako narzędzie predykcyjne, określa odpowiednie nastawy dla kluczowych procesów oczyszczania ścieków w oparciu o różne kryteria (np. zmniejszenie zużycia energii elektrycznej) (RHDHV 2020). W procesie tym wykorzystywany jest „nauczony” związek pomiędzy każdym z procesów oczyszczania ścieków a wymagana jakością ścieków oczyszczonych (w oparciu o prognozowane natężenie ścieków surowych i ich ładunki) (RHDHV 2020 b).

Pomimo, że FLOW zasadniczo stosuje się do sieci kanalizacyjnej to przewiduje on napływający ładunek co pozwala na zmniejszenie prawdopodobieństwa by-passów oczyszczalni. Opisowa analityka wykorzystuje dane dot. procesów przechowywane w archiwizatorze *historian* lub pobrane z systemu automatyki procesowej (ibid). Wydajność układu kanalizacyjnego jest porównywana z modelami hydraulicznymi (*digital twins*) (ibid). Kiedy są dostępne wszystkie charakterystyki w bazie danych urządzeń może zostać oceniona wydajność hydrauliczna w porównaniu do założeń projektowych (ibid). Daje to odniesienie dla pomierzonych danych dot. wydajności. Wystąpić może jednak sprzężenie zwrotne przy porównaniu wydajności teoretycznej z modelem hydraulicznego, który jest oparty na danych statycznych (np. krzywe pompy) z danymi dynamicznych sygnałów procesów (ibid). Uczenie maszynowe jest wykorzystywane zatem w celu korekty procesu sterowania w oparciu o taki model (*digital twin*) (RHDHV 2020 b).

Kiedy system analityczny „nauczy się” typowego zachowania układu kanalizacyjnego, może wtedy przewidywać przyszłe zachowania, które są niezbędne dla analityki preskrytywnej (RHDHV

2020).

Wybrane studia przypadku (cel, metoda, wynik)

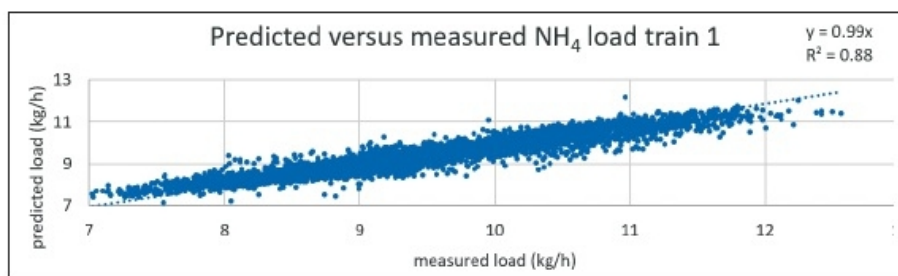
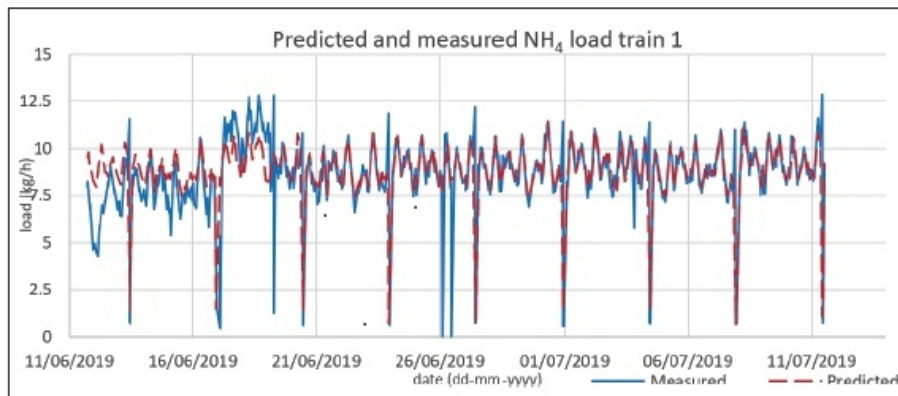
Zarząd Publicznych Spółek Komunalnych / Public Utilities Board - PUB (Singapur) (RHDHV 2020)

PURE był przedmiotem dwuletniego projektu pilotażowego w zakładzie PUB - *Integrated Validation Plant (IVP)*. Celem była walidacja zużycia energii, odczynników chemicznych i poprawy jakości wody / ścieków oczyszczonych, a także zmniejszenia liczby osób zaangażowanych w obsługę w procesach odzysku wody (recyklingu ścieków).

PURE był połączony z systemem SCADA w zakładzie, tak aby mógł zebrać dane i rozpocząć sterowanie kluczowymi procesami, a następnie przesyłać dane do chmury Aquasuite. Z danymi zebranymi w chmurze (w czasie zbliżonym do czasu rzeczywistego), PURE może śledzić efektywność procesów poprzez *digital twins*.

Operator miał natomiast dostęp przez chmurę do bardziej zaawansowanej analityki (np. predykcje dane analityczne, występujące anomalie, wykryte wahania danych, wskaźniki efektywności lub dane z „sond wirtualnych”). Otrzymywał też wczesne ostrzeżenia o wybranych zdarzeniach. Jednocześnie narzędzie (PURE), już poza chmurą, optymalizowało w czasie rzeczywistym efektywność pracy.

Zgodnie z dostępną informacją, wstępne wyniki wykazały, że Aquasuite (PURE) potrafił przewidzieć i przygotować się na kilka dni wcześniej do napływu ładunku azotu amonowego (patrz rys. 4-3). Autopilot mógł z kolei zapewnić wymaganą efektywność pracy, kiedy proces nie był nadzorowany. Wykazano też maksymalny spadek wydatku powietrza o 15% co wiązało się z odpowiednim spadkiem zużycia energii. Praca oczyszczalni była bardziej stabilna. Polepszyła się też jakość ścieków oczyszczonych.



Rys. 4-3: Górny wykres: Zrzut ekranu pokazujący przewidywane i rzeczywiste ładunki azotu

amonowego z przykładowego okresu podczas projektu pilotażowego. Wykres dolny: Korelacja pomiędzy przewidywanymi i rzeczywistymi ładunkami azotu amonowego (RHDHV 2020 c)

Zarząd Gospodarki Wodnej Vallei en Veluwe (WSVV) (Holandia) (Lubbers et al. 2018)

W tym studium przypadku skupiono się na metodach predykcyjnych i preskryptywnych w celu poprawy i optymalizacji procesów oczyszczania ścieków. Odbywało się to w kontekście niestabilnych przepływów szczytowych związanych z opadami deszczu, które dopływały do oczyszczalni oraz niską jakością ścieków oczyszczonych lub obejściami (*bypassami*) oczyszczalni co miało wpływ na wody odbiornika (eutrofizacja).

W celu maksymalizacji jakości ścieków oczyszczonych, WSVV zastosował wcześniej fazę doczyszczania ścieków (lub oczyszczanie trzeciego stopnia z wykorzystaniem filtrów piaskowych lub dyskowych), ale przepustowość hydrauliczna tej fazy była mniejsza niż maksymalna przepustowość hydrauliczna oczyszczalni (tj. oczyszczania drugiego stopnia). Powodowało to częste *bypassy* tej fazy podczas opadów deszczu. Takie przepływy szczytowe wiązały się także ze szczytowymi ładunkami całkowitego zapotrzebowania tlenu (*TOD*) i całkowitych zawartości substancji stałych (*TSS*).

Optymalizacja napływu do obiektu oczyszczalni ścieków odbywała się przy stosowaniu sterowania predykcyjnego, a nie konwencjonalnego pomiaru poziomu ścieków w pompowniach (patrz rys. 4-2 powyżej). Wdrożenie sterowania predykcyjnego odbywa się z wykorzystaniem predykcji przepływu w czasie pogody bezdeszczowej i „spłaszczone” przepływy / ładunki szczytowe w oparciu o prognozy pogody. W przeciwieństwie do sterowania w oparciu tylko o pomiar poziomu, sterowanie predykcyjne oczekuje na zmianę sytuacji przewidując dostępną retencję kanałową w celu spłaszczenia napływu do oczyszczalni (bez dodatkowych przelewów burzowych z kanalizacji ogólnospławnej). W tej kwestii, sterownik predykcyjny FLOW został zastosowany jako projekt pilotażowy.

Predykcje przepływu w czasie pogody bezdeszczowej wraz z prognozami pogody były czynnikami kluczowymi dla sterownika FLOW. W oparciu o te czynniki oraz o pomiary w czasie rzeczywistym poziomu i odpływu z pompowni do kanalizacji była dokonywana prognoza wraz optymalizacją dostępnej retencji kanałowej, która pozwalała na ograniczenie przelewów.

Na początku prognozowanego opadu deszczu nie było ograniczeń związanych z odpływem do kanalizacji. Po zakończeniu opadu, w przypadku, kiedy poziomy były poniżej poziomu definiowanego jako krytyczny, kanalizacja była opróżniana z powodów ograniczonych odpływów. Napływ do oczyszczalni był optymalizowany w przedziale pomiędzy maksymalną przepustowością pomp i przepustowością procesów oczyszczania trzeciego stopnia, ale był uzależniony od: (1) długości czasu przed następnym opadem, (2) czasem niezbędnym od opróżnienia kanalizacji.

Zarówno przepływ w czasie pogody bezdeszczowej, jak i prognozy pogody wraz pomiarami poziomu i odpływu były danymi wejściowymi dla sterownika FLOW. Aktualna sytuacja (tj. wykorzystana retencja kanałowa) była ciągle obliczana w oparciu o poziom i zastosowanie odpowiednich krzywych z modeli kanalizacji. Przyszła sytuacja (tj. retencja kanałowa do wykorzystania) była przewidywana na podstawie technik optymalizacji pojemności / objętości.

Retencja kanałowa była modelowana jako oddzielne zbiorniki. Predykcja napływu do zbiornika była obliczana jako suma natężenia przepływu w czasie pogody bezdeszczowej i predykcja spływu wód opadowych. Odpływ ze zbiornika była przewidywany na podstawie optymalizacji pojemności. W tym celu całkowita retencja była także optymalizowana biorąc pod uwagę dwa ograniczenia: (1) krytyczne poziomy w kanalizacji, (2) wymaganie, aby opróżnić kanalizację przed następnym istotnym opadem.

W tym studium przypadku wykazano, że w większości przypadków napływy szczytowe do kilku oczyszczalni WSVV zostały spłaszczone, a zarazem zmniejszona została liczba *bypassów* procesów

oczyszczania trzeciego stopnia / doczyszczania ścieków oczyszczonych (i bez powodowania dodatkowych przelewów burzowych). Efektywność oczyszczania pierwszego i drugiego stopnia także uległa poprawie. Spowodowało to niższe stężenia substancji biogenych (fosforu) w ściekach oczyszczonych wraz z obniżeniem zużycia energii i odczynników chemicznych (tj. OpEx).

SONDY *ONLINE* (INTERNET RZECZY), „ANALITYKA HYBRYDOWA” W CHMURZE DLA CELÓW UTRZYMANIA RUCHU

5.

Dynamox (Brazylia)

Opis technologii, metody i narzędzi informatycznych

Poniższe studia przypadku dotyczą narzędzia DynaPredict i stosują się do pomp do przesyłu wody, ale narzędzie DynaPredict jest też stosowane do pomp dla przesyłu ścieków i zmniejszenia ich awaryjności, która może skutkować awaryjnym zrzutem nieoczyszczonych ścieków do wód (Barrault 2020).

Charakterystyki pomp odśrodkowych i przyczyny ich uszkodzeń (Passos 2020)

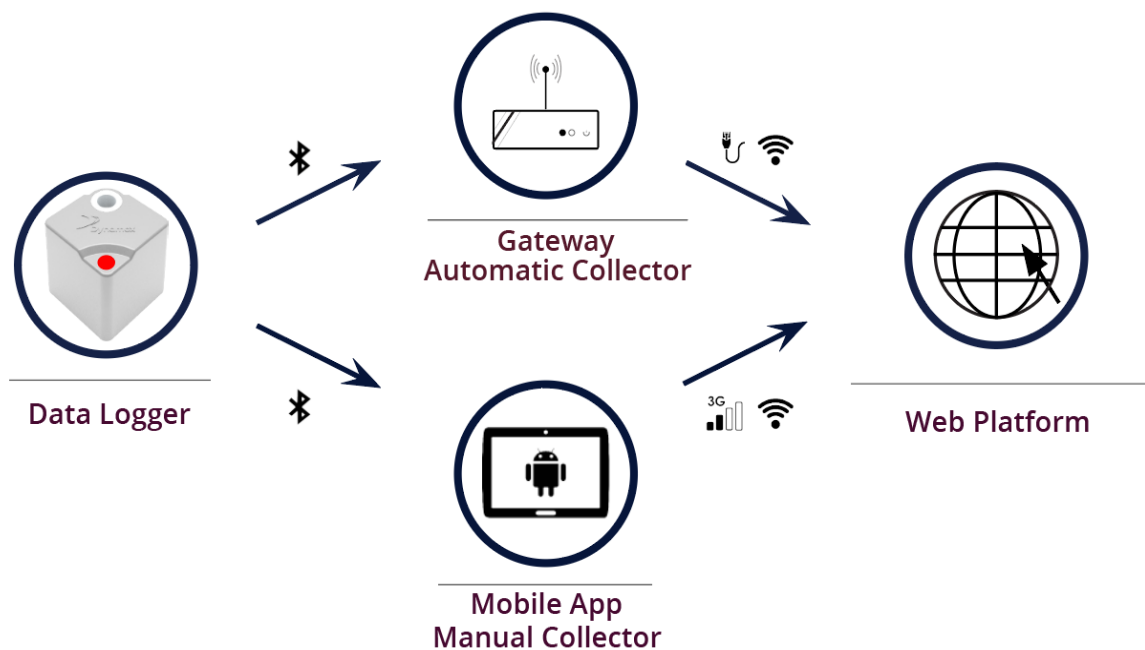
Pompy odśrodkowe są najczęściej wykorzystywane w pompowniach wody, a zatem poniższe studia przypadków dotyczą tych typów pomp. Charakterystyką pomp odśrodkowych są elementy wirnika wyposażone w kierownice łopatkowe (wirnik), które wywierają na ciecz siły w wyniku wytwarzanego przyspieszenia. Takie typy pomp są zazwyczaj klasyfikowane na podstawie trajektorii przepływu cieczy przez wirnik: przepływ promieniowy, mieszany i osiowy. Pompy odśrodkowe są klasyfikowane jako pompy o przepływie promieniowym.

Ciecz wpływa przez wlot w pobliżu wału skąd jest następnie kierowana na obwód z dużą prędkością wytwarzaną przez wirnik. Ciecz opuszcza wirnik jako strumień styczny i jest skierowana do komory stożkowej zwaną korpusem spiralnym, gdzie część jej energii kinetycznej jest przekształcana w ciśnienie.

Pompy są klasyfikowane na różne sposoby, ale najważniejsze ze względu na ich monitoring jest liczba łopatek wirnika i typ korpusu spiralnego. Na przykład dla pomp jednostopniowych z pojedynczym korpusem spiralnym główne przyczyny uszkodzeń (*failure modes*) (np. niewspółosiowość, nieprawidłowości związane z łożyskami lub kawitacja) zostały zamieszczone w tabelach / bazie danych i są uzależnione od częstotliwości / prędkości obrotowej (obrotów na minutę, obr/min). Dla pomp wielostopniowych, obroty wirnika dla każdego stopnia są monitorowane oddzielnie, ponieważ posiadają one różne liczby łopatek. Ciśnienie w korpusie spiralnym zmienia się jak wirnik obraca się i jest uzależnione od tego czy łopatki pokrywają się w tym czasie z wylotem. Rezultatem jest pulsowanie ciśnienia w korpusie spiralnym o częstotliwości, która jest równa liczbie łopatek pomnożonej przez prędkość wału. Ta wartość nosi nazwę „częstotliwości przejścia łopatek” (*vane pass frequency*). W obliczeniach częstotliwości przejścia łopatek, przyjmuje się podwojoną liczbę łopatek dla pomp z podwójną spiralą.

Narzędzie DynaPredict (Passos 2020)

Narzędzie DynaPredict umożliwia prowadzenie analiz na podstawie pomiaru drgań i temperatury dla maszyn wirnikowych. Narzędzie oparte jest na bezprzewodowej technologii i składa się z głównych elementów, które zobrazowano na rys. 4-4.



Rys. 4-4: Związek pomiędzy głównymi elementami narzędzia DynaPredict (Źródło: www.dynamox.net)

Rejestrator danych (DynaLogger) – rejestrator danych z trójosiowym akcelerometrem, sondą temperatury, wewnętrzną pamięcią, autonomicznym akumulatorem o trzyletniej żywotności i z transmisją danych przez Bluetooth. Monitoring urządzenia odbywa się w sposób ciągły, a rejestrator przekazuje wykresy ogólne i widmowe w celu umożliwienia analizy potencjalnych uszkodzeń, tak aby zapobiec uszkodzeniom funkcjonalnym (awarii).

Platforma internetowa (Web Platform) – oprogramowanie do analizy predykcyjnej w chmurze pozwala na dostęp do danych w każdej lokalizacji. Platforma internetowa zawiera narzędzia służące do analizy otrzymywanych sygnałów.

Główną cechą platformy internetowej jest kokpit menadżerski, który klasyfikuje dane zebrane z każdego punktu pomiarowego na podstawie uprzednio skonfigurowanych alertów / monitów. W przypadku wystąpienia alertu, status zmienia się z koloru zielonego (brak alertu) na żółty (alert A1) lub czerwony (alert A2), patrz rys. 4-5.

Dashboard

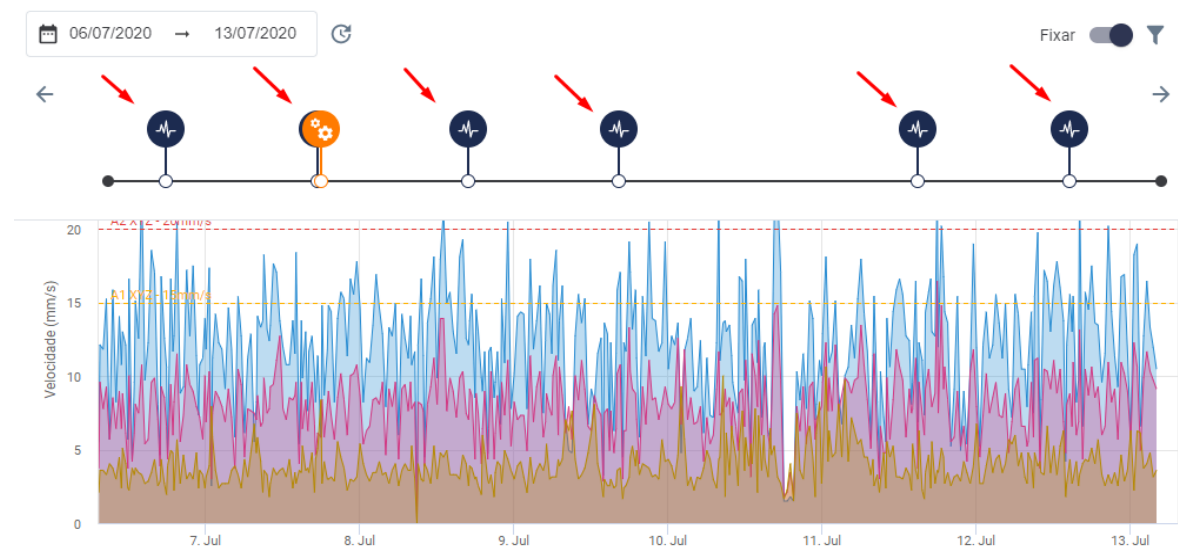
Sub workspace: Ventilador

Status	Machine	Spot	Trending	Vel. (AVG)	Temp. (AVG)	Accel. (AVG)	Spec. X			Spec. Y			Spec. Z			Capacity		
							LF	AF	LF	AF	LF	AF	BAT	MEM	LAST SYNC			
A2	THDF - Exaustão	Ventilador 4531 lad...	●●●●●●●●	6.14	32.42	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	2 days ago
A2	THDF - Exaustão	Ventilador 5611	●●●●●●●●	8.19	39.97	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	8 days ago
A1	THDF - Prensa	Ventilador lavador l...	●●●●●●●●	8.10	35.09	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	16 hours ago
A1	THDF - Exaustão	Ventilador 4511 lad...	●●●●●●●●	0.76	35.65	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7 days ago
A1	THDF - Exaustão	Ventilador 4511 lad...	●●●●●●●●	0.58	34.81	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7 days ago
A1	THDF - Exaustão	Ventilador 4531 lad...	●●●●●●●●	5.20	38.03	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	2 days ago
A1	THDF - Exaustão	Ventilador 5581 lad...	●●●●●●●●	7.51	48.67	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7 days ago
A1	THDF - Exaustão	Ventilador 5511 lad...	●●●●●●●●	0.67	33.27	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7 days ago
A1	THDF - Exaustão	Ventilador 5541 lad...	●●●●●●●●	1.02	25.83	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7 days ago
A1	THDF - Exaustão	Ventilador 5601	●●●●●●●●	3.90	46.32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	8 days ago
A1	THDF - Exaustão	Ventilador 5541 lad...	●●●●●●●●	0.72	28.33	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7 days ago
A1	THDF - AREA 600	Ventilador DCC dire...	●●●●●●●●	11.43	26.37	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	4 days ago
OK	THDF - Exaustão	Ventilador Machine...	●●●●●●●●	4.64	35.08	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	7 days ago
OK	THDF - Exaustão	Ventilador 4521 lad...	●●●●●●●●	4.15	43.71	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	4 days ago
OK	THDF - Exaustão	Ventilador 4521 lad...	●●●●●●●●	2.76	41.08	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	4 days ago
OK	THDF - Exaustão	Ventilador maiz lad...	●●●●●●●●	1.16	34.06	—	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	4 days ago

Rys. 4-5: Celem kokpitu menadżerskiego DynaPredict jest umożliwienie procesu podejmowania

decyzji i niezbędnych działań związanych z utrzymaniem ruchu (Źródło: DynaPredict Web Platform)

Jest także możliwe wykonanie analizy widmowej dla każdego punktu pomiarowego wraz z chronologiczną linią czasową pokazując dokładnie, kiedy poszczególne dane zostały uzyskane (patrz rys. 4-6). Pozwala to użytkownikowi cofnąć się w czasie i wybrać konkretny zestaw danych do analizy.



Rys. 4-6: Widma uzyskane w określonych punktach czasu (wskazane czerwoną strzałką na chronologicznej linii czasu) i dane zebrane w sposób ciągły (wykres poniżej linii czasu)

Wybrane studia przypadku (cel, metoda, wynik)

Studia przypadku (Passos 2020)

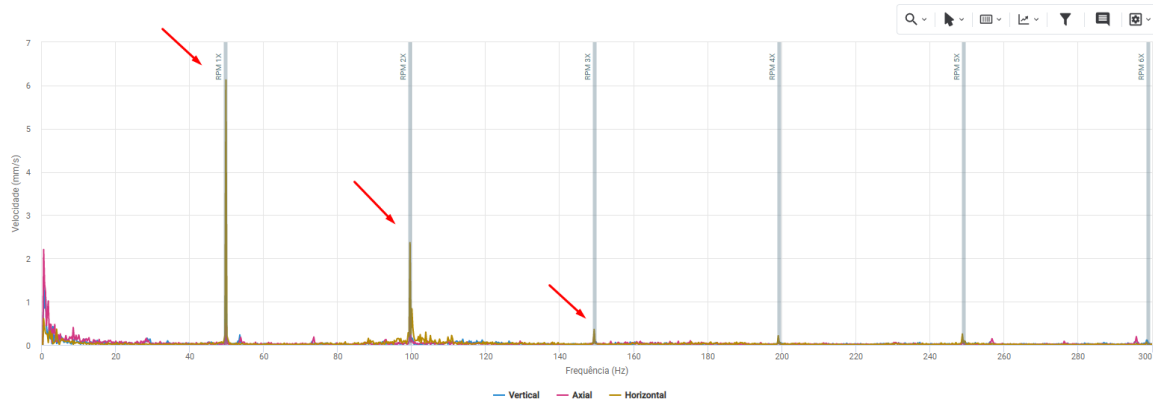
Zaprezentowane poniżej studia przypadku dotyczą potencjalnych uszkodzeń pomp odśrodkowych i ich napędów. Wykazują one, że pomimo odległości aż ponad 150 km od siedziby Eksploatacji uszkodzenia te mogą zostać zdalnie wykryte bez obecności na miejscu techników zanim spowodują awarię.

Potencjalne uszkodzenia pomp zostały zidentyfikowane i poddane ocenie z wykorzystaniem narzędzia DynaPredict w celu identyfikacji przyczyny uszkodzenia. W jej wyniku przeprowadzono konserwację pomp co pozwoliło na zapewnienie ciągłości usług dla ich odbiorców.

Studium przypadku nr 1

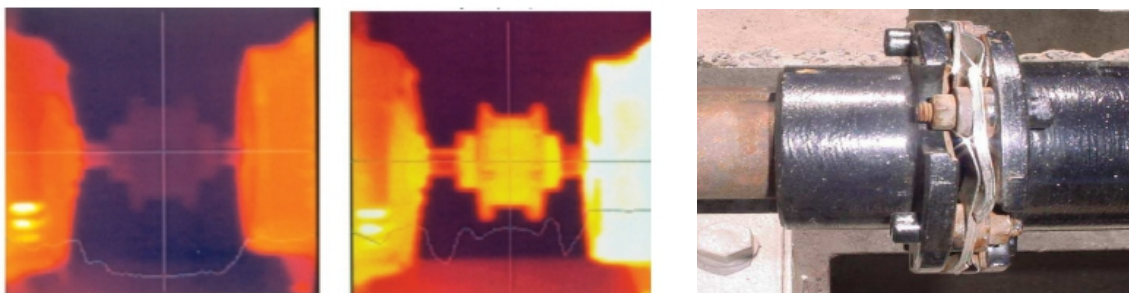
W tym studium przypadku wykryta została wysoka prędkość drgań (mm/s) dla częstotliwości 1X (obr/min) w kierunkach poziomym i osiowym. Wirnik pompy został poddany wstępnemu osiowaniu. Osiowanie laserowe wykryło niewspółosiowość poziomą 6 mm i osiową 2,5 mm. Rys. 4-7 wskazuje widma drgań identyfikujące niewspółosiowość.

Espectro



Rys. 4-7: Analiza widmowa (rozkład częstotliwości – prędkość drgań) wskazująca na piki sygnału, które są spójne ze wskaźnikami uszkodzeń dla 1X obr/min, 2X obr/min, 3X obr/min, itd. ($1 \text{ obr/min} = 1/60 \text{ Hz}$)

W warunkach niewspółosiowości wirnika następuje wzrost temperatury, poziomu dźwięku i drgań dyssypujących część energii (patrz rys. 4-8), która powinna zostać zamieniona na pracę. Prowadzi to do zmniejszenia efektywności urządzenia (patrz Piotrowski 2007).



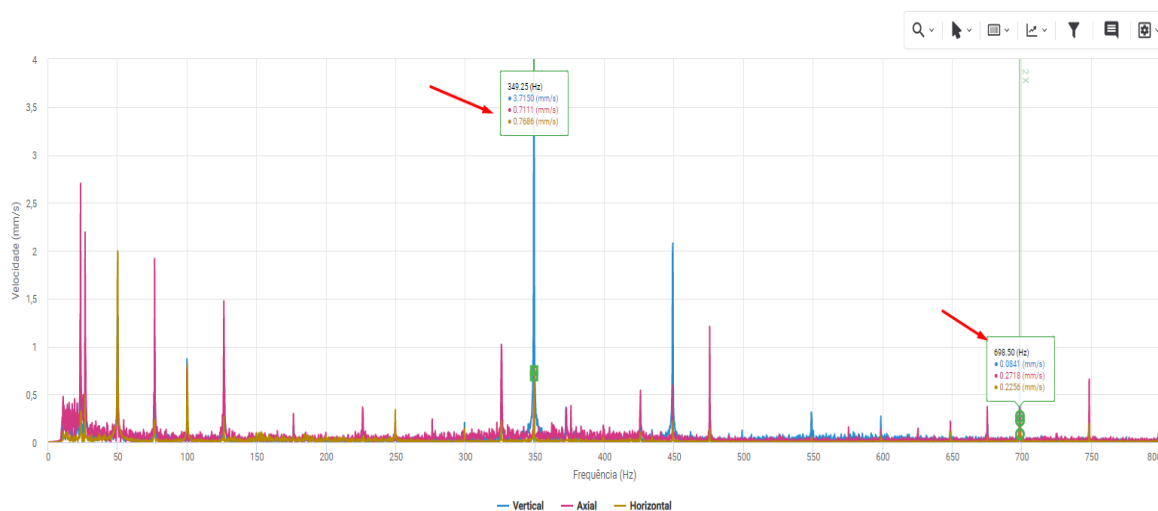
Rys. 4-8: Zdjęcia termowizyjne pokazujące różnicę w dyssypacji ciepła w warunkach niewspółosiowości

Studium przypadku nr 2

W systemie pompowym następował stopniowo wzrost „częstotliwości przejścia łopatek”. Początkowo podejrzewano, że może wiązać się z uszkodzeniem łopatek lub korpusu (patrz Adams 2009). Jednakże po oczyszczeniu systemu pompowego (patrz rys. 4-9), system zaczął funkcjonować ponownie prawidłowo i częstotliwości przejścia łopatek wróciły do normy. Rys. 4-10 pokazuje widma brane pod uwagę w analizie.

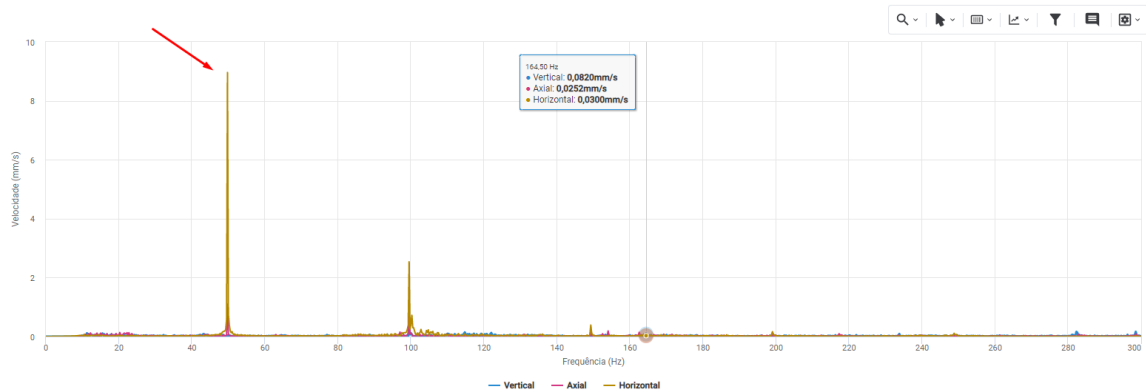


Rys. 4-9: Proces czyszczenia systemu pompowego



Rys. 4-10: Analiza widmowa (rozkład częstotliwości – prędkość drgań) ze wskaźnikami harmonicznymi dla 350 Hz i 700 Hz

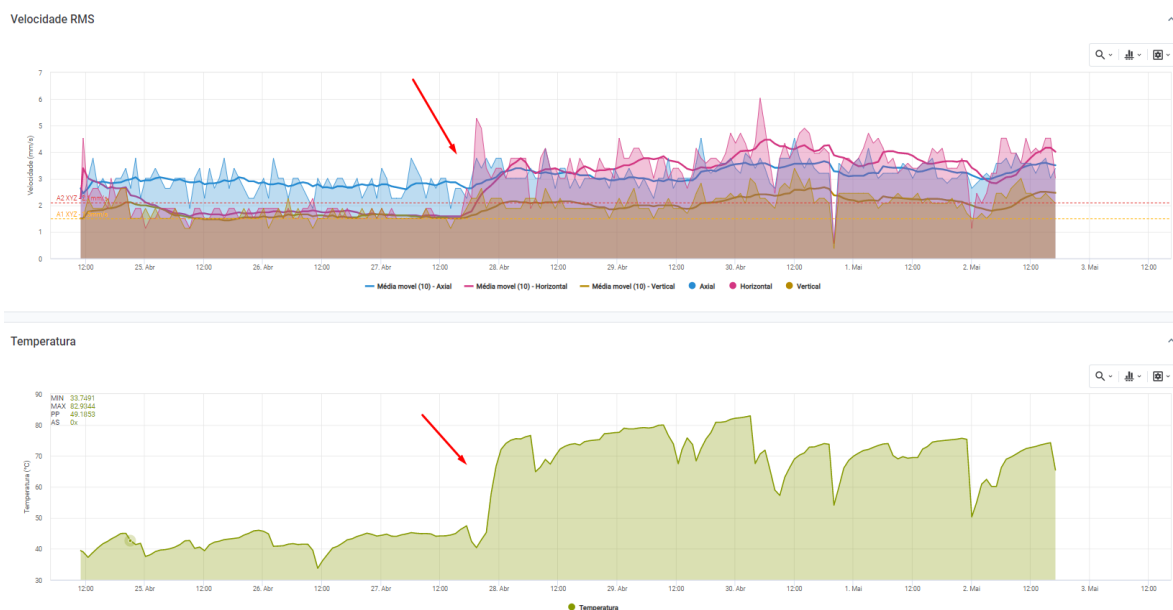
Pompa odśrodkowa powodowała wysoki poziom sygnału drganiowego przy nominalnej prędkości obrotowej. Poziom sygnału wewnętrznych łożysk był wyższy niż dla łożysk zewnętrznych, a odczyty pionowe były istotnie wyższe niż odczyty poziome. Konstrukcja została sprawdzona i stwierdzono, że była rezonująca dla niskich częstotliwości (patrz Mechefske 2005). Rys. 4-11 pokazuje stosowną analizę widmową.



Rys. 4-11: Analiza widmowa (rozkład częstotliwości – prędkość drgań) wskazująca na wysoki wzrost sygnału przy 50 Hz

Studium przypadku nr 4

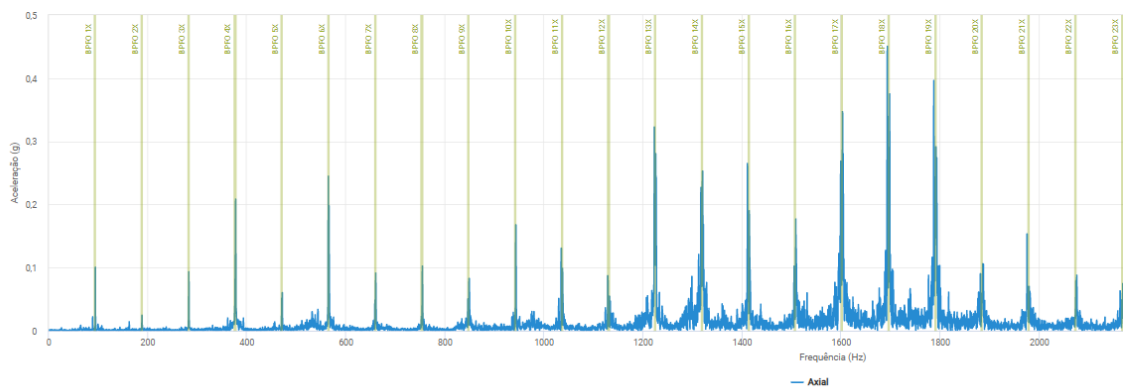
Ogólny wykres z pomiarów dla pompy odśrodkowej wskazuje na jednoczesny wzrost prędkości skutecznej (RMS) drgań i temperatury (patrz rys. 4-12).



Rys. 4-12: Jednoczesny wzrost poziomu drgań (górny wykres) i temperatury (dolny wykres)

W wyniku analizy widmowej w punkcie jednoczesnego wzrostu sygnału drganiowego i temperatury wykryto piki sygnału w kierunku osiowym (patrz Mitchell 1978). Kiedy urządzenie zostało poprawnie skonfigurowane i wybrany został odpowiedni model łożysk z bazy danych DynaPredict, narzędzie analityczne wskazało na uszkodzenie w zewnętrznym pierścieniu łożyska („częstotliwość przetaczania elementów tocznych po zewnętrznym pierścieniu”) z powodu zanieczyszczenia smaru wodą. Rys. 4-13 zawiera stosowną analizę widmową.

Espectro



Rys. 4-13: Analiza widmowa (rozkład częstotliwości – przyspieszenie drgań) wskazująca na piki sygnału, które są spójne ze wskaźnikami „częstotliwości przetaczania elementów tocznych po zewnętrznym pierścieniu”

Urządzenie było dalej monitorowane do czasu planowego wyłączenia z eksploatacji, kiedy to łożyska były przedmiotem oględzin i zostały wymienione. Rys. 4-14 obrazuje przedmiotowe uszkodzenie łożyska.



Rys. 4-14: Uszkodzenie łożyska

**SONDY ONLINE (INTERNET RZECZY), ANALITYKA PREDYKCYJNA W CHMURZE DLA
CELÓW IDENTYFIKACJI ŹRÓDEŁ ZRRZUTÓW ŚCIEKÓW PRZEMYSŁOWYCH DO SIECI
KANALIZACYJNEJ**

6.

Kando (Izrael)

Opis technologii, metody i narzędzi informatycznych

Zgodnie z dostępną informacją, Clear Upstream firmy Kando wykorzystując *big data* wraz z algorytmami uczenia maszynowego umożliwia operatorowi układu kanalizacyjnego na monitorowanie w czasie rzeczywistym warunków w nim panujących. Metoda polega na pomiarach ścieków w kanalizacji powyżej oczyszczalni i pozwala na skoncentrowanie się na konkretnej lokalizacji w tym na pojedynczej ulicy tak aby móc śledzić w czasie rzeczywistym wszelkie nieprawidłowości, substancje zawarte w ściekach (zanieczyszczenia) i doprowadzić do źródła tych zanieczyszczeń (Steward 2020). W tym celu Kando wykorzystał w Clear Upstream platformę uczenia maszynowego *Gradient* firmy Paperspace (Kando 2020).

Narzędzie jest oferowane klientom (np. przedsiębiorstwom wod-kan) jako pakiet usług *Service as a Solution (SaaS)* (Steutel-Marón 2019). SaaS wiąże się z przekazaniem klientom: (1) urządzeń pomiarowych (sond elektrochemicznych lub optycznych) połączonych poprzez internet rzeczy, (2) narzędzia analityki predykcyjnej Clear Upstream działające w chmurze, i (3) metodyki firmy Kando (Steutel-Marón 2019, Steward 2020, Kando 2020 b).

Z pomocą Clear Upstream są identyfikowane i śledzone nielegalne / niespełniające wymagań ładunki substancji w ściekach odprowadzanych do kanalizacji, a także pobierane są próbki tych ścieków w czasie rzeczywistym. Obliczane są podstawowe mierniki (np. wolumen ścieków przemysłowych względem ścieków bytowych, charakterystyki ścieków wraz z wartościami stężeń zanieczyszczeń) (Steward 2020). Po zebraniu danych, wykonane przez Clear Upstream analizy umożliwiają wykrycie niezgodności wartości tych mierników z wcześniej określonymi dopuszczalnymi warunkami na zrzuty ścieków przemysłowych (Steutel-Marón 2019). Narzędzie wysyła wtedy w czasie rzeczywistym aktywne (*push*) alerty / zawiadomienia o śledzeniu wykrytych zanieczyszczeń (Kando 2020 b).

Clear Upstream identyfikuje zdarzenie związane ze zrzutem ścieków w czasie rzeczywistym, identyfikuje źródło i powiadamia operatora na interaktywnym kokpicie o tych zdarzeniach, które mogą mieć wpływ na oczyszczalnię oraz rozpoczyna automatyczny pobór próbek (w przypadku, gdy zostały zainstalowane takie urządzenia) (Steutel-Marón 2019, Steutel-Marón 2019 b, Steward 2020, Kando 2020 b).

Pozwala to operatorowi odpowiednio zareagować zanim zanieczyszczenia dotrą do oczyszczalni lub spowodują szkodę w związku z eksploatowaną infrastrukturą (Steutel-Marón 2019b). Poprzez identyfikację źródła ścieków zanim przyplyną do oczyszczalni, operator może zatem podjąć decyzje na podstawie posiadanej informacji (ibid). Pozwala to na eksploatację oczyszczalni bardziej efektywnie zmniejszając zużycie energii i odczynników chemicznych oraz kosztów obsługi przy jednoczesnym posiadaniu pełnej wiedzy nt. stopnia zanieczyszczenia napływających ścieków, jak i ich potencjalnego źródła (Steward 2020). Pozwala to też oczyszczalniom na identyfikację: źródła odorów, napływu wód opadowych / infiltracji wód gruntowych lub przecieków ścieków do kanalizacji deszczowej (ibid).

Wyniki badań laboratoryjnych są dodawane do bazy danych Kando tak aby mogły być wykorzystywane w przyszłych analizach wykonywanych w podobnych uwarunkowaniach, czego wynikiem będą bardziej trafne decyzje podejmowane w przypadku innych zrzutów ścieków do kanalizacji, które są niezgodne z przepisami lub zawierają podwyższone stężenia substancji (Steutel-Marón 2019). Może zostać zidentyfikowana lokalizacja źródeł zanieczyszczeń (*hot spots*) i ich trendy co może być pomocne dla operatora w przyszłości (Steward 2020).

Wybrane studia przypadku (cel, metoda, wynik)

Przedsiębiorstwo wod-kan EYDAP (Grecja)

Celem było zmniejszenie ładunków, które dopływają do oczyszczalni, jak i kosztów eksploatacyjnych OpEx (Kandu 2020 c). EYDAP wykorzystał Clear Upstream w celu ochrony oczyszczalni ścieków przed zrzutami do sieci kanalizacyjnej ścieków przemysłowych niezgodnych z przepisami (Steutel-Marón 2019). System początkowo uwzględniał: cztery sondy i cztery urządzenia do poboru próbek, przy czym jedna para z nich w pobliżu zrzutu ścieków z zakładu przemysłowego, który podejrzewano o nielegalne zrzuty (ibid).

Podczas zrzutu ścieków, urządzenia do poboru próbek uruchamiały się autonomicznie po czym próbki były przesyłane do laboratorium (ibid). Wyniki badań potwierdziły wysoki poziom zanieczyszczeń, ale algorytm Clear Upstream wskazał na inny zakład przemysłowy niż ten, który początkowo podejrzewano (ibid). Urządzenia zostały zatem przemieszczone w celu trafniejszej identyfikacji źródła (ibid).

Po ich przemieszczeniu, Clear Upstream wykrył ładunek zanieczyszczeń i skorelował go z konkretną lokalizacją (ibid). Zakład przemysłowy został zidentyfikowany i dalej monitorowany, a próbki były dalej pobierane automatycznie podczas kolejnych zrzutów (ibid). Wyniki badań laboratoryjnych potwierdziły wskazania algorytmu Clear Upstream. Po weryfikacji, EYDAP mógł podjąć stosowne działania w stosunku do zakładu przemysłowego i ograniczyć przyszłe incydenty związane z jego ściekami przemysłowymi.

W ramach projektu osiągnięto następujące rezultaty:

- W ciągu paru tygodni trwania projektu zostały zidentyfikowane nieznane wcześniej nielegalne zrzuty (Kandu 2020 c).
- Zidentyfikowane zakłady przemysłowe zaprzestały zanieczyszczonych zrzutów ścieków co zmniejszyło napływający ładunek do oczyszczalni (ibid).
- Docelowo zmniejszono zrzuty niezgodne z przepisami o 50% (Steutel-Marón 2019).
- W rezultacie zapłacono 1,3 milion USD kar (Kandu 2020 c).

HERA GROUP, Castel Nuovo, rejon Modeny (Włochy) (Kandu 2020 c)

Celem było obniżenie kosztów eksploatacyjnych OpEx, jak i ochrona oczyszczalni. Wymagało to poprawienia jakości zrzutów przemysłowych do kanalizacji. Osiągnięcia projektu były następujące:

- Wiele z zakładów przemysłowych niespełniających wymagań zostało zidentyfikowanych i zmuszonych do zmiany swoich dotychczasowych praktyk.
- Ładunek ChZT został zmniejszony o 50 %.
- Koszty eksploatacyjne (OpEx) związane z reaktorami oczyszczalni zostały zmniejszone o 25 % (w ciągu pierwszych czterech miesięcy projektu).
- Zmniejszono zużycie energii o 11 % (w ciągu pierwszych czterech miesięcy projektu).

5. Podsumowanie

Proces absorpcji technologii związanych z Wodą 4,0 w gospodarce wod-kan (zarówno komunalnej, jak i przemysłowej) w Polsce postępuje z różnych przyczyn dość powoli, a miałby on szereg korzyści założonych na wstępie niniejszego artykułu (opierając się na dostępnych publikacjach), a później wykazanych i zilustrowanych na podstawie szeregu studiów przypadku, tj.: (1) racjonalność gospodarowania środkami i wykorzystania środków odtworzeniowych (*CapEx*), (2) efektywność ekonomiczna (niższy *OpEx*, jak i *TotEx*), (3) możliwość planowania obsługi / konserwacji i zwiększenie bezpieczeństwa (BHP), jak i (4) korzyści środowiskowe (tj. zapewnienie jakości

ścieków oczyszczonych) w tym ochrona Bałtyku przed zanieczyszczeniem.

Powyższe korzyści wykazano w niniejszym artykule z pomocą wybranych studiów przypadku w kontekście: (1) optymalizacji efektywności / wydajności oczyszczalni komunalnych i powiązanych z nimi sieci kanalizacyjnych, (2) identyfikacji źródeł ścieków przemysłowych odprowadzanych niezgodnie z przepisami do kanalizacji, (3) obsługi predykcyjnej (utrzymania ruchu) dla kluczowych aktywów układu kanalizacyjnego (np. systemów pompowych). Pomimo, że część studiów przypadku odnosi się do komunalnych układów kanalizacyjnych te same technologie, metody i narzędzia informatyczne mogłyby zostać zastosowane do dużych oczyszczalni przemysłowych i ich sieci kanalizacyjnych zwłaszcza w przemyśle energetycznym, chemicznym, petrochemicznym i rafineryjnym, które często otrzymują z wewnętrznych bloków i wydziałów ścieki niejednorodne i ich źródła są trudne do identyfikacji.

Jedną z barier związanych z dotychczasowym niedostatecznym poziomem zastosowania nowych technologii w kraju jest ogólnie dość niski poziom inwestycji ukierunkowanych na wdrażanie innowacyjnych rozwiązań, a także ogólnie niski poziom zainteresowania współczesnymi metodami zarządzania aktywami materialnymi i inżynierią niezawodności. Odpowiednio przeprowadzone analizy finansowe uwzględniające zwłaszcza TotEx i OpEx, mogłyby zmienić tą niekorzystną sytuację.

Kończąc warto też zwrócić uwagę, że Polska jest krajem, któremu grozi deficyt wody, który będzie się pogłębiał wraz ze zmianami klimatu, natomiast Woda 4.0 może także zmniejszyć ślad węglowy i wodny, a z pewnością poprawić naszą odporność na zmiany klimatu.

Materiały źródłowe

Adams, M. L. (2009). *Rotating Machinery Vibration: From Analysis to Troubleshooting*, Druga Edycja. Boca Raton, FL: CRC Press. 23 grudnia 2009.

Alabi, M. O., Telukdarie, A. i Janse van Rensburg, N.: 2019. *Water 4.0: An Integrated Business Model from an Industry 4.0 Approach*. Materiały konferencyjne 2019 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), grudzień 2019. Publikacja dostępna na: <https://www.researchgate.net/publication/339021634> [Dostęp 11 czerwca 2020].

Almagor, D., Lavid D., Nowitz, A., i Vesely, E.: 2019. *Maintenance 4.0 Implementation Handbook*. reliabilityweb.com, 2019.

Bakker, M., Vreeburg, J.H.G., Palmen, L.J., Sperber, V., Bakker, G. i Rietveld, L.C.: 2013. Better water quality and higher energy efficiency by using model predictive flow control at water supply systems, *J. Water Supply Res. Technol. - Aqua* 62 (1), str. 1-13.

Barrault, G.: 2020. Osobista komunikacja. Dynamox. 16 lipca 2020.

DHI: *Optimise processes, reclamation, energy and chemical usage to improve treatment efficiency*, product flyer. Danish Hydraulic Institute. Publikacja dostępna na: https://waterchallenges.dhigroup.com/wastewater-treatment/?_ga=2.220802200.1281567469.1591736428-530543274.1570270854 [Dostęp 24 lipca 2020].

DHI b. *DIMS.CORE Data integration and business processes*, product flyer. Danish Hydraulic Institute. Publikacja dostępna na: https://www.mikepoweredbydhi.com/products/dims-core?_ga=2.197843884.225386016.1595191620-319560526.1481387815 [Dostęp 24 lipca 2020].

DHI c. *WEST. WWTP modelling that does it all*. Danish Hydraulic Institute. Publikacja dostępna na: https://www.mikepoweredbydhi.com/products/west?_ga=2.33634466.225386016.1595191620-319560526.1481387815

DHI d. *Process optimisation at Lüleburgaz plant*, case story flyer. Danish Hydraulic Institute. Publikacja dostępna na: https://www.mikepoweredbydhi.com/products/west?_ga=2.33634466.225386016.1595191620-319560526.1481387815 [Dostęp 20 lipca 2020].

DHI e. *Achieving 50% carbon footprint reduction by 2025*, case story flyer. Danish Hydraulic Institute. Publikacja dostępna na: https://www.dhigroup.com/global/references/nala/overview/achieving-50-percent-carbon-footprint-reduction-by-2025?_ga=2.265371276.225386016.1595191620-319560526.1481387815 [Dostęp 20 lipca 2020].

DHI f. *DIMS.CORE. Integracja danych oraz zarządzanie przedsiębiorstwem*. Danish Hydraulic Institute (DHI Polska Sp. z o.o.). Publikacja dostępna na: <https://worldwide.dhigroup.com/-/media/shared%20content/presences/emea/poland/flyers%20and%20pdf/projects/suwalki.pdf?la=en> [Dostęp 28 lipca 2020].

DHI g: *MIKE OPERATIONS. An online modelling framework designed for water forecasting and operational control*. Publikacja dostępna na: <https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-operations> [Dostęp 20 lipca 2020].

E+H: *Predykcyjny system sterowania Liquiline Control CDC81*. Endress+Hauser. Publikacja dostępna na: <https://www.pl.endress.com/pl/wieksza-wydajnosc-mniejsze-koszty/rozwiwania-analityczne/usuwanie-azotu/kontrola-napowietrzania-usuwanie-fosforu-w-oczyszczalni-sciekow> [Dostęp 21 lipca 2020].

E+H: 2020. Jak zwiększyć efektywność i oszczędzać na kosztach oczyszczalni ścieków? Wywiad ze specjalista ZGWK w Tomaszowie Mazowieckim. *Kurier Wod-Kan. Magazyn klientów Endress+Hauser* 2020, str. 24-28.

E+H: 2018. *Controlled by Liquiline Control Automated nitrogen removal in Stadtholn wastewater treatment plant*, Endress+Hauser case study sheet, Endress+Hauser. Publikacja dostępna na: <https://www.pl.endress.com/pl/Endress-Hauser-Twoj-Partner/nasze-realizacje/stadthol-usuwanie-azotu> [Dostęp 21 lipca 2020].

E+H: 2018 b. *Controlled by Liquiline Control. Automated phosphate removal in Stadtholn wastewater treatment plant*, Endress+Hauser case study sheet. Endress+Hauser. Publikacja dostępna na: https://www.pl.endress.com/pl/Endress-Hauser-Twoj-Partner/nasze-realizacje/automatyzacja_stracania_fosforu [Dostęp 21 lipca 2020].

German Water Partnership: *Water 4.0*. Publikacja dostępna na: <https://germanwaterpartnership.de/en/water-4-0-2/> [Dostęp 4 czerwca 2020].

Greenfield, D.: 2020. A Step Approach to Industry 4.0, *Automation World*, 4 czerwca 2020, Publikacja dostępna na: <https://www.automationworld.com/factory/iiot/article/21135339/a-step->

[approach-to-industry-40](#) [Dostęp 18 czerwca 2020].

Grievson, O.: 2018. Water 4.0 and the wastewater cycle, *WWT magazine*, edycja wrzesień 2018, 31 sierpnia 2018, Faversham House Group Ltd 2020, Publikacja dostępna na :<https://wwtonline.co.uk/features/water-4-0-and-the-wastewater-cycle#.XJCgo7ixWM> [Dostęp 18 czerwca 2020].

ISO/TS 55010:2019: *Asset management — Guidance on the alignment of financial and non-financial functions in asset management*, International Organization for Standardization.

Kandu: 2020. *Kando and Paperspace Partner to Bring Advanced Machine Learning to Municipal Systems Monitoring*. 15 czerwiec 2020. Publikacja dostępna na: <https://blog.paperspace.com/kando-and-paperspace-partner-to-bring-advanced-machine-learning-to-municipal-systems-monitoring/> [Dostęp 22 lipca 2020].

Kando: 2020 b. *Sensors and smart analytics for tracking illicit sewer connections hotspots*. Publikacja dostępna na: <https://www.digital-water.city/solution/sensors-and-smart-analytics-for-tracking-illicit-sewer-connections-hotspots/> [Dostęp 22 lipca 2020].

Kandu: 2020 c. *Kando Customer Success Stories*. Czerwiec 2020.

de Koning, M.: 2020. Osobista komunikacja. Royal HaskoningDHV. 19 czerwca 2020.

Lubbers, C.L., Icke, O., van Eijden, R., de Koning, M., Huising C. and de Wit R.: 2018. *Performance improvement of wastewater transport systems and treatment processes by performance monitoring and predictive control*. Materiały konferencyjne 12th European Waste Water Management Conference, 17-18 lipca 2018, Manchester (Wielka Brytania), zorganizowanej przez Aqua Enviro.

Mechefske, C.K. (2005). Machine Condition Monitoring and Fault Diagnosis, Rozdział 25. W: de Silva, C.W. (edytor). *Vibration and Shock Handbook*. Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor and Francis Group.

Mitchell, J. S. (1978). *Bearing diagnostics: An overview*, Winter Annual Meeting, 10-15 grudnia 1978, str 15-24, San Francisco: American Society of Mechanical Engineers.

Passos, C.: 2020. Osobista komunikacja. Dynamox. 16 lipca 2020.

Piotrowski, J. (2007). *Shaft alignment handbook, Trzecia Edycja*. Boca Raton FL: CRC Press, a Taylor & Francis Group 2007.

PN-ISO 55000:2017: *Zarządzanie aktywami -- Informacje ogólne, zasady i terminologia*, Polski Komitet Normalizacyjny.

RHDHV: 2020. Aquasuite. White paper: *Introducing the water industry's virtual operator which never sleeps. Freeing up your operational team's time for high value tasks*. Royal HaskoningDHV. Publikacja dostępna na: https://analytics-eu.clickdimensions.com/royalhaskoningdhvcom-agyu4/pages/m0sryp6feeqiwbqvrccvq.html?utm_source=Water-for-Industry-securing-business-continuity&utm_medium=AI-POWERED-VIRTUAL-OPERATOR&utm_campaign=Water-for-Industry [Dostęp 23 lipca 2020].

RHDHV: 2020 b. *Aquasuite PURE*. Royal HaskoningDHV. Publikacja dostępna na: <https://aquasuite.ai/en/products/pure/>

RHDHV: 2020 c. Achieving automated operations and data driven insights from water reuse, *waterwastewaterasia.com*. Royal HaskoningDHV. Styczeń / luty 2020, str. 24-25.

Sedlak, D.: 2015. *Water 4.0: The Past, Present, and Future of the World's Most Vital Resource*. New Haven: Yale University Press, Dodruk (31 marca 2015).

SKF: 2020. *AI for wastewater treatment Big Data's untapped potential for Water / Wastewater*. Publikacja dostępna na: <https://industrial-ai.skf.com/ai-for-wastewater-treatment/> [Dostęp 8 czerwca 2020].

Steutel-Marón, A.: 2019. *How Big Data enables smart collection systems and protects Wastewater Treatment Plants*. 2 grudnia 2019. Publikacja dostępna na: <https://medium.com/datadriveninvestor/how-big-data-enables-smart-collection-systems-and-protect-wastewater-treatment-plants-32595f6e6> [Dostęp 22 lipca 2020].

Steutel-Marón, A.: 2019b. *How to digitize your wastewater network with a smart water solution?* 17 stycznia 2019. Publikacja dostępna na: <https://medium.com/@annelisteutel/how-to-digitize-your-wastewater-network-with-a-smart-water-solution-1eebfb1b836> [Dostęp 22 lipca 2020].

Steward, K.: 2020. Real-time Wastewater Monitoring Enables Rapid COVID-19 Outbreak Detection, *Industry Insight*. 14 lipca 2020. Publikacja dostępna na: <https://www.technologynetworks.com/applied-sciences/blog/real-time-wastewater-monitoring-enables-rapid-covid-19-outbreak-detection-337391> [Dostęp 22 lipca 2020].

wodkany.pl: Publikacja dostępna na: <https://www.wodkany.pl/zasoby-wody-w-polsce-i-na-swiecie/> [Dostęp 11 czerwca 2020].

Xylem: *Harness the Power of Decision Intelligence. Driving Performance Improvement with Smarter Water*; brochure. Publikacja dostępna na: <https://www.xylem.com/en-us/campaigns/act/decision-intelligence/> [Dostęp 24 lipca 2020].

Xylem: 2019 b. *Cuxhaven, Germany. Reducing aeration energy usage by 26%, minimizing operational expenses, and reducing compliance risk by applying a decision intelligence approach*, case study leaflet. Publikacja dostępna na: <https://www.xylem.com/en-us/support/case-studies-white-papers/cuxhaven-germany-reducing-aeration-energy-usage-minimizing-operational-expenses-and-reducing-compliance-risk-by-applying-a-decision-intelligence-approach/> [Dostęp 24 lipca 2020].

Xylem: 2019 c. *City of South Bend, Indiana. Intelligent Urban Watershed™ technology reduces combined sewer overflow (CSO) volume by over 70% and saves South Bend estimated \$500 million in capital project work*, case study leaflet. Publikacja dostępna na: <https://www.xylem.com/en-us/support/case-studies-white-papers/south-bend-indiana-reduces-combined-sewer-overflow-70-percent-saves-500-million/> [Dostęp 24 lipca 2020].