

Wykorzystanie pola magnetycznego do wzbogacenia powietrza tlenem

Streszczenie. Artykuł przedstawia ideę oraz badanie wstępne dotyczące wzbogacania powietrza w tlen z wykorzystaniem pola magnetycznego. Powietrze jest mieszaniną gazów, poszczególne gazy mają różną podatność magnetyczną. Różne właściwości magnetyczne gazów, dają możliwość rozdzielania ich przy użyciu silnego pola i dużego gradientu pola magnetycznego. Silną niejednorodność pola magnetycznego można wytworzyć za pomocą membran o odpowiednich właściwościach. Efektem przepływu powietrza przez membranę może być powietrze wzbogacone w tlen lub też czysty tlen.

Abstract. The article presents the idea and preliminary investigations on air enrichment with oxygen using a magnetic field. Air is a mixture of gases, the different gases have different magnetic susceptibility. Due to different magnetic properties of gases, the possibility is rendered to separate them by using strong magnetic fields and high magnetic gradient field. The strong heterogeneity of the magnetic field can be prepared using membranes with appropriate properties. The effect of an air flow through the membrane may be the oxygen-enriched air or the pure oxygen. (The magnetic field application as the method of air-enrichment with oxygen).

Słowa kluczowe: pole magnetyczne, separacja magnetyczna, wzbogacanie powietrza tlenem.

Keywords: magnetic field, magnetic separation, enrichment of air with oxygen.

Wstęp

Pole magnetyczne znalazło we współczesnym świecie niezliczoną liczbę zastosowań, począwszy od maszyn elektrycznych, poprzez różnego rodzaju czujniki, nowoczesną kolej, na przemyśle górniczym i ochronie środowiska, skończywszy [1, 2]. W przyszłości, być może będą spektakularne zastosowania związane z komputerami kwantowymi.

Jednym z zastosowań pola magnetycznego jest separacja, czyli oddzielanie składników mieszaniny posiadających różne właściwości magnetyczne. Proces separacji lub wzbogacania jest stosowany głównie w przeróbce surowców mineralnych, dokonuje się rozdziału minerałów użytecznych od reszty składników. Cechą według której dokonuje się rozdzielania składników nazywamy argumentem separacji. Może to być gęstość ziaren, prędkość opadania ziaren, zwilżalność ale również przewodność i podatność elektryczna, a także podatność magnetyczna [3].

Tabela 1. Właściwości fizyczne wybranych cząstek gazu [4]

Gaz	Podatność magnetyczna w temperaturze wrzenia χ_m [$10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$]	Temperatura wrzenia [K]	Srednica kinetyczna [Å]
Tlen (O ₂)	Paramagnetyk (+3402) (+7667 st.ciekły)	90,1	3,46
Azot (N ₂)	Diamagnetyk (-12,5)	77,4	3,64
Argon	Diamagnetyk (-6,99)	87,3	3,35
Kwas azotowy (NO)	Paramagnetyk (+1461)	121,4	~3,8
Dwutlenek węgla (CO ₂)	Diamagnetyk (-20)	194,7	~4,0

Przykładem mieszaniny gazów jest powietrze. Głównymi składnikami powietrza są: azot oraz tlen, istotną rolę odgrywa także w tej mieszaninie dwutlenek węgla [5]. W pewnych sytuacjach jego koncentracja powinna być zmniejszana, jak ma to miejsce przy emisji spalin przez zakłady przemysłowe. Z kolei redukcja zawartości tlenu, może być wskazana w przypadku intensyfikacji upraw roślinnych.

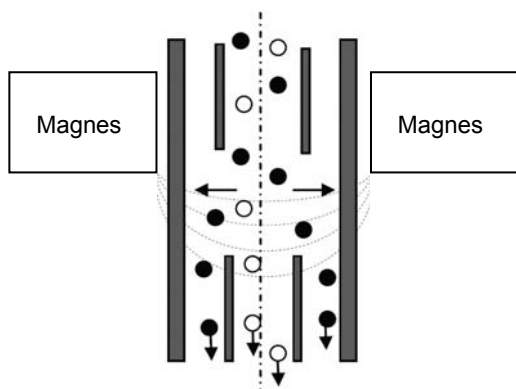
Gazy wchodzące w skład powietrza posiadają różne podatności magnetyczne, azot jest diamagnetykiem (N₂, $\chi_m = -12.05 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$), a tlen ma właściwości paramagnetyczne (O₂, $\chi_m = 3402 \cdot 10^{-6} \text{ cm}^3/\text{mol}$) [4]. W tabeli 1 przedstawiono właściwości poszczególnych gazów.

Przepływ powietrza lub tlenu przez obszar oddziaływania pola magnetycznego, jest typowym przepływem medium o właściwościach paramagnetycznych. Poprzez zmianę wartości pola magnetycznego oraz jego gradientu pola, można regulować oddziaływanie pola na cząstki gazu [6, 7]. Bardzo silne pole magnetyczne i gradient tego pola może również powodować tworzenie się kurtyny powietrznej co w konsekwencji może spowodować blokowanie przepływu gazu [8, 9]. Wykorzystując różne właściwości magnetyczne gazów można wpływać na trajektorie ruchu cząsteczek znajdujących się w obszarze działania pola magnetycznego, a co za tym idzie, rozdzielać lub wzbogacać mieszaniny gazów mających różne podatności magnetyczne [4, 10]. Efektem może być powietrze wzbogacone w tlen lub też czysty tlen.

Separator odchylający OGMS

Do rozdziału mieszaniny na produkty o różnych właściwościach magnetycznych dobiera się różnego rodzaju konstrukcje separatorów w zależności od właściwości separowanego medium. Współczesne metody opierają się między innymi na wykorzystaniu silnie niejednorodnych pól. Są to tak zwane metody wysokogradientowej separacji. Spośród znanych rozwiązań konstrukcyjnych wykorzystujących tę metodę separacji jest tzw. separator odchylający (deflekcyjny, OGMS – Open Gradient Magnetic Separator). Jest to urządzenie o działaniu ciągłym, w którym frakcja magnetyczna siłami pola magnetycznego zostaje odchylona od przepływającej strugi. W obszarze działania silnie niejednorodnego pola wytworzonego przez odpowiednio ułożenie uzwojeń (kwadrupolowe, walcowe, itp.) lub magnesów trwałych, następuje proces separacji, czyli rozdzielania cząstek o różnych właściwościach magnetycznych. Na rysunku 1 przedstawiono ideę odchylania cząstek w tego typu separatorze. W separatorze typu OGMS cząsteczki o właściwościach ferro- lub para- magnetycznych są przyciągane do ścianek toru w którym są przesyłane. Cząsteczki o właściwościach diamagnetycznych są

odpychane od pola w kierunku środka toru, uzyskując tym pożądaną oddzielanie cząstek [11].

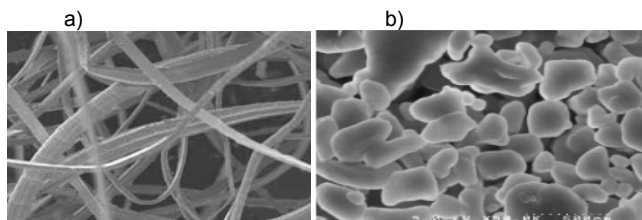


● – cząsteczki paramagnetyczne,
○ – cząsteczki diamagnetyczne.

Rys.1. Zasada działania separatora odchylającego

Separator matrycowy HGMS

Kolejną z odmian konstrukcyjnych separatorów wykorzystujących metodę wysokogradientowej separacji magnetycznej jest matrycowy separator typu HGMS – High Gradient Magnetic Separator. Pole magnetyczne wzbudzone jest przez proste w budowie uzwojenie solenoidalne. Niejednorodność pola wytwarzana jest nie przez kształt uzwojenia, lecz przez elementy ferromagnetyczne np. kulki, wióra, watę stalową (rys. 2 a), umieszczoną w matrycy wprowadzonej w pole magnetyczne. Cząstki frakcji magnetycznej z przepływającej przez matrycę zawiesiny osadzają się na elementach ferromagnetycznych – kolektorach. Pozostałe cząstki (frakcja niemagnetyczna) odbierane są poza matrycą [12].



Rys. 2. a) Zdjęcie waty stalowej stosowanej w matrycach separatora HGMS, b) zdjęcie membrany wykonanej z grafenu [13]

Stosując zamiast matrycy, membrany wykonane z odpowiednich materiałów, poprzez analogię działania, można zastosować tego typu separator do wzbogacania lub zubożania powietrza w tlen. Na rysunku 2 b. przedstawiono zdjęcie membrany wykonanej z grafenu. Widać przestrzenie między ziarnami grafenu. Przestrzenie te mogą służyć jako kanały do transportu gazu w membranie.

Siła pola magnetycznego

Wartość siły pochodzącej od pola magnetycznego działającej na cząsteczki gazu, wyraża się wzorem:

$$(1) \quad \mathbf{F} = \mathbf{M} \cdot \frac{d\mathbf{H}}{dz} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{M} \frac{d\mathbf{B}}{dz}$$

gdzie: F – wartość siły magnetycznej, μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni, H – natężenia pola magnetycznego, B – indukcja magnetyczna, $\frac{dB}{dz}$ – wartość gradientu pola, M – magnetyzacja.

Magnetyzację można zapisać jako:

$$(2) \quad \mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} = \frac{1}{\mu_0} \chi_m \mathbf{B}$$

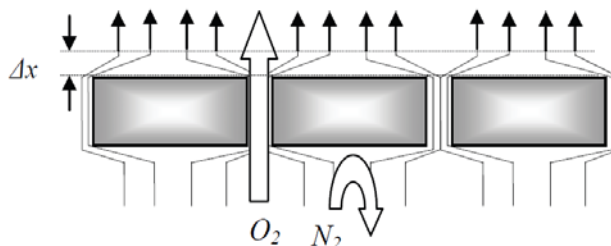
gdzie: χ_m – podatność magnetyczna gazu.

Podatność materiałów paramagnetycznych takich jak tlen oraz tlenek azotu jest dodatnia, natomiast gazów diamagnetycznych (azot, dwutlenek węgla) może być ujemna (tabela.1). Podstawiając równanie (2) do równania (1) otrzymano:

$$(3) \quad \mathbf{F} = \frac{1}{\mu_0^2} \chi_m \cdot \mathbf{B} \cdot \frac{d\mathbf{B}}{dz}$$

Siła jest skierowana w kierunku gradientu pola magnetycznego i nie pokrywa się z kierunkiem indukcji pola magnetycznego. Gradient pola magnetycznego można wytworzyć umieszczając w polu elementy porowate o właściwościach ferro- (proszek neodymowy) lub diamagnetycznych (grafen, nadprzewodnik). Różnica między wartościami momentów magnetycznych cząsteczek tlenu i azotu jest znacząca, co daje szansę skutecznego rozdzielania tych gazów. W paramagnetycznej substancji, w obecności pola magnetycznego, indukowane momenty magnetyczne ustawiają się zgodnie z liniami pola, co skutkuje powstaniem siły przyciągającej paramagnetyk w kierunku źródła pola. Diamagnetyk w polu magnetycznym zachowuje się w odwrotny sposób. Indukowane momenty magnetyczne układają się w kierunku przeciwnym do linii pola magnetycznego.

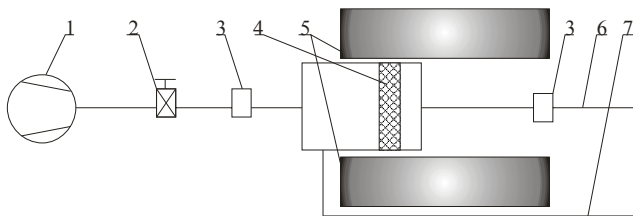
Na rysunku 3 przedstawiono schemat oddziaływania siły pola i gradientu pola magnetycznego wytworzonego w skutek umieszczenia w obszarze pola magnetycznego elementu porowatego o właściwościach diamagnetycznych, na tlen O_2 oraz azot N_2 . Można wywnioskować, że tlen będzie wciągany w obszar silnej niejednorodności pola, azot zaś - ze względu na inne właściwości - wypychany z tego obszaru.



Rys.3. Schemat działania sił pola magnetycznego i gradientu pola na tlen i azot [5]

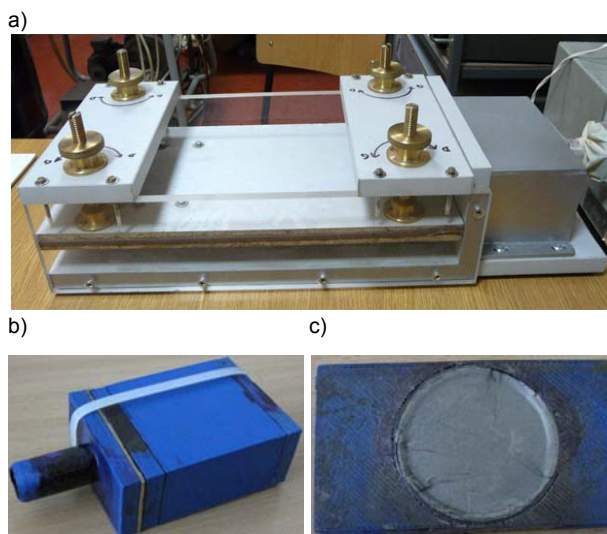
Badania laboratoryjne

Jako element diamagnetyczny wytwarzający gradient pola magnetycznego można wykorzystać membranę wykonaną z nadprzewodnika a więc z materiału, który poniżej temperatury krytycznej T_C jest idealnym diamagnetykiem. Temperatury pracy nadprzewodników są bardzo niskie (około 77 K), zatem utrzymanie membrany w tak niskiej temperaturze, bez chłodzenia przepływającego gazu jest technicznie bardzo trudne. We własnych, pierwszych eksperymentach, których celem było stwierdzenie możliwości wzbogacenia powietrza w tlen, do budowy membrany diamagnetycznej wykorzystano materiał mający także właściwości diamagnetyczne - grafen [13]. Z wykonanych pomiarów podatności magnetycznej grafenu, otrzymano wartość podatności objętościowej $\chi = -1.068 \cdot 10^{-8}$.



Rys.4. Schemat układu pomiarowego do separacji gazu: 1 – kompresor, 2 – zawór regulujący ciśnienie, 3 – czujniki pomiaru zawartości tlenu, 4 – membrana, 5 – magnesy neodymowe, 6 – tor ze wzbogaconym powietrzem w tlen, 7 – tor ze zubożonym powietrzem w tlen

Na rysunku 4, przedstawiono schemat układ badawczego do rozdzielania gazów wchodzących w skład powietrza. Składa się on z kompresora tworzącego ciśnienie, umożliwiające przepływ powietrza oraz zaworu, który zamyka lub otwiera a także reguluje przepływ gazu. Czujniki tlenu umożliwiają pomiar zawartości tego gazu, przed układem rozdzielającym (membraną) oraz w przewodzie w którym spodziewana jest wyższa zawartość tlenu. Do pomiaru zawartości tlenu użyto czujników firmy Figaro Engineering (KE-25 i KE-50). Główną częścią układu są magnesy neodymowe wytwarzające pole magnetyczne (rys. 5a), oraz kolektor (rys. 5b), w którym umieszczona została membrana (rys. 5c). Membrana ma strukturę porowatą, przepuszczającą gaz, wykonana została z grafenu z domieszką żywicy.



Rys.5. Elementy stanowiska do separacji powietrza: a) układ magnesów neodymowych, b) kolektor w którym jest umieszczona membrana, c) membrana wykonana z grafenu

Podsumowanie

Analiza wyników pomiarów pierwszych eksperymentów zawartości tlenu wykazała różnicę około 1,5%, między wskazaniem czujnika przed membraną a wskazaniem czujnika znajdującego się za membraną. Różnica ta jest nieduża (na poziomie błędu pomiarowego). Niemniej jednak otrzymane wyniki są obiecujące i zachęcają autorów do prowadzenia dalszych badań w tym obszarze. Z

ekonomicznego punktu widzenia, ze względu na rosnące koszty emisji dwutlenku węgla, pociągające za sobą w skali kraju roczne opłaty emisyjne sięgające miliardów złotych, poprawianie współczynnika zawartości tlenu do dwutlenku węgla w emitowanych spalinach o każdy punkt procentowy powinno być brane pod uwagę. Dalsze badania, mimo iż wiążą się z kosztami, mogą w niedalekiej przyszłości doprowadzić do znaczących oszczędności związanych z opłatami za emisję CO₂.

LITERATURA

- [1] Lebioda M., Rymaszcwski J., Korzeniewska E.: *Zastosowania taśm nadprzewodnikowych drugiej generacji do wytwarzania silnych pól magnetycznych*, Przegląd Elektrotechniczny, 2013, r 89, nr 12, s. 265-268
- [2] Brożek M., Surowiak A.: *Distribution of settling velocity of particles in samples of mineral raw materials*. Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 2004, 20, s. 67-84
- [3] Yoon J.-B., Jang E.-S., Ayril A., Cot L., Choy J.-H.: *High-Tc Superconducting Membrane: Theoretical Consideration for Gas Separation*, Bulletin of The Korean Chemistry Society, 2001, (22), 10, 1149-1152
- [4] Cieśla A. *Theoretical consideration for oxygen enrichment from air using high-TC superconducting membranes*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 88, NR 7b/2012, 40-43
- [5] Mazurkiewicz M., Uliasz-Bocheńczyk A., Mokrzycki E., Piotrowski Z., Pomykała R.: *Metody separacji i wychwytywania CO₂*, Polityka Energetyczna, t.8, 2005, 527-538
- [6] Lu S. Ozoe H.: *Effects of gradient magnetic fields on the magneto-thermal mixed convection of air in a horizontal pipe*, Chemical Engineering Communications, (2008) 195:5, 536-545
- [7] Tani H., Koganezawa S., Tagawa N.: *Drag Reduction of Laminar Airflow in Circular Pipe With Magnetic Field* IEEE Transactions On Magnetics, VOL. 49, NO. 7, 2013, 3468-3471
- [8] Ueno S., Iwasaka M., Eguchi H. Kitajima T.: *Dynamic Behavior of Gas Flow in Gradient Magnetic Fields* IEEE Transactions On Magnetics, VOL. 29, NO. 6, 1993, 3264-3266
- [9] Ueno S., Iwasaka M., Kitajima T.: *Redistribution of dissolved oxygen concentration under magnetic fields up to 8 T* Journal of Applied Physics 75, (1994), 7174 -7176
- [10] Cai J., Li W., Wu P., Li Z., Tong L., Sun S.: *Study on oxygen enrichment from air by application of the gradient magnetic field* Journal of Magnetism and Magnetic Materials 320 (2008) 171-181
- [11] Cieśla A., Kraszewski W., Skowron M.: *Komputerowe modelowanie ruchu cząstek słabomagnetycznych w magnetycznym separatorze typu OGMS*, XXVIII Międzynarodowa Konferencja z Podstaw elektrotechniki i teorii obwodów IC – SPETO 2005, 163-166.
- [12] Cieśla A., Kraszewski W., Skowron M.: *Komputerowe modelowanie ruchu cząstek słabomagnetycznych w magnetycznym separatorze typu HGMS*, XXVIII Międzynarodowa Konferencja z Podstaw elektrotechniki i teorii obwodów IC – SPETO 2005, 147-150.
- [13] Sepioni M. *Magnetic properties of graphene* University of Manchester Faculty of Engineering and Physical sciences, Degree of Doctor 2012

Autorzy: dr hab. inż. Antoni Cieśla, prof. AGH, dr inż. Wojciech Kraszewski, dr inż. Mikołaj Skowron, dr inż. Przemysław Syrek, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Katedra Elektrotechniki i Elektroenergetyki, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: aciesla@agh.edu.pl, wkraszew@agh.edu.pl, [mskowron@agh.edu.pl](mailto:miskowron@agh.edu.pl), syrekp@agh.edu.pl.