

INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

www.ifj.edu.pl/publ/reports/2014/

Kraków, grudzień 2014

Raport Nr 2080/AP

**Badania osadów z wodomierzy Miejskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów
i Kanalizacji w Krakowie**

*M. Kopeć¹, M. Kąc¹, A. Budziak¹, C. Paluszkiewicz¹, A. Zarzycki¹,
S. Kąc², E. Dutkiewicz¹, W.M. Kwiatek¹, T.Cichoń³, T.Bochnia³*

¹Instytut Fizyki Jądrowej PAN, ul. Radzikowskiego 152, 31-342 Kraków

²AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

³Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji S.A., ul. Senatorska 1, 30-106 Kraków

*Praca została wykonana w ramach współpracy między Instytutem Fizyki Jądrowej im.
H. Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk a Miejskim Przedsiębiorstwem Wodociągów i
Kanalizacji Spółka Akcyjna w Krakowie. Badania częściowo sfinansowano z projektu NCN
2012/05/B/ST4/01150.*

Streszczenie

W ramach współpracy z Miejskim Przedsiębiorstwem Wodociągów i Kanalizacji w Krakowie przeprowadzono wstępne badania osadów pobranych z wodomierzy z sieci wodociągowej Krakowa. Osady tworzące się na urządzeniach pomiarowych zainstalowanych w sieci wodociągowej, stanowią poważny problem technologiczny a konieczność wymiany niesprawnych wodomierzy oznacza wymierny problem ekonomiczny dla zakładów wodociągowych. Przebadano 8 próbek identyfikując ich skład fazowy i chemiczny z wykorzystaniem metody fluorescencyjnej analizy rentgenowskiej, spektroskopii energodispersyjnej, dyfrakcji promieniowania rentgenowskiego i spektroskopii absorpcyjnej w podczerwieni. Ponadto przeanalizowano próbki pod kątem udziału faz magnetycznych opierając się na pomiarach mössbauerowskich. Morfologie wybranych próbek obserwowano na skaningowym mikroskopie elektronowym.

Powyższe metody pomiarowe ujawniły obecność faz amorficznych lub drobnokrystalicznych z udziałem kilkukrotnie większym niż zidentyfikowane fazy krystaliczne. W osadach w fazie krystalicznej najczęściej pojawiał się getyt α -FeOOH, lepidokrokit γ -FeOOH, a także w mniejszych ilościach magemit γ -Fe₂O₃, węglan wapnia CaCO₃ i kwarc SiO₂ oraz niestechiometryczne siarczki żelaza. W wielu próbkach wykazano także obecność fazy nanokrystalicznej, która na podstawie analizy porównawczej, została zidentyfikowana jako wodorotlenek żelaza ferrihydrit o wzorze zbliżonym do Fe₅HO₈·4H₂O. Ponadto stwierdzono także obecność hematytu α -Fe₂O₃ i akagenitu β -FeOOH. W kilku analizowanych próbkach stwierdzono zawartość związków organicznych.

Abstract

In the frame of cooperation with the Municipal Water Supply and Sewage in Krakow the preliminary studies of sediments from water meters of Krakow water supply system were performed. Sediments deposited on the measuring devices installed in the water supply system, are a major technological problem and the need to replace faulty water meters is a measurable economic problem for water utilities. Chemical and phase composition investigations were carried out using proton-induced X-ray emission, energy dispersive spectroscopy, X-ray diffraction and Fourier transform infrared spectroscopy. Additionally, basing on Mössbauer spectroscopy magnetic phases were analyzed. The morphology of the chosen samples was observed on scanning electron microscopy.

Mentioned methods revealed presence of amorphous and finely crystalline phases with fractions several times larger than identified crystalline one. In the crystalline phase the most frequently appeared: goethite α -FeOOH, lepidocrocite γ -FeOOH, and in smaller amounts: maghemite γ -Fe₂O₃, calcium carbonate CaCO₃ and quartz SiO₂ as well non-stoichiometric iron sulfides. In many samples nanocrystalline phase was found which due to comparative analysis, was identified as an iron hydroxide ferrihydrite with formula similar to Fe₅HO₈·4H₂O. Moreover, presence of hematite α -Fe₂O₃ and akaganeite β -FeOOH phases was revealed. In several samples appearance of organic compounds were proven.

Główną przyczyną powstawania osadów w tak złożonych układach jak sieci wodociągowe, są procesy korozji elektrochemicznej i mikrobiologicznej. Próbkę do badań pobrano z wodomierzy, dostarczonych w 2014 roku przez Miejskie Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji w Krakowie. Wodomierze zostały wymontowane z sieci wodociągowej Krakowa z powodu awarii (zatrzymanie licznika, błędne wskazania), spowodowanych nadmierną ilością osadów, powstających zarówno na elementach ruchomych (łopatki wirnika) jak i na innych wewnętrznych częściach. Wodomierze do badań otrzymano w postaci suchej z wyjątkiem wodomierza przemysłowego (próbka W9), który został przebadany w Centralnym Laboratorium MPWiK w Krakowie na obecność mikroorganizmów w osadzie, a następnie przekazany do IFJ PAN, gdzie po wysuszeniu pobrano materiał do badań.

Przeanalizowano 8 próbek pobranych z wodomierzy zamontowanych w różnych miejscach sieci wodociągowej MPWiK w Krakowie. Próbkę przebadano pod względem morfologii (skaningowa mikroskopia elektronowa – SEM), składu chemicznego (fluorescencyjna analiza rentgenowska wzbudzana wiązką protonów – PIXE, spektroskopia energodispersyjna – EDS), składu fazowego (dyfrakcja promieniowania rentgenowskiego – XRD, spektroskopia absorpcyjna w podczerwieni – FTIR) oraz analizy faz magnetycznych (spektroskopia mössbauerowska). W tabeli 1 przedstawiono opis próbek wraz z miejscem pobrania i wykonanymi badaniami.

Tabela 1. Opis próbek wraz z miejscem pobrania i wykonanymi badaniami.

Lp.	Nazwa próbki	Miejsce pobrania (1)	SEM (2)	EDS (3)	PIXE (4)	XRD (5)	MS (6)	FTIR (7)
1	W1	Ul. Bałuckiego 30			X		X	X
2	W2	Ul. Kurczaba 4	X	X		X	słaby sygnał	
3	W3	Wodomierz ϕ 80mm			X	X	X	X
4	W4	Ul. Radzikowskiego 106d				X	X	X
5	W5	Ul. Dąbrowskiego 23				X	X	X
6	W7	Ul. Siewna 54	X	X		X	X	
7	W8	Ul. Sołtysowska 12a				X	X	
8	W9	Ul. Wybickiego 32	X	X	X	X	X	

W dalszej części raportu przedstawione zostaną wyniki badań dla poszczególnych próbek z zachowaniem sekwencji przedstawionej w tabeli 1:

1. Opis postaci próbki i miejsca pobrania (podano także stan magnetyczny proszku wyznaczony po umieszczeniu proszku w obszarze pola magnetycznego (ok.60 mT) magnezu ferrytowego) – **INFO**
2. Wyniki badań na skaningowym mikroskopie elektronowym – **SEM**
3. Wyniki badań składu chemicznego z wykorzystaniem spektroskopii energodispersyjnej – **EDS**
4. Wyniki badań składu pierwiastkowego z wykorzystaniem fluorescencyjnej analizy rentgenowskiej wzbudzonej wiązką protonów (2 MeV) z akceleratora liniowego typu Van de Graaffa; układ pomiarowy pozwala na analizę pierwiastków z liczbą Z powyżej 13; do kalibracji wykorzystano zewnętrzny standard SD-N-1/2 (Marine sediment) – **PIXE**
5. Wyniki badań składu fazowego na dyfraktometrze z lampą miedzianą – **XRD**
6. Analiza fazy magnetycznej. Badania wykonano na źródle 100 mCi Co⁵⁷, w temperaturze pokojowej, w geometrii transmisyjnej – **MS**
7. Analiza fazowa tlenków i związków organicznych w zakresie środkowej podczerwieni 400 – 4000 cm⁻¹ przeprowadzona techniką transmisyjną, ze zdolnością rozdzielczą 4cm⁻¹ – **FTIR**

Próbka W1

INFO

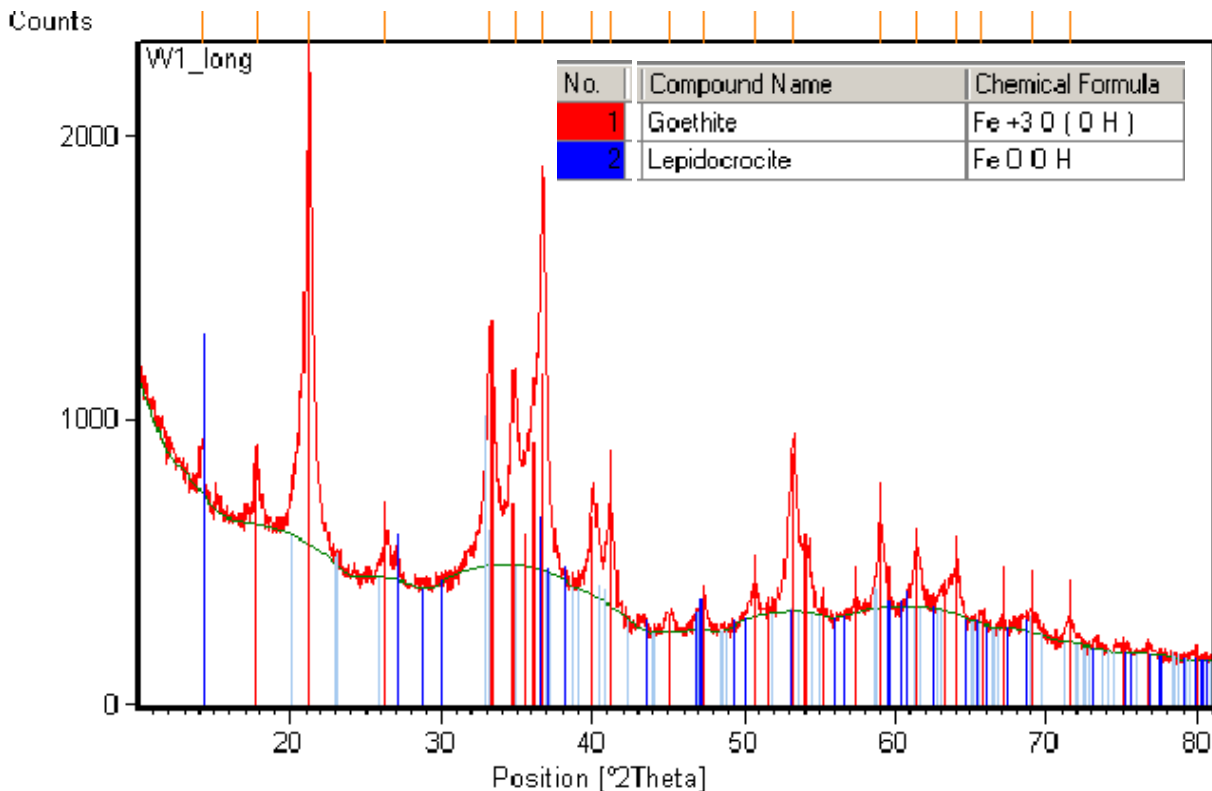
Próbkę otrzymano w postaci proszku pobranego z wodomierza z ul. Bałuckiego 30. Proszek o kolorze brązowym przed pomiarami był ucierany w moździerzu. Magnes nie powoduje przemieszczania proszku.

PIXE

W badanej próbce zidentyfikowano żelazo pojawiające się z około 50% udziałem, ponadto z udziałem poniżej 1% zarejestrowano potas, wapń i mangan. Próbka W1 zawiera także śladowe ilości Cu i Zn (na poziomie ppm). Z powodu silnego oddziaływania elektrostatycznego analiza pików pochodzących od Al, Si, P, S i Cl była niemożliwa na tle bardzo dużego tła ciągłego promieniowania rentgenowskiego, co nie wyklucza ich ewentualnej obecności.

XRD

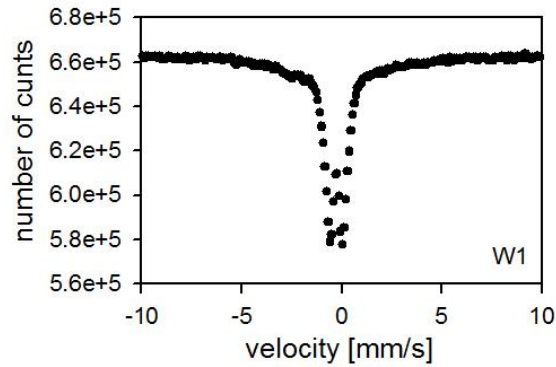
Na rysunku 1 przedstawiono dyfraktogram próbki W1. Widoczne są liczne piki wskazujące na dobrze wykrystalizowane fazy oraz wysoki poziom tła, informujący o znacznym udziale fazy amorficznej. Wstępne oszacowania udziału fazy krystalicznej i amorficznej pozwalają przyjąć, że atomowo fazy amorficznej jest dwukrotnie więcej. Do pików dopasowano getyt i lepidokrokit, natomiast nie stwierdzono obecności krystalicznego kwarcu.



Rys. 1. Dyfraktogram próbki proszkowej W1.

MS

Na rysunku 2 przedstawiono widmo mössbauerowskie zmierzone w transmisji dla próbki proszkowej W1. Widoczny na widmie dublet we wstępnej analizie numerycznej jest opisany poprzez rozszczepienie kwadrupolowe o wartości $QS = 1.2$ mm/s z niewielkim przesunięciem izomerycznym.

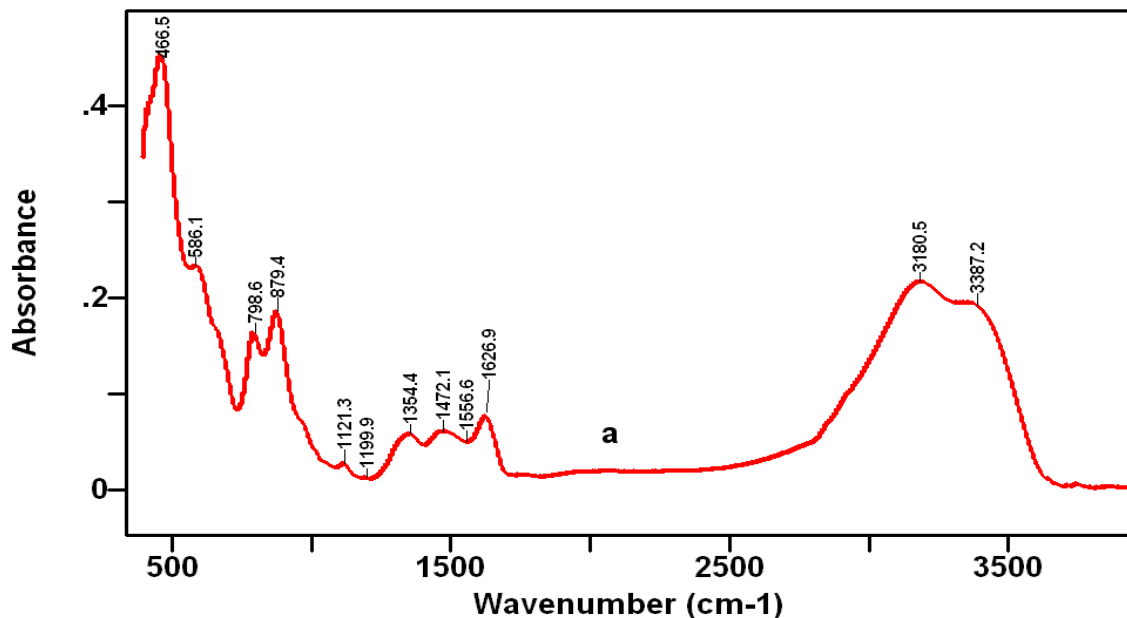


Rys. 2. Widmo mössbauerowskie próbki W1, pomiar w temperaturze pokojowej.

Taki obraz może wskazywać na obecność syderytu (FeCo_3) lub innych wysoko dyspersyjnych faz magnetycznych, które nie dają rozszczepienia magnetycznego w temperaturze pokojowej sugerując superparamagnetyczny stan próbki.

FTIR

Na rysunku 3 przedstawiono widmo FTIR próbki W1. Widmo przedstawia pasma charakterystyczne dla ugrupowań tlenków i wodorotlenków żelaza takich jak hematyt - $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$, getyt - $\alpha\text{-FeOOH}$, akagenit - $\beta\text{-FeOOH}$ oraz lepidokrokit - $\gamma\text{-FeOOH}$. Intensywne pasmo ok. 466cm^{-1} oraz przegięcie ok. 580cm^{-1} są typowe dla wszystkich wymienionych struktur. Dublet pasm 795 i 980cm^{-1} może świadczyć o obecności getytu $\alpha\text{-FeOOH}$ jak i lepidokrokitu $\gamma\text{-FeOOH}$. Istnienie ostatniej struktury potwierdzają również pasma drgań rozciągających grup OH ok. 3180cm^{-1} oraz 3390cm^{-1} . Zestaw pasm w zakresie $1200\text{-}1700\text{cm}^{-1}$ może wskazywać na domieszkę odmiany $\beta\text{-FeOOH}$.



Rys. 3. Widmo FTIR próbki W1.

Podsumowanie

Wstępna analiza składu pierwiastkowego próbki W1 wskazuje na obecność Fe (50%), oraz potasu, wapnia i manganu na poziomie 1%. Zidentyfikowano także śladowe ilości miedzi i cynku. W próbce zaobserwowano obecność fazy krystalicznej w postaci getytu i lepidokrokitu, a także znaczny udział fazy amorficznej (ok. 2 razy więcej niż krystalicznej). Analiza badań w podczerwieni wykazała prawdopodobną obecność hematytu, getytu, akagenitu i lepidokrokoiu. Brak wyraźnej fazy

magnetycznej w widmie MS może wskazywać na wysokie rozdrobnienie krystalitów (efekt superparamagnetyczny). Wartości QS mogą sugerować także obecność syderytu (FeCo_3), ale do weryfikacji tego wyniku konieczne będzie wykonanie pomiarów mössbauerowskich w niskich temperaturach (NT i niżej). Pozorna rozbieżność wyników związana jest z czułością badań FTIR zarówno na fazę krystaliczną jak i wysoce rozdrobnione krystality oraz fazę amorficzną. Może to być powodem, dla którego nie zarejestrowano tych faz w widmie XRD. Rozdrobnienie może też być powodem braku mierzalnych efektów rozszczepienia magnetycznego w widmie MS.

Próbka W2

INFO

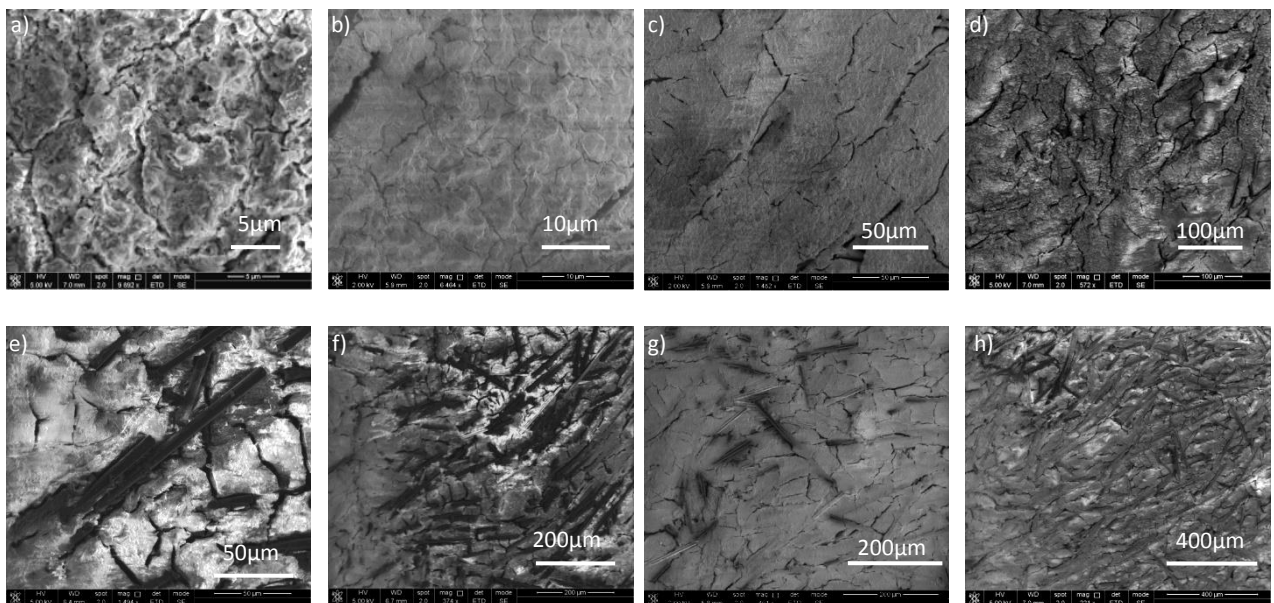
Wodomierz był zainstalowany na ul. Kurczaba 4. Elementy do badań otrzymano w postaci obciętych fragmentów wodomierza (łopatki wirnika, tulejka stalowa, tulejka z tworzywa sztucznego), pokrytych rudoczerwonym osadem.



Rys. 4. Zdjęcie przedstawiające elementy wodomierza z którego odcięto badane fragmenty.

SEM

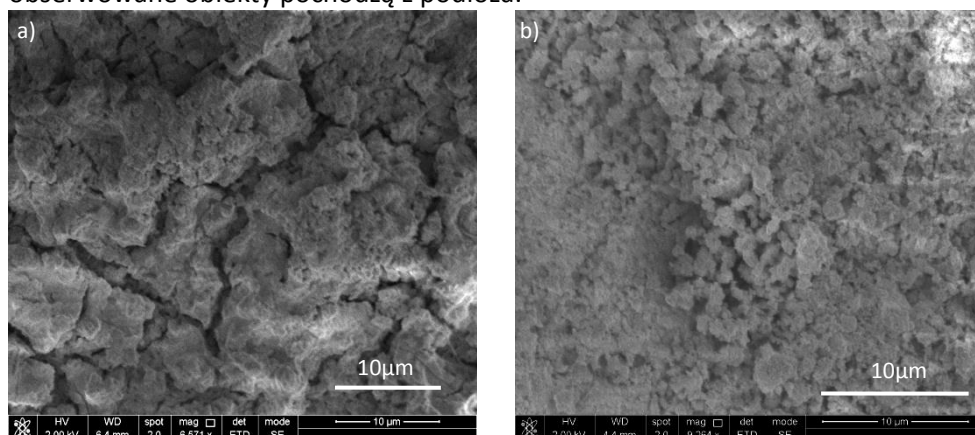
Na rysunku 5 przedstawiono obraz SEM z widocznymi spękanymi, narastającymi, w sposób warstwowy, osadami zaobserwowanymi na powierzchni tulejki z tworzywa sztucznego. Stan tego osadu w większej skali przedstawiono na rysunku 4b, 4c i 4d. Liczne spękania osadu powstały



Rys. 5. Obrazy SEM osadu na powierzchni tulejki z tworzywa sztucznego.

najprawdopodobniej po wysuszeniu. Ponadto na obrazach 3d, 3e i 3f można zaobserwować podłużne obiekty w formie regularnych struktur o średnicy około 8 μm zatopionych w osadzie.

Podobnie wyglądające osady zaobserwowano na łopatkach wirnika (rys. 6a) i stalowej tulejce (rys 6b). Struktury widoczne na tulejce z tworzywa sztucznego nie pojawiły się, co może wskazywać, że obserwowane obiekty pochodzą z podłoża.



Rys. 6. Obrazy SEM łopatek wirnika (a), oraz powierzchni tulejki stalowej (b).

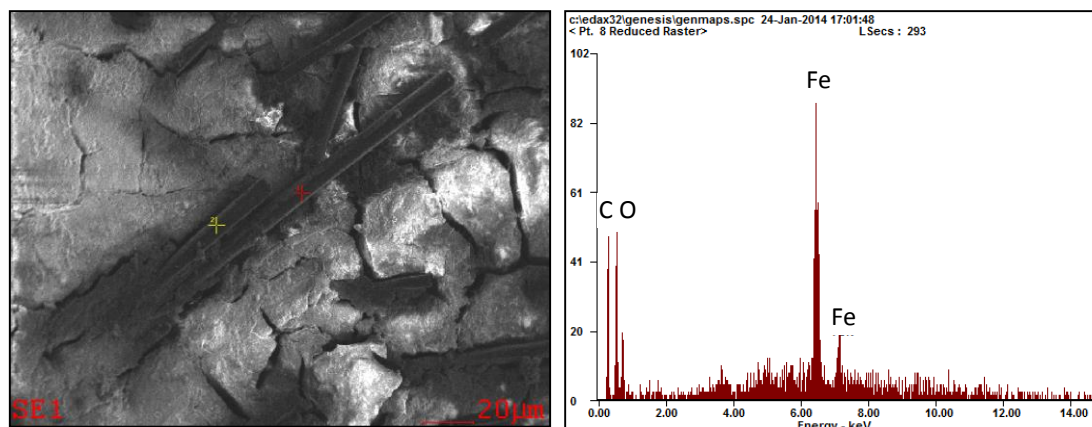
EDS

Przeprowadzono także analizę chemiczną (metodą EDS) elementów wodomierza. Jej wyniki przedstawioną w tabeli 2. Analiza nie uwzględnia obecności węgla, a zawartość innych pierwiastków lekkich obarczona jest dużym błędem. Poza tlenem w próbce stwierdzono dużą zawartość chromu (19%) oraz niklu (24%). Zarejestrowano także niewielkie ilości krzemu, (3%) molibdenu (2%) i niobu (1%). W badanej próbce stwierdzono bardzo niską zawartość żelaza (1%).

Tabela 2. Wodomierz z ul. Kurczaba 4 - skład chemiczny osadu na tulejce z tworzywa sztucznego, analizowany metodą EDS.

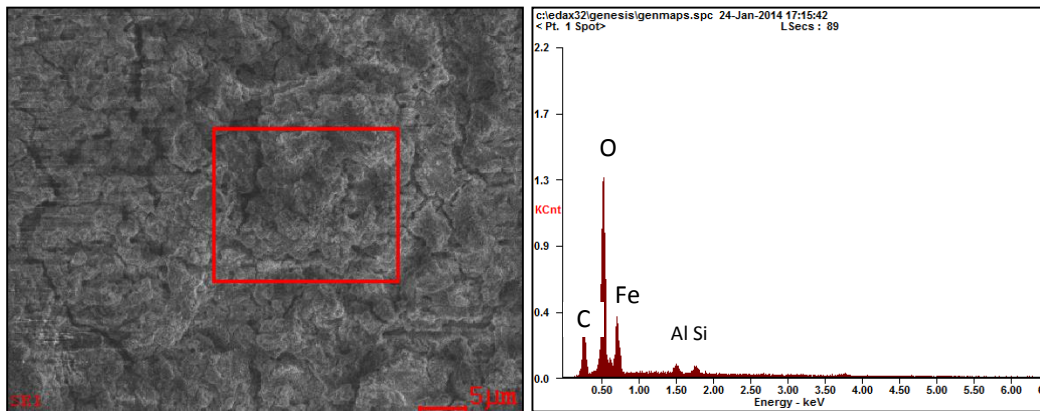
Obszary		% atomowe							
		O	Al	Si	Nb	Mo	Cr	Fe	Ni
tulejka z tworzywa sztucznego	1	52	-	4	2	2	19	1	20
	2	49	1	3	1	2	19	1	24
	3	49	-	3	1	2	19	1	25
	4	50	-	1	1	2	20	1	24
	5	50	-	2	1	2	19	1	25
	6	48	-	3		3	19	1	26
	Śr.	50	0	3	1	2	19	1	24

Przeprowadzono także analizę bezpośrednią w obszarze struktur widocznych na obrazie 5e (rys.7), która wskazała na obecność węgla, tlenu i żelaza (udział węgla był dominujący). Z uwagi na małą czułość zastosowanego detektora EDS na pierwiastki lekkie, nie podano analizy ilościowej.

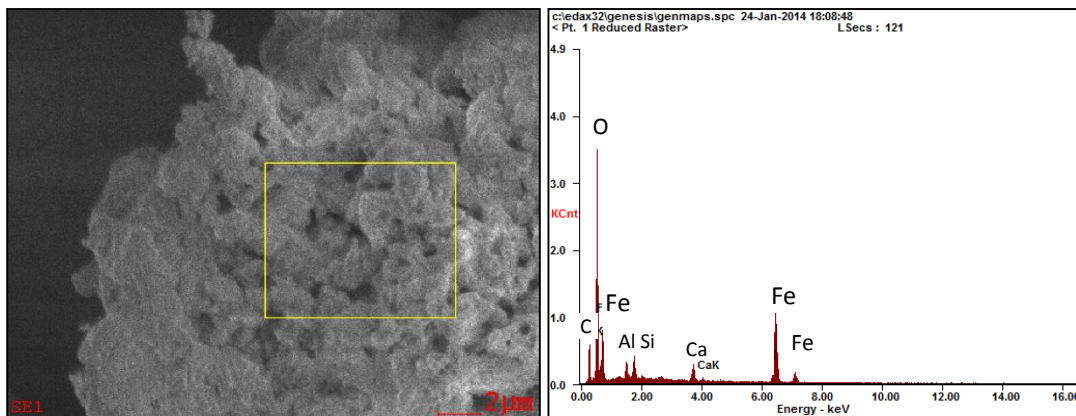


Rys. 7. Wodomierz z ul. Kurczaba 4 - analiza składu chemicznego wydłużonych obiektów zaobserwowanych na tulejce z tworzywa sztucznego

Analizę składu chemicznego osadu na łopatkę wirnika i na stalowej tulejce przeprowadzono w sposób jakościowy. Na powierzchni łopatki wirnika zaobserwowane zostały pikiny pochodzące od węgla, tlenu i żelaza oraz niewielkie ilości aluminium i krzemu (rys. 8). Na powierzchni stalowej tulejki stwierdzono obecność węgla, tlenu, żelaza, aluminium, krzemu i wapnia (rys. 9).



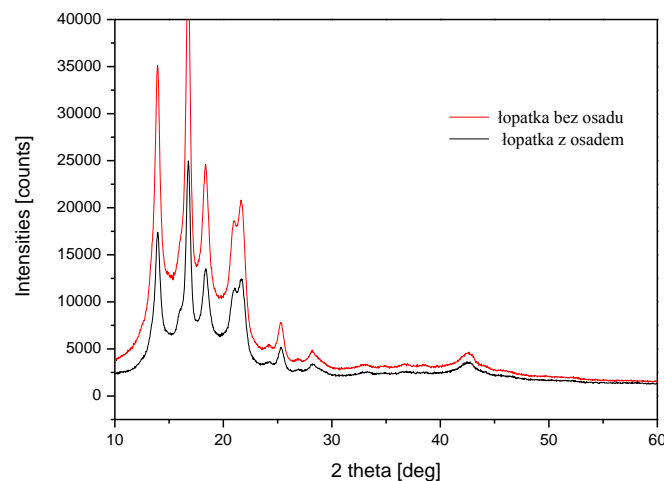
Rys. 8. Analiza składu chemicznego osadu na łopatkę wirnika.



Rys. 9. Analiza składu chemicznego osadów na stalowej tulejce.

XRD

W badaniach rentgenowskich wykonano analizę osadu na powierzchni łopatki. Rysunek 10 przedstawia dyfraktogram łopatki z osadem i czystej łopatki po usunięciu osadu. Poza pikami związanymi z materiałem łopatki, w widmie nie zaobserwowano żadnych dodatkowych pików pochodzących od osadu.



Rys. 10. Dyfraktogramy łopatek wirnika wodomierza z ul. Kurczaba4.

Może to wskazywać na wysokie rozdrobnienie krystalitów lub/i na występowanie osadów w postaci fazy amorficznej.

Z uwagi na geometrię pomiaru nie było możliwości przeprowadzenia badań tulejek.

MS

Osad na łopatkę wirnika został poddany także badaniom mössbauerowskim, ale ze względu na bardzo dużą absorpcję kwantów γ przez materiał łopatki nie udało się zebrać widma z tak przygotowanej próbki.

Podsumowanie

Badanie osadu bezpośrednio na podłożu jest utrudnione, a w przypadku wielu technik niemożliwe, pozwala jednak zaobserwować stan najbliższy warunkom powstawania osadu. Analiza morfologii wskazuje na warstwowo narastające osady, które na dużych powierzchniach tworzą stosunkowo gładką, ale spękaną warstwę. Obserwowane spękania powstały najprawdopodobniej w czasie wysychania osadu. Taka struktura osadów pojawia się na każdym z obserwowanych elementów wodomierza. Analiza składu chemicznego wykonana z wykorzystaniem spektrometru EDS, dostarcza informacji z mikroobszarów, wobec powyższego nie można jej interpretować jako uśrednionej w skali całej próbki. Skład chemiczny osadu na powierzchni łopatki wirnika i stalowej tulejki, wskazuje na obecność węgla, tlenu, żelaza, aluminium i krzemu. Dodatkowo na powierzchni stalowej tulejki zaobserwowano także niewielkie ilości wapnia. Szczegółowa analiza ilościowa przeprowadzona dla osadu na tulejce z tworzywa sztucznego, wskazuje także na znaczny udział chromu i niklu. Ponadto na tej tulejce zaobserwowano regularne obiekty w postaci wydłużonych struktur o średnicy około 8 μm , których analiza chemiczna wskazuje na obecność węgla, tlenu i żelaza. W pomiarach mössbauerowskich i rentgenowskich elementów wodomierza nie uzyskano widm pochodzących od osadów.

Próbka W3

INFO

Osad pobrano z wewnętrznej części obudowy wodomierza przemysłowego o śr. 80 mm. Osad ma kolor rudobrazowy. Proszek silnie oddziałuje z polem magnetycznym magnesu ferrytowego.

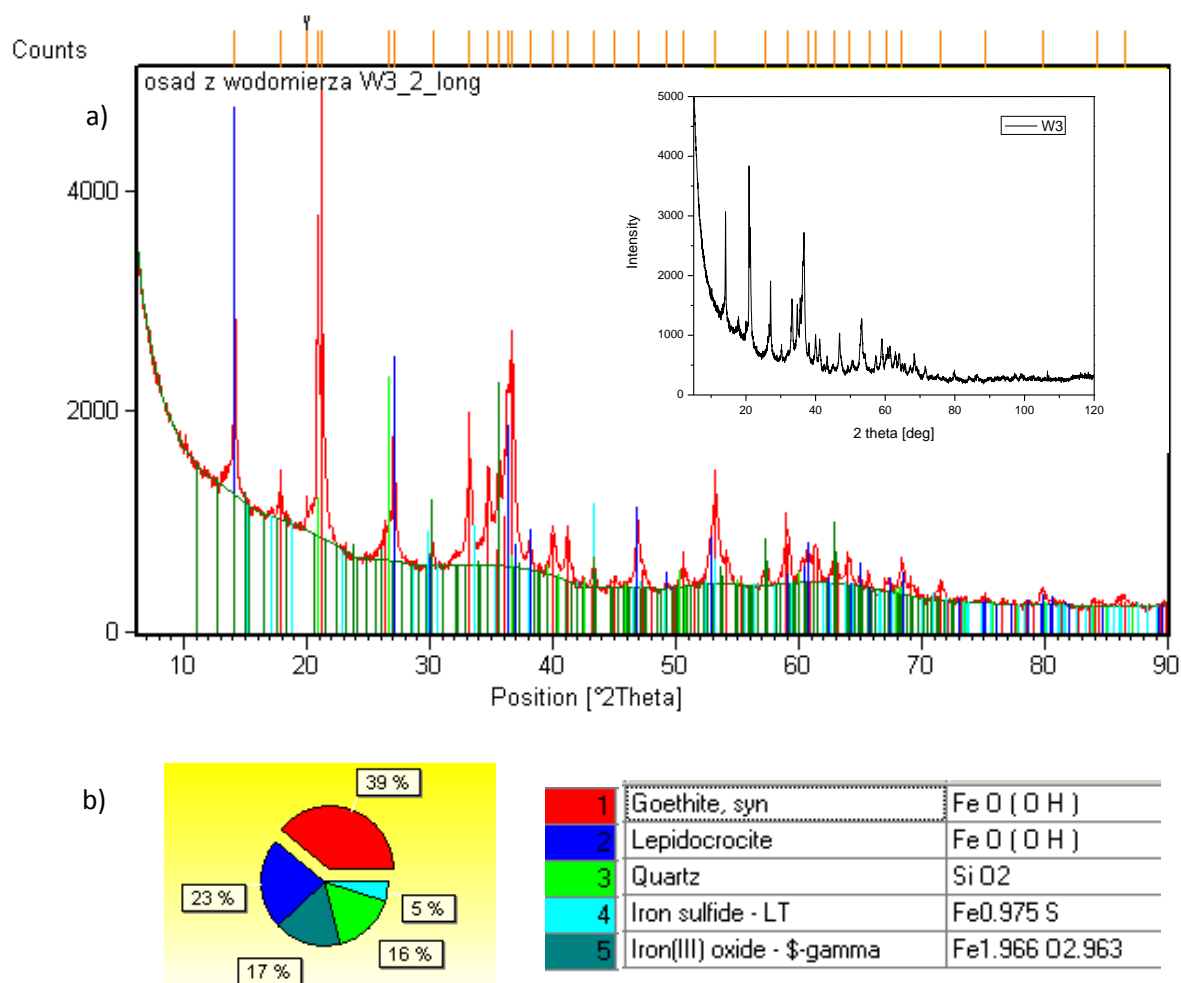
PIXE

Próbka W3 zawiera głównie Fe na poziomie około 50%. W odróżnieniu od próbki W1 zarejestrowano w niej obecność Si – 16% i P – 2%. Ponadto na poziomie poniżej 1% pojawiają się siarka, chlor, potas, wapń i mangan. W próbce stwierdzono także obecność śladowych ilości Cu i Zn (na poziomie ppm).

XRD

Na rysunku 11a przedstawiono dyfraktogram proszku z wodomierza W3. W okienku rysunku, dla lepszej czytelności, zamieszczono dyfraktogram bez przypisanych linii. Pojawiające się piki zostały przypisane fazom, których udziały graficzne pokazano na rysunku 11b. Duży poziom tła wskazuje, że oprócz wstępnie dopasowanych faz krystalicznych w próbce występuje także faza amorficzna, której udział w stosunku do fazy krystalicznej jest około trzykrotnie większy.

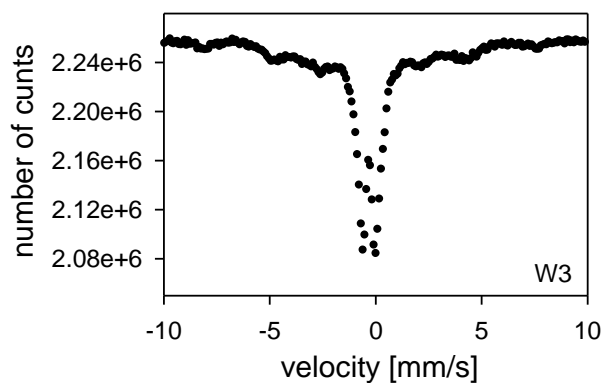
Przeprowadzona analiza wskazuje, że w próbce w fazie krystalicznej, dominuje getyt α -FeOOH (39%) i lepidokrokit γ -FeOOH (23%), a także w mniejszych ilościach pojawia się magemit γ -Fe₂O₃ (17%) i kwarc SiO₂ (16%) oraz niestechiometryczne siarczki żelaza (5%).



Rys. 11. Dyfraktogram próbki W3 (z okienkiem przedstawiającym dyfraktogram bez dopasowania) wraz z liniami przypisanymi fazom (a), których udziały zostały przedstawione graficznie (b) oraz opisane w tabeli.

MS

Na rysunku 12 przedstawiono widmo mössbauerowskie próbki W3. Pomiar wykonano w temp. pokojowej. W próbce dominuje dublet z rozszczepieniem kwadrupolowym $QS = 1.2$ mm/s. Tak duże rozszczepienie kwadrupolowe może wskazywać na obecność syderytu $FeCO_3$ lub może pochodzić od wysoko rozdrobnionej fazy magnetycznej. Udział tej składowej jest na poziomie około 50%.



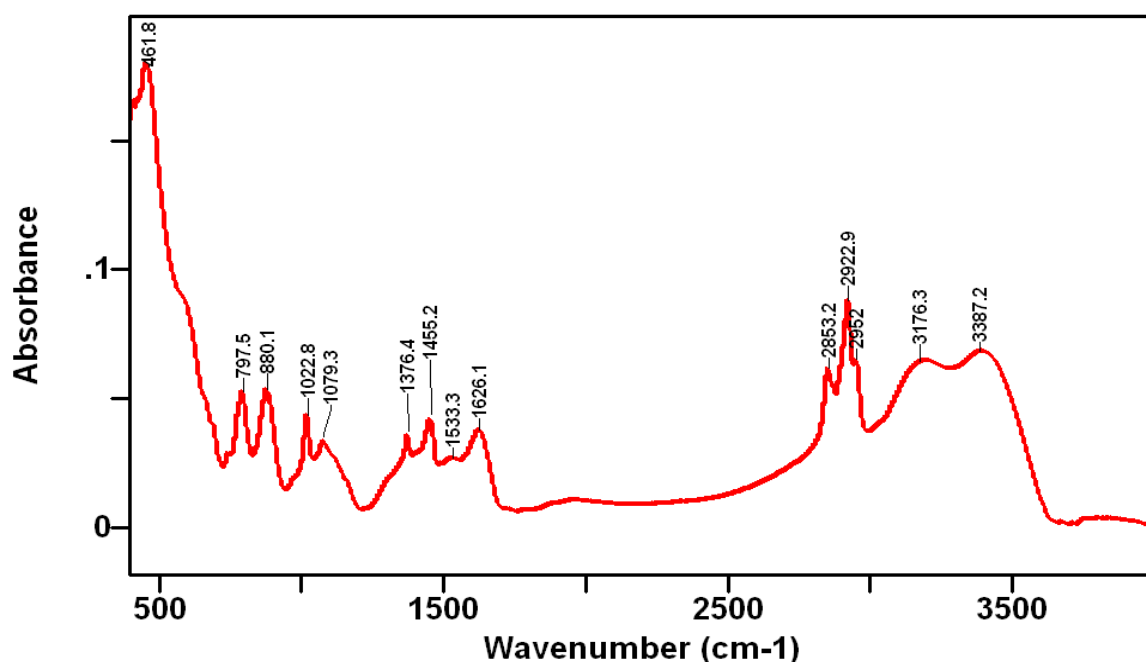
Rys. 12. Widmo mössbauerowskie próbki proszkowej W3 w temperaturze pokojowej.

Ponadto odnotowano także niewielkie ilości składowych magnetycznych o wartościach rozszczepienia zeemanowskiego równych 10T, 25T i 49T. Obecność składowej o wartości rozszczepienia magnetycznego na poziomie 49T potwierdza obecność magemitu γ -Fe₂O₃. Składowa 25T może być związana z niestechiometrycznym związkiem żelaza i siarki – pirotynem (24T-31T). Poszerzenie linii dla składowych przy około 10T nie pozwala na jednoznaczne przypisanie żadnej fazy.

Ze względu na bardzo mały udział składowych magnetycznych i szerokie rozkłady nie można wykluczyć obecności getytu (33T-38T). Lepidokrokit γ -FeOOH w temperaturze pokojowej jest charakteryzowany poprzez rozszczepienie kwadrupolowe (QS = 0.5-0.6 mm/s). Nie można więc dominującego w badanej próbce dubletu przypisać do tej fazy, niemniej jednak takie rozszczepienie kwadrupolowe daje się dopasować w zmierzonym widmie, co świadczy o tym, że taka faza może występować w próbce. Powyższe wątpliwości można wyjaśnić po wykonaniu pomiarów mössbauerowskich w niskich temperaturach.

FTIR

Widmo FTIR próbki W3 przedstawiono na rysunku 13. Charakteryzuje się ono pasmami o dużej szerokości połówkowej 460, 798, 880, 1626, 3176, 3387cm⁻¹, świadczącymi o obecności tlenków żelaza takich jak hematyt α -Fe₂O₃, getyt α -FeOOH, akagenit β -FeOOH oraz lepidokrokit γ -FeOOH. Ponadto można zauważyć, że w widmie tym występują „ostre” pasma (o mniejszej szerokości połówkowej) w zakresie 2800-300cm⁻¹ jak i w zakresie 1300-1650 cm⁻¹. Obecność tych pasm świadczy o występowaniu charakterystycznych drgań zarówno rozciągających jak i zginających grup CH₃ oraz CH₂ występujących w związkach organicznych.



Rys. 13. Widmo FTIR próbki W3.

Podsumowanie

Analiza składu pierwiastkowego próbki W3 wskazuje na obecność Fe – 50%, Si – 16% i P – 2%. Ponadto na poziomie poniżej 1% pojawiają się: siarka, chlor, potas, wapń i mangan. W próbce stwierdzono także obecność śladowych ilości miedzi i cynku. Próbka W3 posiada liczne, dobrze wykrystalizowane fazy obserwowane na dyfraktogramie, których obecność została częściowo potwierdzona pomiarami mössbauerowskimi. W osadach, w fazie krystalicznej, dominuje getyt (39%), oraz lepidokrokit (23%), magemit (17%) i kwarc (16%), pojawiają się także niestechiometryczne siarczki żelaza (5%). Badania mössbauerowskie wskazują na prawdopodobną obecność syderytu, magemitu i pirotynu, ale nie można także wykluczyć getytu i lepidokrokitu. Obecność szerokiej gamy tlenków potwierdzają widma FTIR, w których zidentyfikowano piki

pochodzące od hematytu, getytu, akagenitu i lepidokrokitu. Badania FTIR wskazują także na obecność grup CH_3 oraz CH_2 charakterystycznych dla związków organicznych.

Próbka W4

INFO

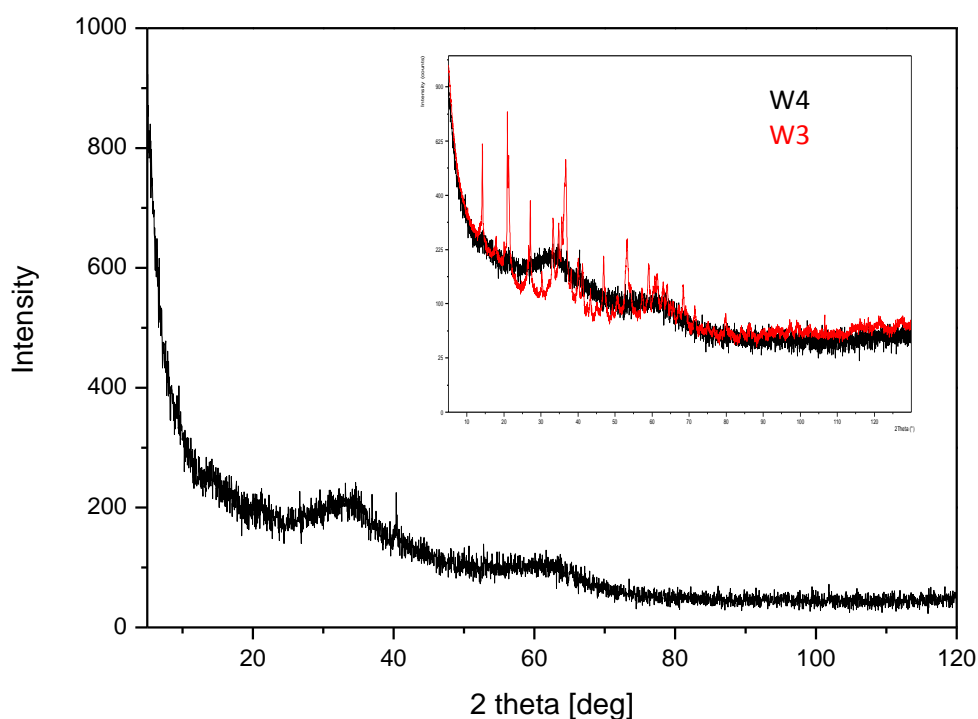
Próbkę otrzymano z pobrania osadu z łopatek wirnika (rys. 14) z wodomierza zamontowanego na ul. Radzikowskiego 106d (stoi liczydło). Zebrany osad nie oddziałuje z polem magnetycznym.



Rys. 14. Zdjęcie przedstawiające elementy wodomierza, z którego pobrano osad.

XRD

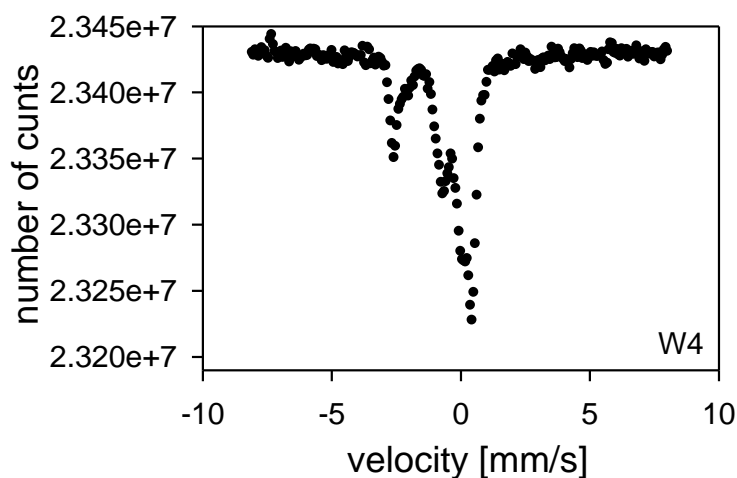
Na rysunku 15 przedstawiono dyfraktogram próbki W4. Brak wąskich pików wskazuje, że w próbce zawarte są głównie fazy amorficzne lub krystaliczne o wysokim stopniu rozdrobnienia (poniżej 5 nm). Położenia bardzo szerokich maksimów odpowiadają niektórym pikom z próbki W3, co może oznaczać, że skład fazowy tych dwóch próbek jest częściowo zbieżny. Istotną różnicę stanowi stopień wykrywania tych faz (okienko rysunku 15). Poszerzone maksima w próbce W4 można zinterpretować także, na podstawie analizy porównawczej [M. Michel et al. Science 316(2007)1726] jako nanokrystaliczny wodorotlenek żelaza - ferrihydryt o wzorze zbliżonym do $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Charakterystyczne zafalowania w widmie W3, zgodne co do pozycji maksimów z W4 wskazują, że ferrihydryt może występować również w próbce W3.



Rys. 15. Dyfraktogram próbki W4 wraz z okienkiem przedstawiającym porównanie próbek W3 i W4.

MS

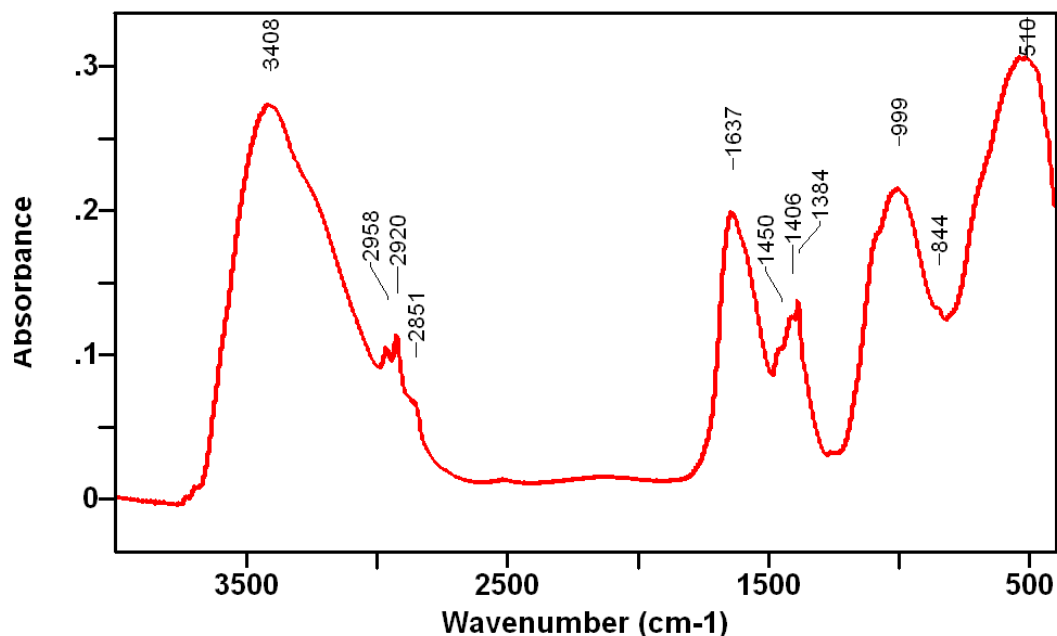
Na rysunku 16 przedstawiono widmo mössbauerowskie próbki W4. Widmo nie zostało jeszcze dopasowane.



Rys. 16. Widmo mössbauerowskie próbki proszkowej W4, pomiar w temperaturze pokojowej.

FTIR

Na rysunku 17 przedstawiono widmo FTIR próbki W4. Wstępna analiza wskazuje na obecność fazy amorficznej. W próbce występuje dużo wody w postaci krystalicznej. Widoczne są także piki charakterystyczne dla związków organicznych. W badanym materiale pojawiły się również piki świadczące o śladowych ilościach krzemionki.



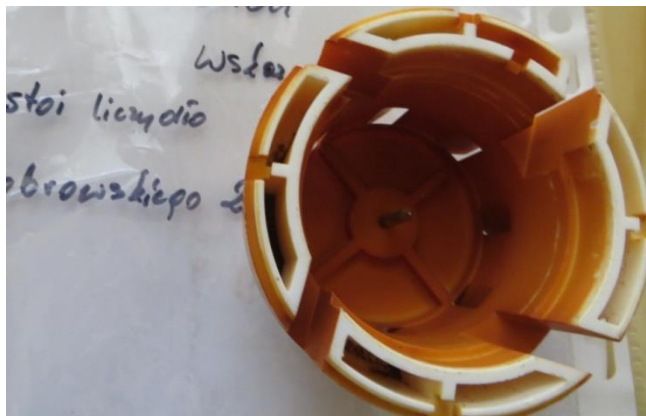
Rys. 17. Widmo FTIR zmierzone dla próbki W4.

Podsumowanie

Wstępne wyniki badań wskazują na pewne podobieństwa w składzie fazowym do próbki W3, istotną różnicę stanowi stopień wykrystalizowania. Przeprowadzona analiza porównawcza wskazuje na obecność nanokrystalicznego wodorotlenku żelaza - ferrihydrytu o wzorze zbliżonym do $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. Proszek zawiera niewielkie ilości związków organicznych i krzemionki.

Próbka W5**INFO**

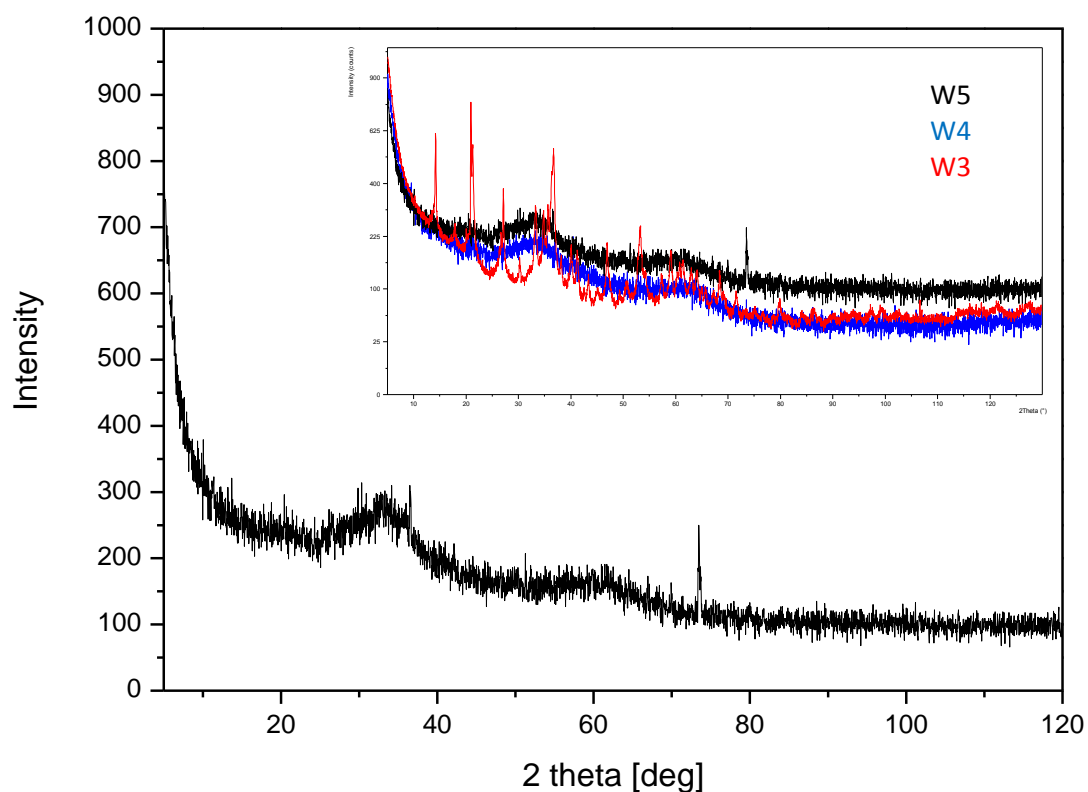
Próbkę stanowi osad zebrany z wewnętrznej części obudowy (rys. 18) wirnika wodomierza (WS-25) zamontowanego na ul. Dąbrowskiego 23 (stoi liczydło). Zebrany osad miał kolor rudoczerwony i nie zaobserwowano reakcji na zmiany pola magnetycznego.



Rys. 18. Zdjęcie przedstawiające obudowę wodomierza, z której pobrany został osad.

XRD

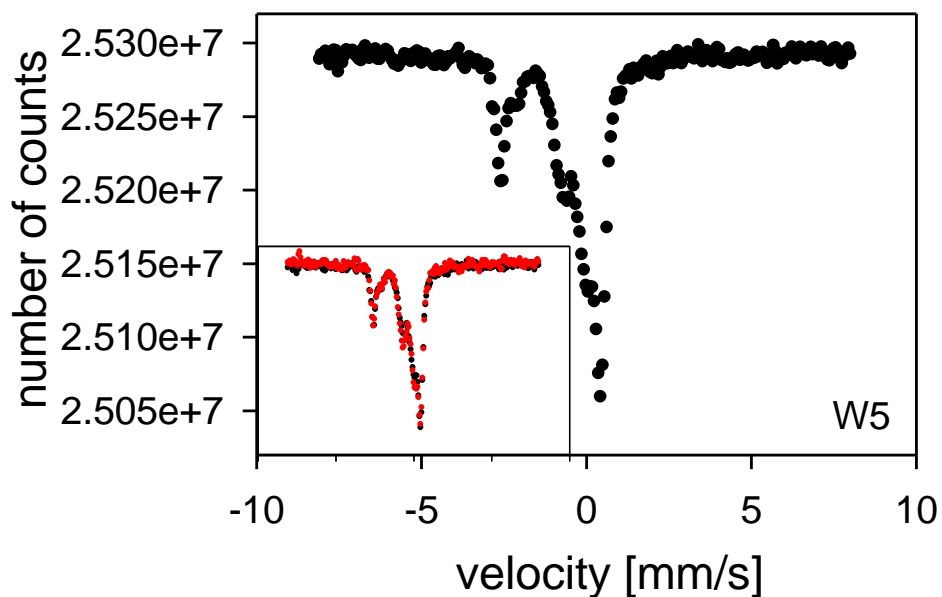
Dyfraktogram próbki W5 przedstawiony na rysunku 19, jest bardzo podobny do dyfraktogramu próbki W4. W próbkach tych dominują fazy amorficzne i drobnokrystaliczne o czym świadczy wysokie tło na dyfraktogramach i znaczne poszerzenie pików. Dwa szerokie maksima obecne w widmach wskazują na obecność nanokrystalicznego wodorotlenku żelaza - ferrihydru o wzorze zbliżonym do $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.



Rys. 19. Dyfraktogram próbki W5, w okienku dla porównania, zamieszczono dyfraktogramy W4 i W3.

MS

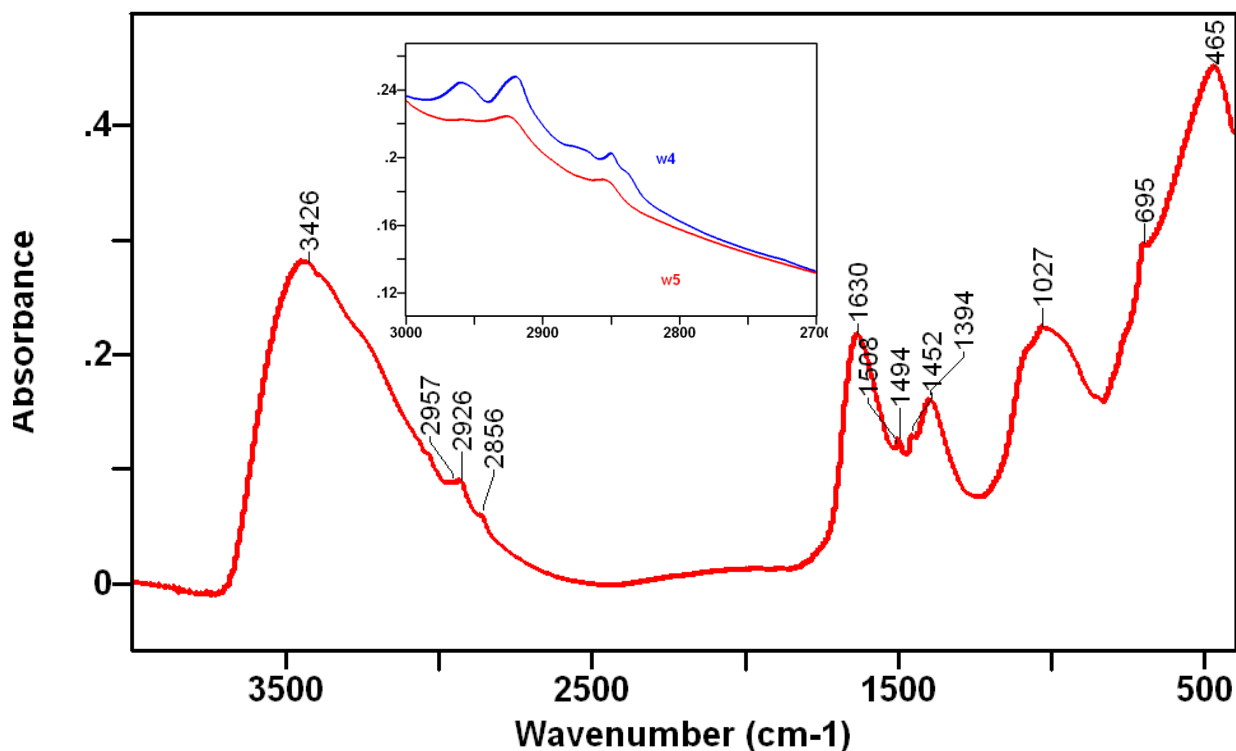
Na rysunku 20 przedstawiono widmo MS próbki W5. Pomiar wykonano w temperaturze pokojowej. Widmo, podobnie jak w przypadku próbki W4, nie zostało jeszcze dopasowane. Z porównania widm W4 i W5 (okienko rys. 17) widać, że widma są identyczne.



Rys. 20. Widmo mössbauerowskie próbki W5. Pomiar w temperaturze pokojowej. W okienku przedstawiono porównanie próbek W4 i W5.

FTIR

Na rysunku 21 przedstawiono widmo FTIR zmierzone dla próbki W5 wraz z okienkiem, w którym dla porównania pokazano widma próbek W4 i W5 w zakresie grup charakterystycznych dla związków organicznych ($3000\text{-}2800\text{ cm}^{-1}$). Widmo próbki W5 jest bardzo podobne do widma próbki W4. Charakteryzują go pasma o dużej szerokości połówkowej. W porównaniu do próbki W4, o obecności związków organicznych świadczą pasma o małej intensywności. W próbce obecne są też niewielkie ilości krzemionki.



Rys. 21. Widmo FTIR próbki W5.

Podsumowanie

Badania XRD wskazują na bardzo duże podobieństwo próbek W4 i W5 w odniesieniu do ich rozdrobnienia i składu fazowego (w tym zawartości fazy amorficznej). Podobne wnioski można wyciągnąć na podstawie analizy widm MS. Z badań FTIR wynika, że próbki składają się głównie z fazy amorficznej. Pojawiają się śladowe ilości krzemionki, a także słabe pasma charakterystyczne dla związków organicznych. Osady pobrane z dwóch różnych wodomierzy oraz z różnych elementów (łopatki wirnika i wewnętrzna obudowa) są bardzo podobne.

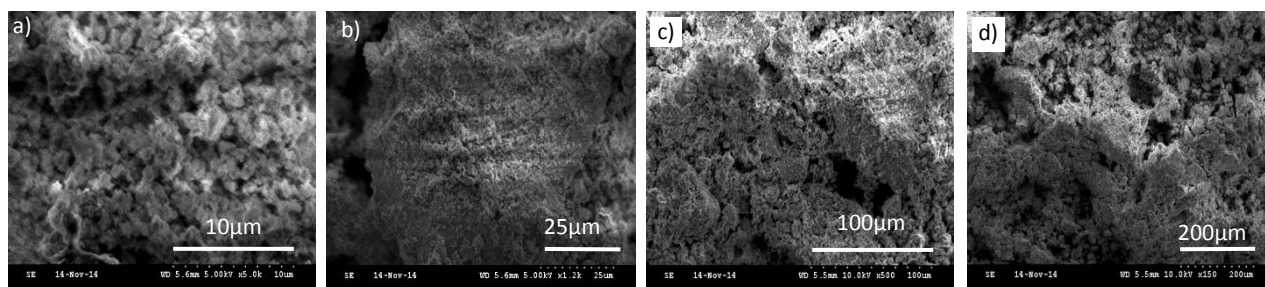
Próbka W7

INFO

Osad pobrano z łopatek i obudowy wodomierza (JS-20) zamontowanego na ulicy Siewnej 54. Proszek ma kolor ciemno brązowy z rudym odcieniem (nieco jaśniejszy od proszku W3), zawierał metaliczne opiłki, które były silnie magnetyczne.

SEM

Na rysunku 22 przedstawiono obrazy SEM, uzyskane dla próbki W7 w czterech różnych powiększeniach. Obserwowane przy największym powiększeniu aglomeraty posiadają stosunkowo regularne kształty, co może wskazywać na obecność fazy krystalicznej. Rozmiary największych aglomeratów przekraczają 200 μm. Badany proszek jest nierównomiernie rozdrobniony, był ucierany w młynku.



Rys. 22. Obrazy SEM próbki W7.

EDS

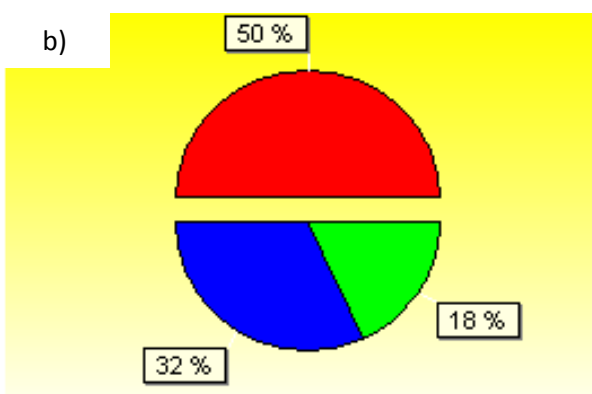
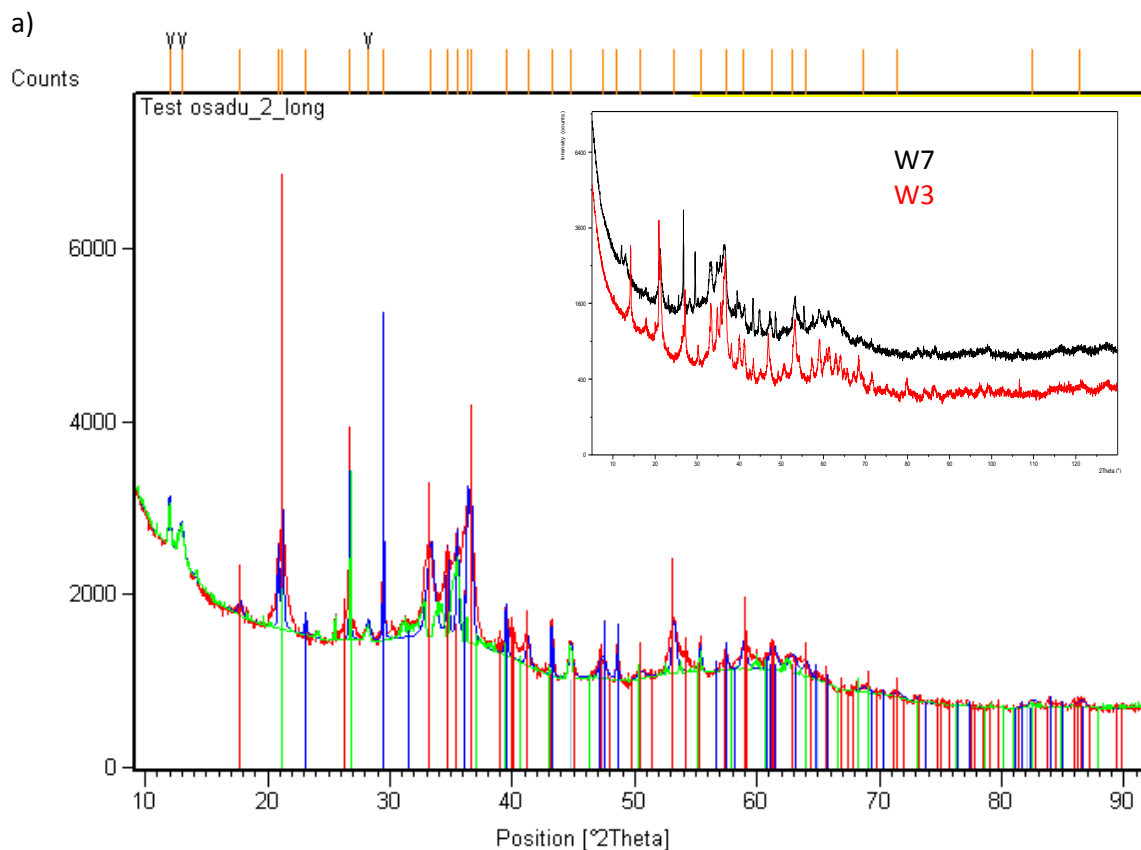
W tabeli 3 przedstawiono wyniki analizy EDS dla próbki W7. Analizy dokonano w pięciu mikroobszarach. Nie uwzględniając węgla, stwierdzono obecność: O (44%), niejednorodnie rozmieszczonego Al (1%), krzemu (2%), Ca (3%), Fe (44%) oraz Zn (6%). Wyniki ilościowe oszacowania tlenu obarczone są dużym błędem (5% – 10%) z powodu zastosowanego detektora o niskiej czułości na pierwiastki lekkie.

Tabela 3. Skład chemiczny proszku W7 opracowany na podstawie pomiarów EDS.

Obszary		% atomowe					
		O	Al	Si	Ca	Fe	Zn
Próbka W7	1	62	3	2	6	23	4
	2	33	4	2	2	53	6
	3	43	-	3	1	49	4
	4	45	-	2	2	45	10
	5	38	1	2	3	50	6
	Śr.	44	1	2	3	44	6

XRD

Na rysunku 23 przedstawiono dyfraktogram próbki W7 wraz z dopasowanymi fazami. W próbce w fazie krystalicznej dominuje getyt z 50% udziałem, poza tym obecna jest także krystaliczna odmiana węgla wapnia (kalcyt) oraz kwarc z udziałami równymi odpowiednio 32% i 18%. Oprócz wymienionych faz w badanym osadzie pojawia się także w przeważającym udziale, w stosunku do udziału fazy krystalicznej, faza amorficzna lub wysoko dyspersyjna faza krystaliczna dająca przyczynek do wysokiego poziomu tła. Jak widać w okienku rysunku 23 pozycje pików próbki W7 wykazują znaczną zgodność z pikami zarejestrowanymi dla próbki W3, co potwierdza obecność zidentyfikowanych w obu próbkach faz getytu i kwarcu. Charakterystyczne zafalowania widoczne w widmach próbek W3 i W7 pokrywają się z szerokimi maksimami obecnymi w widmach próbek W4 i W5, co sugeruje obecność nanokrystalicznego ferrihydrytu.

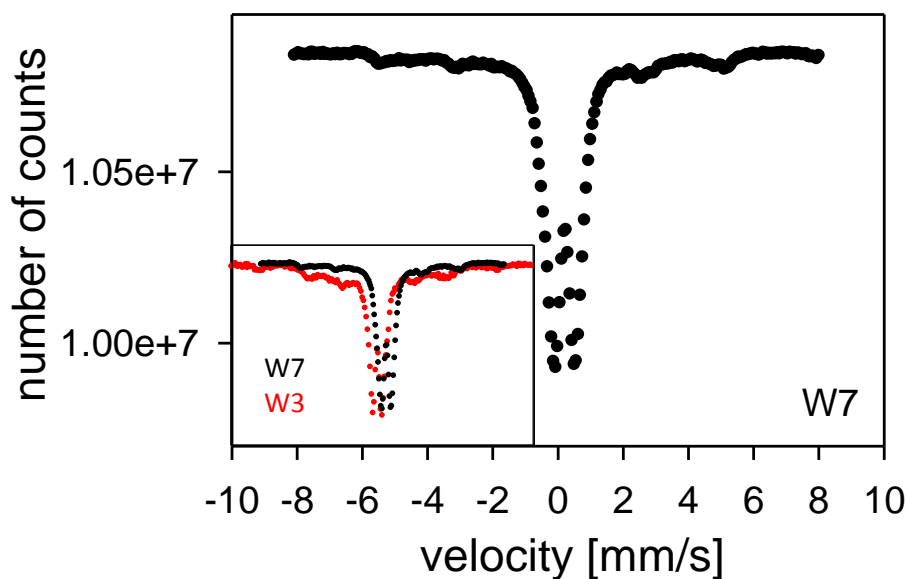


No.	Compound Name	Chemical Formula
1	Goethite, syn	Fe O (O H)
2	Calcium Carbonate	Ca C O 3
3	Quartz	Si O 2

Rys. 23. Dyfraktogram próbki W7 (z okienkiem przedstawiającym dyfraktogram bez dopasowania) wraz z liniami przypisanymi fazom (a), których udziały zostały przedstawione graficznie (b) oraz opisane w tabeli.

MS

Na rysunku 24 przedstawiono widmo mössbauerowskie próbki W7. Widmo nie było jeszcze dopasowywane. Wstępna analiza wskazuje na obecność fazy niemagnetycznej lub wysokodispersyjnej fazy magnetycznej charakteryzowanej, w temperaturze pokojowej, poprzez rozszczenie kwadrupolowe, a także niewielki udział składowej magnetycznej, potwierdzonej obecnością sekstetu. Jak widać z porównania widm zmierzonych dla próbek W3 i W7, dominującą składową w obu przypadkach jest dublet o zbliżonej wartości rozszczenia kwadrupolowego, ale różnych wartościach przesunięciach izomerycznego, wskazującego na różne otoczenia chemiczne jąder żelaza. Brak zgodności w pozycjach maksimum rozszczenia zeemanowskiego wskazuje, że fazy magnetyczne zidentyfikowane w próbce W3, magemit i pirotyn w danej stechiometrii nie występują w próbce W7.



Rys. 24. Widmo mössbauerowskie próbki W7 (osad z wodomierza z ul. Siewnej 54) zmierzone w temperaturze pokojowej.

Podsumowanie

Analiza chemiczna osadu pobranego z wodomierza z ul. Siewnej 54, wskazuje na dominujący udział żelaza (44%), a także niewielką ilość cynku i wapnia (odpowiednio 6% i 3%) oraz małe udziały Si i Al - na poziomie 1-2% (pominięto obecność pierwiastków lekkich dopasowywanych z dużym błędem). Pomiary XRD ujawniły obecność trzech faz krystalicznych: getytu (50%), węglanu wapnia - kalcytu (32%) oraz kwarcu (18%). Zaobserwowano zbieżność pozycji pików dla widm zmierzonych dla próbek W3 i W5, wskazującą na duże podobieństwo składu fazowego tych osadów, potwierdzone obecnością w obu próbkach getytu i kwarcu. Ponadto charakterystyczne zafalowania, zgodne z pozycjami poszerzonych maksimów w widmach próbek W4 i W5, wskazują na obecność nanokrystalicznego ferrihydrytu. W próbce występuje także niezidentyfikowana faza amorficzna, której udział jest kilkukrotnie większy od udziału fazy krystalicznej. Próbki W3 i W7 różnią się istotnie pod względem zawartości faz magnetycznych. Zidentyfikowane w próbce W3, magemit i pirotyn w danej stechiometrii, nie występują w próbce W7.

Próbka W8

INFO

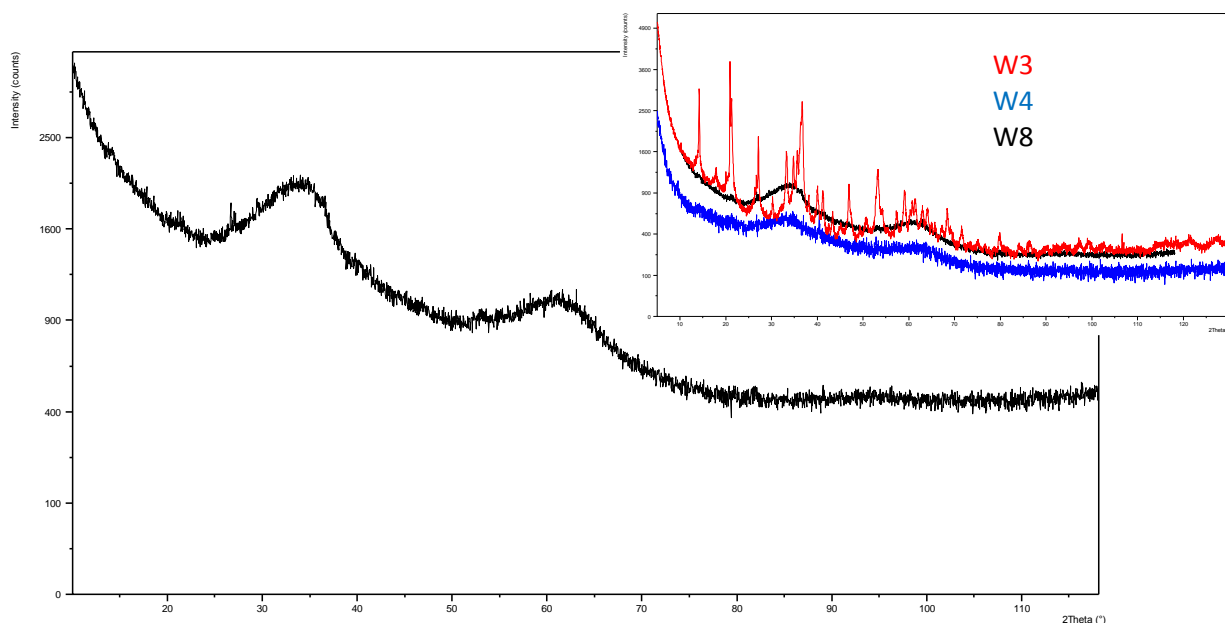
Materiał do badań pobrano z łopatek wirnika (rys. 25) wodomierza z ul. Sołtysowskiej 12a, otrzymanego w październiku 2014 roku. Zebrany osad miał kolor rudoczerwony i nie reagował na pole magnetyczne.



Rys. 25. Zdjęcie przedstawiające wirnik wodomierza, z którego pobrany został osad (próbka W8)

XRD

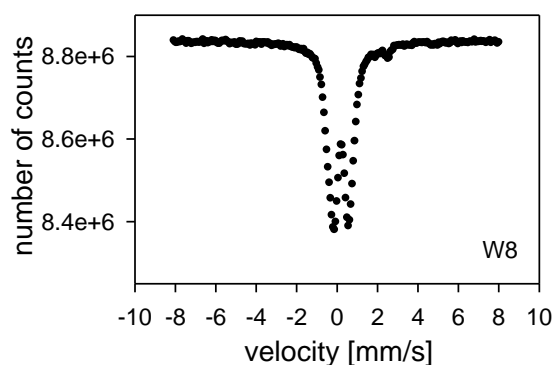
Na rysunku 26 przedstawiono dyfraktogram próbki W8. Na dyfraktogramie na tle wysokiego tła pochodzącego od fazy amorficznej lub drobnokrystalicznej pojawiają się dwa szerokie piki, których pozycje są identyczne z pozycjami pików obserwowanymi w próbkach W4 (w okienku) i W5. Większa intensywność pików związana jest z 10-krotnie dłuższym czasem pomiaru w porównaniu do próbek W4 i W5. Zgodność pozycji maksimów na dyfraktogramach W4 i W8 wskazuje na duże podobieństwo w składzie fazowym tych dwóch osadów i sugeruje obecność, wspomnianego wcześniej, nanokrystalicznego wodorotlenku żelaza - ferrihydru. W okienku pokazano także dyfraktogram dobrze wykrystalizowanej próbki W3. Zbliżone pozycje maksimów dla kątów przy około 35° i 62° mogą wskazywać na obecność podobnych faz (jak w W3) identyfikowanych w tych zakresach kątowych, ale o bardzo rozdrobnionych krystalitach (poniżej 5 nm).



Rys. 26. Dyfraktogram rentgenowski próbki W8, w okienku umieszczono dla porównania dyfraktogramy próbek W3 i W4.

MS

Widmo mössbauerowskie próbki W8 zostało przedstawione na rysunku 27. Wyniki pomiarów są w trakcie opracowywania. Na widmie dominuje dublet wskazujący na obecność fazy niemagnetycznej lub wysokodispersyjnej fazy magnetycznej charakteryzowanej, w temperaturze pokojowej poprzez rozszczepienie kwadrupolowe.



Rys. 27. Widmo mössbauerowskie próbki W8 (osad z łopatek wirnika) zmierzone w temperaturze pokojowej.

Podsumowanie

Próbka W8 (osad z łopatek wirnika wodomierza z ul. Sołtysowskiej 12a), składa się głównie z faz amorficznych lub bardzo rozdrobnionych faz krystalicznych. Ze względu na podobieństwo bardzo szerokich pików zarejestrowanych w pomiarach XRD do widm zmierzonych dla próbek W4 i W5 można przyjąć, że skład fazowy tych proszków jest zbliżony i wskazuje na obecność ferrihydrytu. Jednocześnie podobieństwa w pewnych zakresach kątowych do widma zmierzonego dla próbki W3 sugerują podobny skład fazowy, ale charakteryzujący się znacznym stopniem rozdrobnienia krystalitów, odpowiedzialnym za poszerzenia pików.

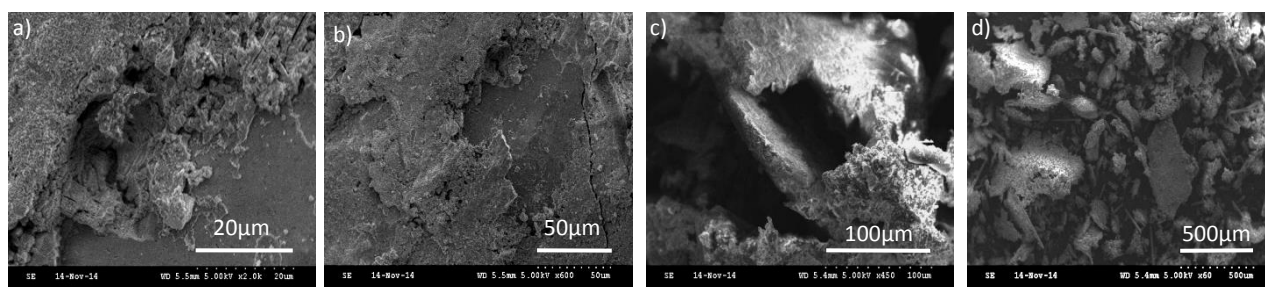
Próbka W9

INFO

Próbkę otrzymano z osadów nagromadzonych na wirniku i obudowie wodomierza przemysłowego zamontowanego na ulicy Wybickiego 32. Proszek był bardzo niejednorodny. Ze względu na małą ilość materiału nie był ucierany w moździerzu. Kolor proszku był szarobrązowy. Nie przemieszczał się w polu magnetycznym.

SEM

Na rysunku 28 przedstawiono obrazy ze skaningowego mikroskopu elektronowego uzyskane dla próbki W9. Proszek jest bardzo niejednorodny, co można zauważyć obserwując obrazy w małym powiększeniu (rys. 28 c i d). Pomiary wykonywano w niskiej próżni przy małej wartości napięcia przyspieszającego, ponieważ materiał bardzo silnie odbijał wiązkę elektronów. Wskazuje to na dominujący udział w materiale próbki fazy nieprzewodzącej. Obrazy zarejestrowane przy dużych powiększeniach nie ujawniły charakterystycznych szczegółów.



Rys. 28. Obrazy SEM próbki W9.

EDS

Jak wspomniano powyżej materiał przygotowany do badań był bardzo niejednorodny (stąd analiza średnich wartości udziałów jest mało uzasadniona), oznacza to także bardzo dużą szorstkość przygotowanej próbki, co niekorzystnie wpływa na poprawność detekcji sygnału EDS, obarczając go dużym błędem. Pomijając obecność pierwiastków lekkich, w proszku dominuje Fe z udziałem zmieniającym się od 13% do 74%. Zarejestrowano także piki pochodzące od aluminium, krzemu i wapnia oraz pojawiające się lokalnie śladowe ilości cynku, potasu i siarki. Ponadto, również lokalnie zaobserwowano obecność chloru (tabela 4).

Tabela 4. Skład chemiczny próbki W9 (na podstawie pomiarów EDS)

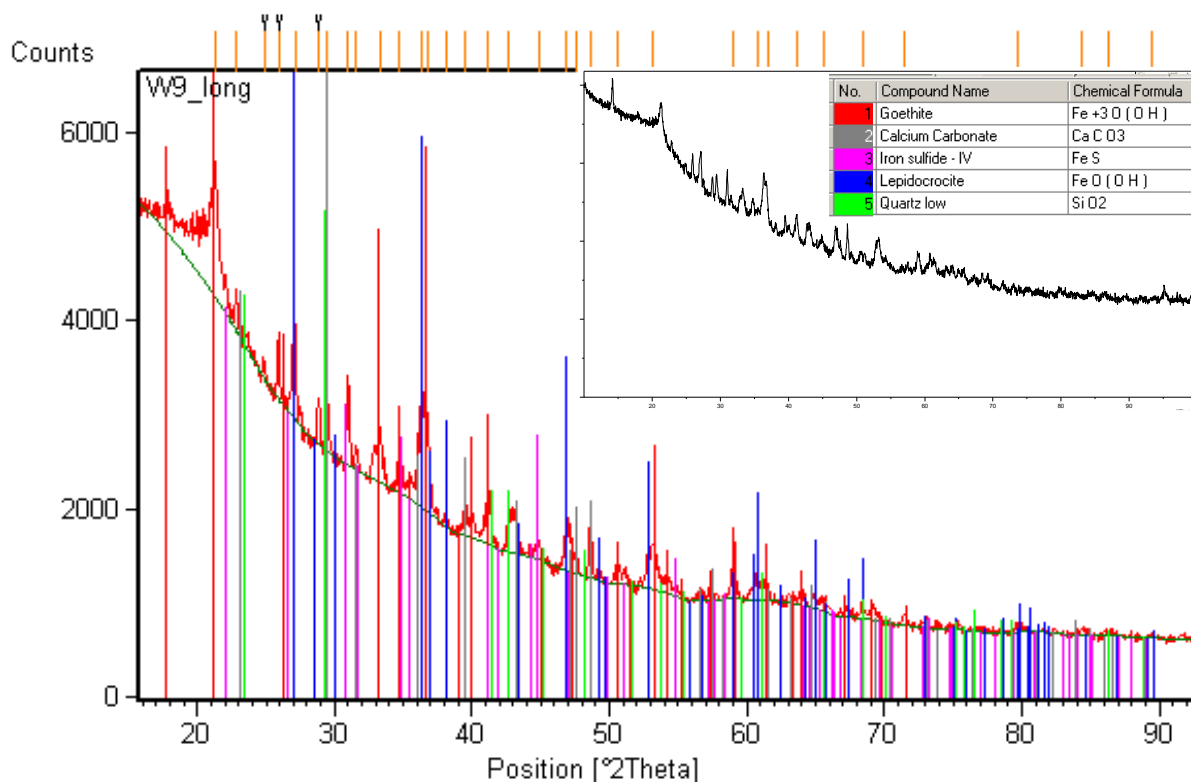
Obszary		% atomowe								
		O	Al	Si	Ca	Fe	Zn	Cl	P	S
Próbka W9	1	67	10	6	3	13	1	-	-	-
	2	65	10	6	4	15	0	-	-	-
	3	48	2	1	-	49	-	-	-	-
	4	46	6	6	5	27	-	8	1	1
	5	54	4	5	5	26	-	5	1	-
	6	24	2	-	-	74	-	-	-	-
	Śr.	51	4	5	4	34	0	-	-	-

PIXE

W próbce zarejestrowano obecność Fe – 22%, Si – 15% oraz Ca – 4% i Cl – 2%. Ponadto zidentyfikowano także na poziomie poniżej 1% fosfor, siarkę, potas, mangan, miedź i cynk.

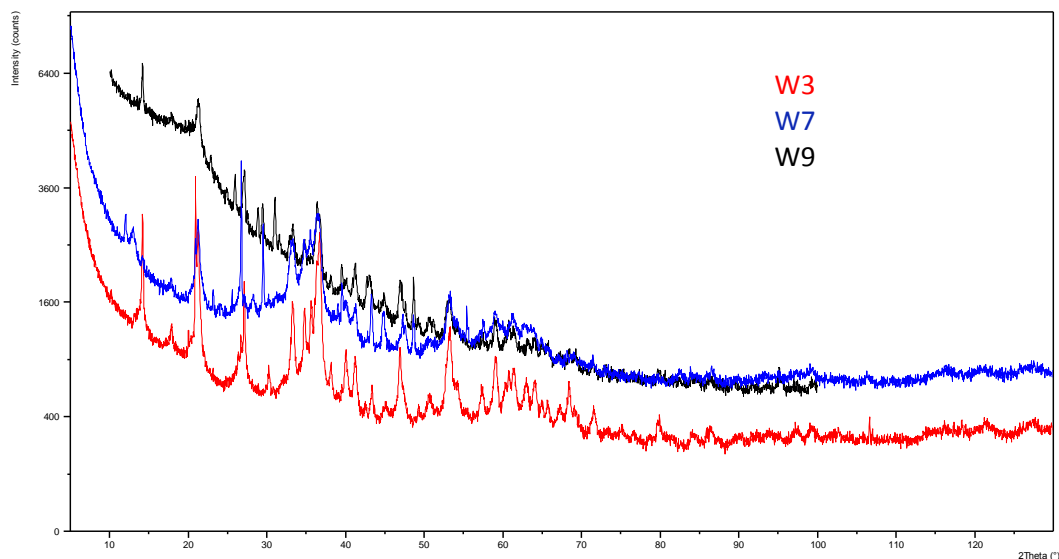
XRD

Na rysunku 29 przedstawiono dyfraktogram próbki W9. Na dyfraktogramie dominuje składowa amorficzna, której obecność potwierdza bardzo wysoki poziom tła. Na jego tle pojawiają się piki – stosunkowo wąskie, o małej intensywności – świadczące o niewielkim udziale fazy krystalicznej. Wstępne próby dopasowania wskazują na prawdopodobną obecność getytu, węglanu wapnia, siarczków żelaza, lepidokrokitu i kwarcu.



Rys. 29. Dyfraktogram próbki W9, w okienku zamieszczono dyfraktogram bez dopasowania oraz tabelę z dopasowanymi fazami.

Na dyfraktogramie próbki W9 nie zaobserwowano charakterystycznych zafalowań, które mogłyby być przypisane do nanokrystalicznego ferrihydrytu. Poniżej pokazano natomiast dużą zgodność pozycji pików na dyfraktogramach próbek W3, W7 i W9 (rys. 30).



Rys. 30. Dyfraktogramy próbek W3, W7 i W9.

Znajduje to odzwierciedlenie w powtarzających się fazach uzyskanych z dopasowania, przedstawionych w tabeli 5.

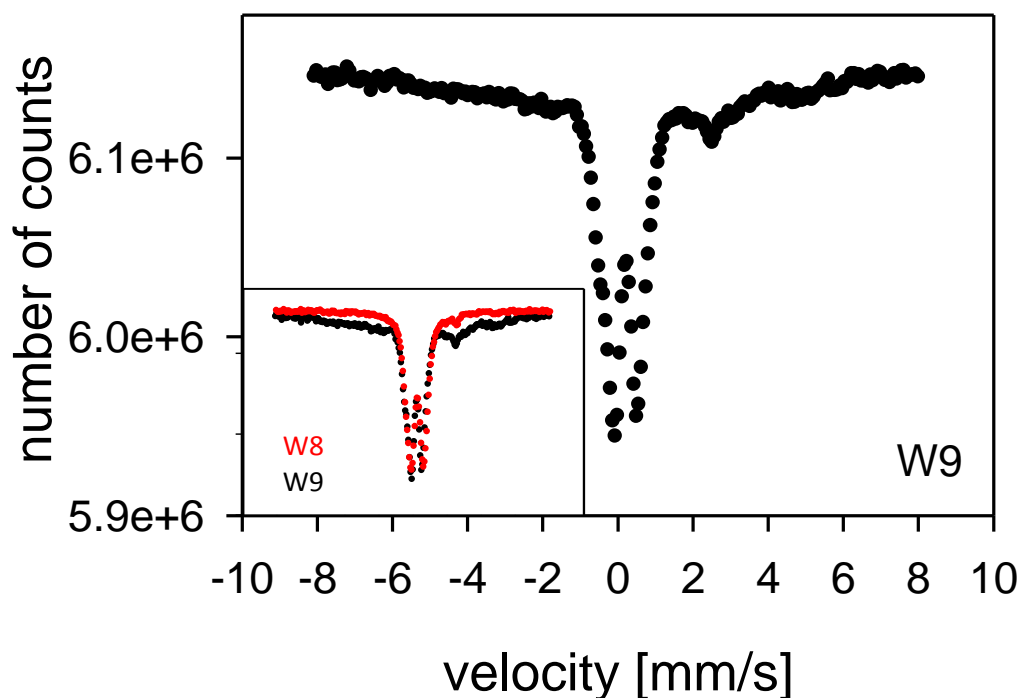
Tabela. 5. Zestawienie wyników dopasowania dyfraktogramów próbek W3, W7 i W9.

Fazy krystaliczne						
	getyt	lepidokrokit	kwarc	siarczki żelaza	magemit	węglan wapnia
W3	X	X	X	X	X	
W7	X		X			X
W9	X	X	X	X		X

Na dyfraktogramie W9 można zaobserwować również znacznie wyższy poziom tła dla niskich kątów w porównaniu do próbek W3 i W7. Może to wynikać z niejednorodności próbki i występowania dużych płaskich, stosunkowo gładkich obiektów, widocznych na obrazie rys. 28d, od których następuje odbicie zwierciadlane.

MS

Na rysunku 31 przedstawiono widmo mössbauerowskie próbki W9 (osad z wodomierza przemysłowego). W okienku rysunku pokazano to samo widmo z nałożonym widmem próbki W8. Widma nie były jeszcze dopasowywane, ale oprócz dużego dubletu wyraźnie pojawia się na nich składowa o dużym przesunięciu izomerycznym i rozszczepieniu kwadrupolowym. Sugeruje to zbliżony skład obu próbek w zakresie faz, w których występuje żelazo.



Rys. 31. Widmo mössbauerowskie próbki W9 zmierzone w temperaturze pokojowej. W okienku widmo tej próbki porównano do widma próbki W8.

Podsumowanie

Próbka W9 była bardzo niejednorodna. Analiza składu chemicznego wskazuje na obecność żelaza (13%-74%), a także aluminium, krzemu i wapnia z udziałem na poziomie 4%-5%. W proszku zarejestrowano również, pojawiające się lokalnie, śladowe ilości cynku, potasu, siarki oraz chloru. Powyższe wyniki otrzymano z obszarów mikroskopowych. Analiza makroskopowa (PIXE) potwierdza obecność Fe – 22%, Si – 15% oraz Ca – 4% i Cl – 2%. Ponadto zidentyfikowano także na poziomie poniżej 1%, fosfor, siarkę, potas, mangan, miedź i cynk. Analiza fazowa oprócz dominującej fazy amorficznej ujawniła także niewielką zawartość fazy krystalicznej, którą stanowią: getyt, węglan wapnia, siarczki żelaza, lepidokrokity i kwarc. W próbce nie stwierdzono obecności ferrihydrytu, ale zaobserwowano duże podobieństwa w składzie fazy krystalicznej do próbek W3 i W7. Wstępna, porównawcza analiza widm mössbauerowskich, wskazuje na występowanie w próbkach W8 i W9 tych samych faz zawierających żelazo. Pojawia się tu pewna niezgodność, co do obecności ferrihydrytu, który jest związkiem żelaza i wobec zgodności widm MS powinien być w tej próbce. Wątpliwości te będą rozstrzygnięte po dokładnym dopasowaniu widm mössbauerowskich i wykonaniu pomiarów w niskich temperaturach. Nieobserwowane na dyfraktogramie zafalowania interpretowane jako ferrihydryt mogą być niewidoczne z powodu wysokiego poziomu tła.

Wnioski

1. Głównym składnikiem badanych próbek są związki żelaza w postaci wodorotlenków typu FeOOH takich jak: getyt, lepidokrokit i ferrihydryt. W zależności od miejsca pobrania i sposobu przygotowania próbki (osad tylko z łopatek lub z łopatek i obudowy wodomierza) w osadach pojawiają się inne związki żelaza, takie jak: tlenki (magemit), węglany (syderyt) i siarczki (pirotyn). Oprócz związków żelaza w skład osadów wchodzi związki krzemu i krystaliczny węglan wapnia (kalcyt).
2. W próbkach W4, W5 i W8 pobranych z rudoczerwonego osadu z łopatek i obudowy wirników wodomierzy, dominują fazy amorficzne i drobnokrystaliczne, o czym świadczy podwyższone tło na dyfraktogramach i duże poszerzenie pików. Dwa szerokie maksima widoczne na widmach zostały przypisane do nanokrystalicznego wodorotlenku żelaza – ferrihydrytu o wzorze zbliżonym do $\text{Fe}_5\text{HO}_8 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (w starszych publikacjach spotyka się też wzór $5\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$) i o wielkości krystalitów poniżej 5 nm [J. Jambor, J. Dutrizac, Chem. Rev. 98(1998)2549]. Niewielkie rozmiary ziaren ferrihydrytu mogą ułatwiać proces tworzenia osadu w warunkach wysokich prędkości przepływu lub też na obracających się częściach wodomierzy (łopatki wirnika). Dwa maksima wskazujące na obecność ferrihydrytu, zostały też zaobserwowane na dyfraktogramach próbek W3 i W7.
3. W pozostałych przypadkach przebadanych próbek: W1, W3, W7 i W9, celem uzyskania większej ilości materiału do badań (co pozwoliło na użycie większej ilości technik badawczych) osad pobierano nie tylko z łopatek wirnika, ale też z obudowy wodomierza. Często był to luźny materiał naniesiony z obiegu i osadzony na elementach obudowy. Ponieważ stałe zanieczyszczenia wody mogą być, w tych warunkach, transportowane z dość odległych miejsc obiegu, utrudnia to dostrzeżenie korelacji pomiędzy składem fizykochemicznym wody i materiału rur, a składem fazowym osadów.
4. W próbce W3 stwierdzono (metodą FTIR) obecność substancji organicznych, co wraz z zaobserwowanym w próbce ferromagnetycznym tlenkiem żelaza magemitem i siarczkami żelaza (pirotynem) może wskazywać na działalność bakterii i procesy korozji mikrobiologicznej. Obecność substancji organicznych stwierdzono również w próbkach W4 i W5 (FTIR), natomiast siarczków żelaza w próbce W9 (XRD). W próbkach W7 i W9 oprócz wykrystalizowanego getytu, zaobserwowano piki charakterystyczne dla węglanu wapnia (kalcytu), który może dawać twarde osady na łopatkach i łożyskach wodomierzy powodując ich zatrzymanie.

Dla lepszego zrozumienia mechanizmów powstawania osadów w sieci wodociągowej, należałoby przeprowadzić bardziej systematyczne badania, polegające między innymi na skorelowaniu wyników pomiarów składu fazowego osadów z wynikami analiz fizykochemicznych wody w miejscach zainstalowania wodomierzy (na przykład przy podwyższonej zawartości krzemu preferowane jest powstawanie ferrihydrytu w wodzie, kosztem getytu i lepidokrokitu). Ponadto ważne jest też wykonywanie analiz możliwie jak najszybciej po pobraniu materiału do badań (ferrihydryt może być w pewnych warunkach niestabilny i przechodzić w getyt).

Osady tworzące się na elementach pomiarowych stanowią poważny problem technologiczny, a konieczność wymiany niesprawnych wodomierzy oznacza wymierny problem ekonomiczny dla przedsiębiorstw dostarczających wodę. Ponadto, jak wynika z literatury [L. Tuhela et al., Ground Water, 31(1993)982] osad ferrihydrytu na elementach sieci wodnej jest prekursorem powstawania biofilmu, a więc może powodować pogorszenie jakości wody. Lepsze poznanie mechanizmów powstawania osadów w sieci wodociągowej, pozwoli na optymalizację stosowanych metod uzdatniania wody lub opracowanie nowych rozwiązań, a tym samym wpłynie na zmniejszenie ilości awarii i poprawę jakości wody pitnej.