

Bartłomiej Rogalewicz, Piotr Anielak, Paweł Samulkiwicz

rogalewicz.bartlomiej@gmail.com

Instytut Chemii Ogólnej i Ekologicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Łódzka

# Badanie kinetyki pochłaniania CO<sub>2</sub> oraz pary wodnej z powietrza przez stały wodorotlenek sodu



Fot. 1. Wodorotlenek sodu [1]

## Wstęp

Wodorotlenek sodu wraz z wodorotlenkiem potasu to najbardziej znane i najczęściej używane w laboratoriach silne zasady. Wiązanie jonowe (różnica elektroujemności wynosi aż 2,51 w skali Paulinga) [2] między atomem sodu i atomem tlenu ma znaczący wpływ na właściwości fizyczne oraz chemiczne wodorotlenku sodu. Po pierwsze, jest on bardzo dobrze rozpuszczalny w wodzie, po drugie, w roztworze wodnym całkowicie dysocjuje na jony Na<sup>+</sup> oraz OH<sup>-</sup>. Za bardzo dobrą rozpuszczalność w wodzie odpowiadają również wiązania wodorowe, powstające pomiędzy wolną parą elektronową na atomie tlenu w cząsteczce wody i atomem wodoru z jonu wodorotlenkowego, gdzie zgromadzony jest ładunek dodatni. W trakcie rozpuszczania stałego NaOH w wodzie wydzielają się duże ilości ciepła. Wodorotlenek sodu znajduje szerokie zastosowanie, na przykład w przemyśle celulozowo-papierniczym, przy produkcji włókien sztucznych, mydła, środków do udrażniania rur oraz do produkcji szkła wodnego [1].

Wodorotlenek sodu jest substancją silnie higroskopijną, pozostawiona na powietrzu próbka pochłania z atmosfery parę wodną oraz dwutlenek węgla. Poniżej przedstawione

są wyniki doświadczeń mających na celu zbadanie kinetyki tego procesu. Badania przeprowadzone zostały pod opieką dr. inż. Piotra Anielaka z Instytutu Chemii Ogólnej i Ekologicznej oraz dr. inż. Pawła Samulkiwicza, nauczyciela chemii z Zespołu Szkół Politechniki Łódzkiej.

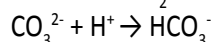
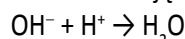
## Odczynniki i metody badawcze

Wykonano dwie serie pomiarów. W każdej z nich badano próbkę „zerową” wodorotlenku sodowego (niewystawioną na działanie CO<sub>2</sub> i wilgoci) oraz po sześć próbek poddanych działaniu powietrza atmosferycznego. Próbki te były umieszczone w postaci cienkiej, równomiernej warstwy na szkiełkach zegarkowych. W określonych odstępach czasu rozpuszczano kolejną próbkę w 100 cm<sup>3</sup> wody demineralizowanej i oznaczano w niej stężenie jonów OH<sup>-</sup> i CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> metodą miareczkową (kwas solny o stężeniu 0,1 mol·dm<sup>-3</sup>, w obecności fenoloftaleiny i oranżu metylowego [3]). Temperatura otoczenia nie przekraczała 30°C, a względna wilgotność powietrza wynosiła 45%. Za każdym razem odważono około 400 mg (0,01 mola) stałego wodorotlenku sodu. Masy odważonych próbek różniły się o +8 mg/-5 mg – wyliczone później wartości stężeń zostały odniesione do stałej masy próbki równej 400 mg.

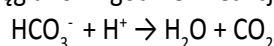
Roztwór każdej z próbek zawierał aniony wodorotlenkowe OH<sup>-</sup> oraz węglanowe CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>. Również roztwór „zerowy” zawierał niedużą ilość węglanów powstałych na skutek absorpcji CO<sub>2</sub> z powietrza przez wodorotlenek sodu. Natomiast badane roztwory nie zawierały jonów wodorowęglanowych HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> ze względu na nadmiar jonów wodorotlenkowych.

Wszystkie próbki analizowanych roztworów odmierzano za pomocą pipety o pojemności 10 cm<sup>3</sup>. Miareczkowanie próbek na obecność jonów OH<sup>-</sup> oraz CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> wykonywano co najmniej trzykrotnie. W tym celu do roztworu dodawano około 6 kropli fenoloftaleiny, następnie miareczkowano do odbarwienia wskaźnika. Zmiana barwy wskaźnika informuje o końcu miareczkowania mocnych zasad, wyznaczając tzw. zasadowość *p*. Podczas miareczkowania w obecności fenoloftaleiny oznaczone zostają jony wodorotlenkowe OH<sup>-</sup> oraz

połowa jonów węglanowych  $\text{CO}_3^{2-}$ , ponieważ przechodzą one w jony wodorowęglanowe  $\text{HCO}_3^-$ . Ten etap miareczkowania obrazują następujące reakcje:



Następnie do roztworu dodawano trzy krople oranżu metylowego. Żółty kolor wskaźnika oznacza, że w roztworze obecne są jony  $\text{HCO}_3^-$ . Ze względu na hydrolizę anionu wodorowęglanowego, odczyn roztworu jest słabo alkaliczny. Miareczkowanie kończy się po zmianie barwy oranżu z żółtej na fioletową. W tym przypadku oznaczano zasadowość ogólną  $m$ , wywołaną przez mocne i słabe zasady. Ten etap miareczkowania prowadzi do usunięcia drugiej połowy węglanów zgodnie z reakcją:



Wyznaczone wartości zasadowości  $p$  i  $m$  służą do obliczenia liczby moli jonów wodorotlenkowych  $\text{OH}^-$  oraz jonów węglanowych  $\text{CO}_3^{2-}$  w badanych roztworach.

## Wyniki pierwszej części pomiarów

Tabela 1 przedstawia masę odważonych próbek wodorotlenku sodu przed i po absorpcji, uśredniony przyrost masy, a także zmianę ilości wodorotlenku i węglanu sodu. Próbki były wystawione na działanie powietrza przez 30, 60, 90, 150, 210 i 330 minut.

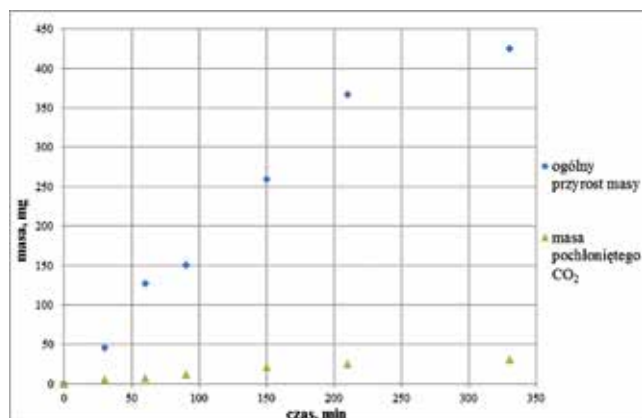
Rys. 1 przedstawia ogólny przyrost masy próbki oraz masę pochłoniętego dwutlenku węgla w czasie. Rys. 2 obrazuje zmiany w czasie ułamka molowego  $x$  reagenta w postaci  $-\ln(x)$  dla wodorotlenków oraz  $-\ln(1-x)$  dla węglanów. Wykres ten posłużył do obliczenia stałej szybkości reakcji  $\text{CO}_2$  z wodorotlenkiem sodu [4]. Rys. 3 ilustruje porównanie jednoczesnego wzrostu masy węglanów oraz spadku masy wodorotlenków.

## Wyniki drugiej części pomiarów

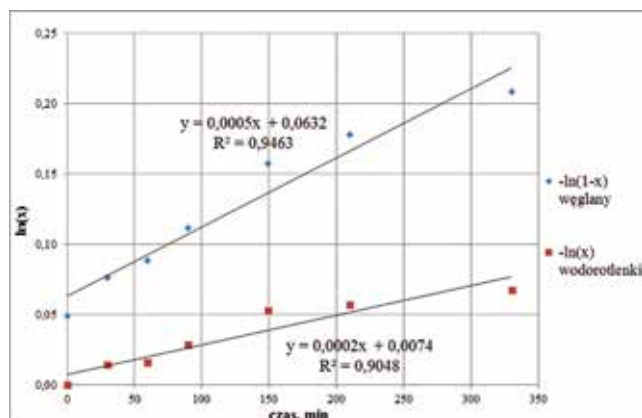
Dla wyznaczenia początkowej szybkości pochłaniania dwutlenku węgla i pary wodnej przez stały NaOH wykonano

Tabela 1. Zmiana masy próbek w pierwszej serii pomiarów

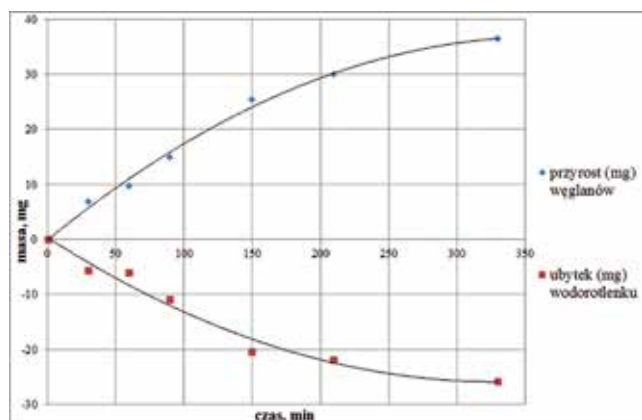
czas, min	masa odważki mg	p, $\text{cm}^3$		NaOH		$\text{Na}_2\text{CO}_3$		ogólny przyrost masy mg	masa pochłoniętego dwutlenku węgla mg	przyrost masy procentowo	pochłonięta para wodna	
		mval	mval	mg	mmol	mg	mmol				mg	mmol
0	408	9,922	10,039	392,20	9,805	12,40	0,234	0	0	0%	0	0
30	397	9,844	10,025	386,52	9,663	19,19	0,362	46,35	5,63	12%	40,72	2,26
60	404	9,861	10,069	386,12	9,653	22,05	0,416	127,73	8,01	32%	119,72	6,65
90	403	9,787	10,045	381,16	9,529	27,35	0,516	150,87	12,41	38%	138,46	7,69
150	404	9,653	10,010	371,84	9,296	37,84	0,714	259,41	21,12	65%	238,29	13,24
210	401	9,656	10,055	370,28	9,257	42,29	0,798	366,08	24,82	92%	341,26	18,96
330	400	9,620	10,080	366,40	9,160	48,76	0,920	425,00	30,18	106%	394,82	21,93



Rys. 1. Zależność pomiędzy ogólnym przyrostem masy próbek oraz masą pochłoniętego dwutlenku węgla w funkcji czasu



Rys. 2. Zależność pomiędzy logarytmami ułamków molowych węglanów i wodorotlenków ( $x$ ) w funkcji czasu



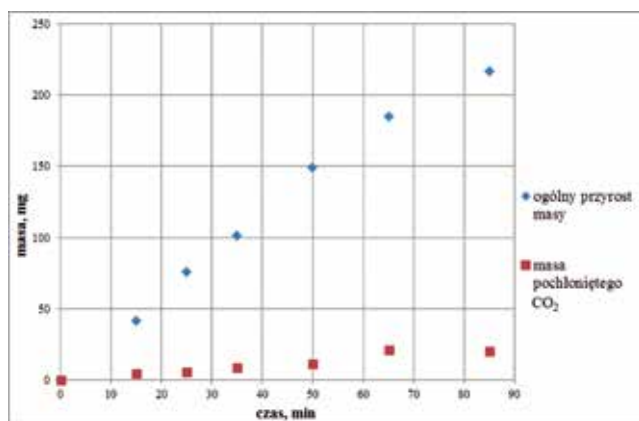
Rys. 3. Zależność pomiędzy przyrostem masy węglanów oraz jednoczesnym ubytkiem masy wodorotlenków w funkcji czasu



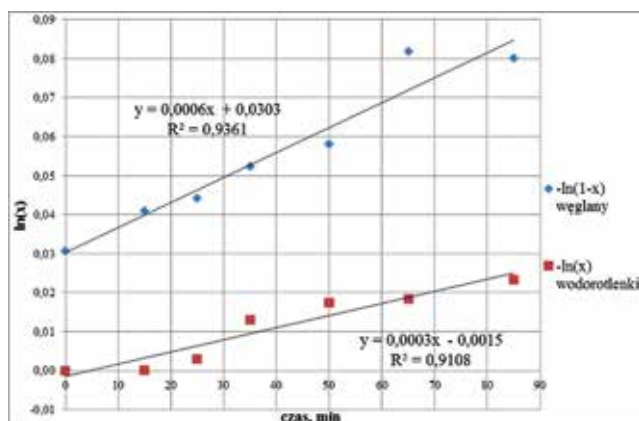
Tabela 2. Zmiana masy próbek w drugiej serii pomiarów

czas, min	masa odważki mg	p, ml		NaOH		Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>		Δ mas mg	Δ reag mg	przyrost masy procentowo	Δ H <sub>2</sub> O	
		mval	mval	mg	mmol	mg	mmol				mg	mmol
0	403	9,856	10,005	388,28	9,707	15,79	0,298	0	0	0%	0	0
15	404	9,855	10,053	386,28	9,657	20,99	0,396	41,58	4,312	10%	37,27	2,07
25	400	9,827	10,040	384,56	9,614	22,58	0,426	76,00	5,632	19%	70,37	3,91
35	399	9,728	9,978	379,12	9,478	26,50	0,500	101,25	8,888	25%	92,36	5,13
50	403	9,687	9,965	376,36	9,409	29,47	0,556	148,88	11,352	37%	137,53	7,64
65	402	9,678	10,066	371,60	9,290	41,13	0,776	185,07	21,032	46%	164,04	9,11
85	403	9,628	10,008	369,92	9,248	40,28	0,760	216,38	20,328	54%	196,05	10,89

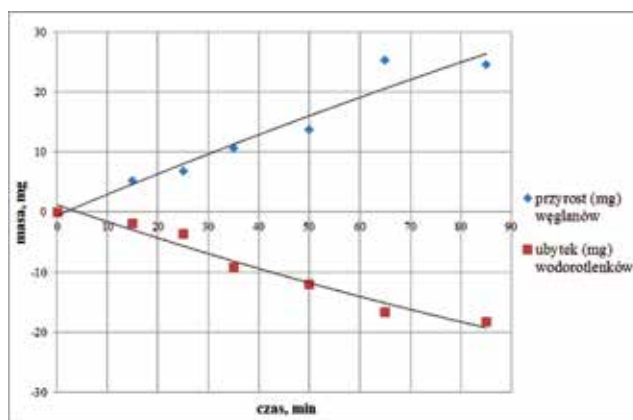
drugą serię pomiarów w czasie krótszym niż seria pierwsza (odpowiednio 85 oraz 330 min). Wyniki tej części pomiarów zostały przedstawione w postaci tabeli i wykresów w analogiczny sposób jak dla serii pierwszej. Przy krótszym czasie kontaktu badanych próbek z powietrzem atmosferycznym w części drugiej można uzyskać większą liniowość przedstawionych zależności kinetycznych procesu niż dla serii pierwszej (wykres 4 i 6 w porównaniu do wykresów 1 i 3). Wskazuje to, że proces pochłaniania CO<sub>2</sub> i pary wodnej z powietrza jest najszybszy w jego początkowej fazie.



Rys. 4. Zależność pomiędzy ogólnym przyrostem masy próbki oraz masą pochłoniętego dwutlenku węgla w funkcji czasu



Rys. 5. Zależność pomiędzy logarytmami ułamków molowych węglanów i wodorotlenków (x) w funkcji czasu



Rys. 6. Zależność pomiędzy przyrostem masy węglanów oraz jednoczesnym ubytkiem masy wodorotlenków w funkcji czasu

## Wnioski

Stały wodorotlenek sodu wystawiony na działanie powietrza atmosferycznego pochłania zarówno parę wodną, co świadczy o jego higroskopijności, jak i dwutlenek węgla, z którym reaguje, tworząc węglan sodu.

1. Na podstawie przedstawionych wyników pomiarów można stwierdzić, że szybkość procesu pochłaniania dwutlenku węgla i pary wodnej z powietrza przez stały wodorotlenek sodu nie jest stała i po pewnym czasie zaczyna maleć. Półlogarytmiczny układ współrzędnych lepiej opisuje uzyskane punkty doświadczalne.
2. Kontakt z powietrzem atmosferycznym (temperatura maksymalna 30°C, wilgotność względna 45%) w czasie 330 minut skutkuje podwojeniem masy próbek na skutek pochłaniania głównie pary wodnej, natomiast pochłanianie CO<sub>2</sub> ma znacznie mniejszy udział.
3. Podjęto próbę opisaną uzyskanych danych doświadczalnych przy pomocy równania kinetycznego pierwszego rzędu. Stała szybkości  $k$  wyznaczona dla pierwszej serii pomiarów wynosi  $5 \cdot 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ . W drugiej serii pomiarów obejmującej początek krzywej absorpcji uzyskano wartość  $k$  równą  $6 \cdot 10^{-4} \text{ min}^{-1}$ .
4. Spowolnienie procesu pochłaniania CO<sub>2</sub> spowodowane

jest także wzrostem stężenia węglanów na powierzchni granulek wodorotlenku sodu, co hamuje absorpcję tego gazu.

### Literatura

[1] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Wodorotlenek\\_sodu](https://pl.wikipedia.org/wiki/Wodorotlenek_sodu), 16.09.16.

[2] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Elektrojemno%C5%9B%C4%87>, 16.09.16.

[3] Fizyczno-chemiczne badanie wody i ścieków (red. Dojlido J.), Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1999.

[4] Zou J.H., Zhou Z.J., Wang F.C., Zhang W., Dai Z.H., Liu H.F., Yu Z.H., 2007, Modeling reaction kinetics of petroleum coke gasification with CO<sub>2</sub>, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, **46** (7), 630-636.

**Andrzej Żarczyński, Martyna Niedbalska, Marcin Zaborowski**

andrzej.zarczyński@p.lodz.pl; 175038@edu.p.lodz.pl; marcin.zaborowski@p.lodz.pl

*Institut Chemii Ogólnej i Ekologicznej, Wydział Chemiczny, Politechnika Łódzka*

# Ocena efektywności energetycznej dwóch turbin wiatrowych firmy Vensys

## Wstęp

Według przyjętych w Unii Europejskiej założeń, produkcja energii z odnawialnych źródeł (OZE) w skali całej Wspólnoty ma w 2020 r. osiągnąć poziom 20%, a w poszczególnych krajach najmniej 15% [1-7]. Wytwarzanie energii ze źródeł odnawialnych, m. in. biogazowni [2, 3, 8-15], siłowni (turbin) wiatrowych [1, 4, 16-26], paneli słonecznych [9, 27], wykorzystania siły spływu wód [28, 29], mimo różnych mankamentów znajduje istotne wsparcie ekonomiczne w państwach Unii Europejskiej i niektórych innych krajach świata [4-21]. Jedną z dróg prowadzących do osiągnięcia tego ambitnego celu jest rozwój energetyki wiatrowej [1, 4, 16-26]. Jednak ocena w społeczeństwie tego rodzaju energetyki OZE nie jest jednoznaczna. Wśród korzyści podkreśla się w szczególności brak emisji zanieczyszczeń podczas produkcji energii elektrycznej i niewielkie koszty eksploatacyjne. Poważnymi mankamentami tego źródła energii jest fakt, iż jest ono zależne od siły wiatru, tj. niestabilne w czasie, a przy tym turbiny wiatrowe generują hałas, zwłaszcza dokuczliwy przy usytuowaniu siłowni w pobliżu osiedli ludzkich. Ponadto energetyka wiatrowa powoduje zmiany w krajobrazie, uciążliwości zdrowotne i obniża atrakcyjność rekreacyjną, a niekiedy i materialną danego terenu [1, 4, 16-19, 21, 25]. Stwierdzane są także straty wśród populacji nietoperzy oraz ptaków [18, 20, 25]. Powyższe negatywy są przyczyną utrzymywania się złej opinii o energetyce wiatrowej i źródłem protestów społecznych,

zwłaszcza, gdy realna staje się na danym terenie budowa farm wiatrowych [25, 30]. Mimo to realizowane są w tym obszarze OZE zarówno badania podstawowe, półtechniczne jak i prace wdrożeniowe w wielu krajach świata, w tym i w Polsce [22-24, 26, 31]. Wymagają one jednak znacznych środków finansowych, których niedobór w Polsce jest wciąż problemem oczekującym rozwiązania.

## Przedmiot i Metody Badawcze

Analizie poddawano pracę farmy wiatrowej zlokalizowanej w miejscowości Wincentów składającej się z trzech turbin energetycznych, lecz obserwacje wykonano tylko dwóch jednostek wyprodukowanych przez firmę Vensys o mocy znamionowej po 1,5 MW każda. Analizowane siłownie wiatrowe zostały zainstalowane w sierpniu 2014 r., każda wysokości 100 m i średnicy łopaty 77 m. Trzecia typu ENERCON E 66 oddana do użytku w 2012 r., o mocy także 1,5 MW nie była badana ze względów technicznych. Powstanie analizowanej farmy wiatrowej jest efektem realizacji projektu pt. „Budowa elektrowni wiatrowej o mocy 4,5 MW w miejscowości Wincentów, gmina Rusiec, woj. łódzkie”, obejmującego budowę trzech turbin wiatrowych. Projekt ów otrzymał wsparcie finansowe Unii Europejskiej w ramach działania 9.4. pt. „Wytwarzanie energii ze źródeł odnawialnych” Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko [32]. Farmę wiatrową będącą częścią firmy pod nazwą Zakład Usługowo-Handlowy Czesław Szymański

