

Mikrofalowa metoda określania wilgotności lignocelulozowych paliw stałych

Streszczenie. Celem pracy była budowa toru mikrofalowego z przelotowym otworem umożliwiającym określenie wilgotności lignocelulozowych paliw stałych. Tor mikrofalowy zbudowany został z generatora, falowodu z przelotowym otworem wykonanym w szerszych ściankach, oraz krótkiego zwartego na końcu odcinka falowodu z detektorem lub obciążonego miernikiem mocy. Badania wilgotności przeprowadzono umieszczając w otworze próbki w kształcie walca z drewna lub peletu, odnosząc otrzymane straty mocy do mocy na wyjściu przy braku próbki w falowodzie.

Abstract. The aim of the study was the construction of the microwave path through hole allows you to specify humidity lignocellulosic solid fuels. The microwave generator is built, the waveguide through hole formed in the wider wall, and the short short-circuited section of the waveguide to the detector or load power meter. Moisture tests were carried out using received in the opening as a sample in the cylindrical timber or pellet reference received power losses to the output power in the absence of the sample in the waveguide. (**Microwave method for determining the moisture of lignocellulosic solid fuels**).

Słowa kluczowe: lignoceluloza, wilgotność, poprzecznie wycięty tor falowodowy, straty mocy.

Keywords: lignocellulose, water content, wave guide with hole, power losses.

Mikrofałe, ich zastosowanie i pochłanianie

Mikrofałe, jest to promieniowanie elektromagnetyczne o długości fali pomiędzy falami ultrakrótkimi a podczerwienią czyli mieszczą się one w zakresie częstotliwości rzędu f [GHz] od 3 do 300 [7]. Rozwój teorii mikrofal i techniki ich stosowania nastąpił dopiero w czasie prac nad radarem latach trzydziestych dwudziestego wieku. Stosowanie częstotliwości mikrofalowych oznacza, że rozmiary urządzeń są zbliżone do długości stosowanej fali a opisu obwodu dokonuje się za pomocą równań teorii pola elektromagnetycznego. Najczęściej stosowanym urządzeniem służącym do prowadzenia mikrofal jest falowód.

Promieniowanie mikrofalowe jest pochłanianie przez materię na dwa różne sposoby, pierwszy związany jest z przewodnictwem jonowym drugi związany ze zjawiskiem strat dielektrycznych powstających na skutek polaryzacji dipolowej. Woda jest dipolem, nawet występując w strukturze innego materiału nadal jest dipolem, dlatego w tej pracy wykorzystano drugi mechanizm start energii.

Lignoceluloza jako paliwo oraz idea mikrofalowej metody określania jej wilgotności

Biomasa lignocelulozowa, uważana jest obecnie za ekologiczne paliwo spalane codziennie w piecach służących do ogrzewania pomieszczeń lub w piecach przemysłowych. Obecnie, ze względu na właściwości energetyczne oraz prostotę użytkowania zalicza się go do bardzo efektywnych źródeł energii cieplnej [3].

Idea mikrofalowej metody określania wilgotności jest prosta [2]: jeżeli rośnie wilgotność (zawartość wody) próbki badawczej umieszczonej w przelotowym wycięciu falowodu, ze względu na wysoką wartość przenikalności elektrycznej wody zwiększa się absorpcja promieniowania mikrofalowego przez tę próbkę. Im wilgotniejszy materiał znajduje się w przelotowym wycięciu tym większa jest moc absorbowana przez badany materiał. Różnica między mocą fali elektromagnetycznej podaną na wejściu a pomierzoną na końcu toru falowodowego pozwala na pośrednie wyznaczenie wilgotności badanej próbki.

Drewno jako składnik lignocelulozy

Drewno jest materiałem powszechnie dostępnym, z którego człowiek korzysta od tysiącleci, choć z czasem rozszerzyły się formy jego korzystania [4]. Podstawowymi pierwiastkami wchodzącymi w skład drewna są [5]: węgiel (około 50 [%]), tlen (ponad 40 [%]), wodór (około 6 [%]), azot (około 0,2 [%]) oraz inne w tym woda. Główne związki

tworzące drewno to: celuloza (około 45 [%]), hemiceluloza (około 30 [%]) oraz lignina (około 20 [%]) i woda. Ponadto w drewnie występują też takie związki jak białko, skrobia, cukier, guma. Gęstość materiału drzewnego jest uzależniona od jego wilgotności i rodzaju drzewa z którego jest otrzymane. Drewno jako diamagnetyk jest materiałem higroskopijnym to znaczy posiada skłonność do wchłaniania wilgoci z powietrza lub oddaje ją do powietrza tak długo, aż osiągnie stan równowagi pomiędzy wilgotnością własną a wilgotnością otoczenia.

Woda nasycająca lignocelulozę

Czysta woda jako związek chemiczny składa się z dwóch atomów wodoru i jednego atomu tlenu [6]. Woda posiada cztery stany skupienia: stały, ciekły, gazowy oraz płynny stan krystaliczny występujący pomiędzy temperaturami 0 [C] a 60 [C], w którym posiada specjalny ładunek magnetyczny. Woda jest dipolem trwałym, w którym środki ładunków dodatnich i ujemnych są rozdzielone, a jej molekuły mają trwały moment dipolowy [1]. Ulega ona w polu elektrycznym bardzo silnej polaryzacji. W przyłożonym zewnętrznym polu elektrycznym molekuły polarne wody dążą do ustawienia się wzdłuż linii tego pola ale sieć wiązań wodorowych przeciwstawia się takiemu ustawieniu. Woda jest bardzo spoista (kohezyjna) i dlatego ma wysoką stałą dielektryczną. Względna przenikalność elektryczna (stała dielektryczna) czystej wody w temperaturze 20 [C] wynosi $\epsilon_r = 81,0$. Zanieczyszczenia wody powodują, że zmiana ulega jej ϵ_r . Wraz ze wzrostem temperatury stała dielektryczna wody ϵ_r maleje (rys. 3), a wraz ze wzrostem ciśnienia atmosferycznego stała dielektryczna wody ϵ_r rośnie. Woda posiada również własne częstotliwości rezonansowe, dla czystej wody w temperaturze pokojowej wynoszą one [5]: dla polaryzacji jonowej $f_{01} = 22,3$ [GHz], dla polaryzacji atomowej $f_{02} = 183,3$ [GHz] oraz polaryzacji orientalnej $f_{03} = 323,8$ [GHz]. Woda nasączająca materiały (np. drewno) wpływa na częstości rezonansowe tych materiałów.

Substancja dielektryczna o złożonej budowie w zewnętrznym zmiennym polu elektromagnetycznym

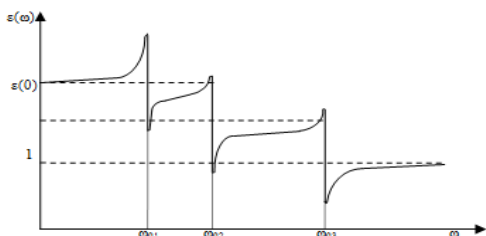
Oddziaływania zewnętrznego zmiennego pola magnetycznego na materiał dielektryczny są znikome i nie są tu analizowane.

Biorąc pod uwagę natężenie zewnętrznego pola elektrycznego harmonicznie zmieniającego się w czasie, działającego na dielektryk, przy czym niezależnie od

sposobu generacji (działanie prądu elektrycznego lub wymuszenie przez źródło pola) ma ono postać: $E(t) = E_m \sin \omega t = E \sqrt{2} \sin \omega t [V/m]$ gdzie: $\omega = 2\pi f [1/s]$ - pulsacja, $f [Hz]$ - częstotliwość, $E_m [V/m]$ - amplituda pola elektrycznego, $E [V/m]$ wartość skuteczna natężenia pola elektrycznego.

Wielkość polaryzacji elektronowej i polaryzacji cząsteczkowej uzależniona jest od amplitudy pola elektrycznego E_m oraz od pulsacji wymuszającej ω . Zależność przenikalności elektrycznej względnej (stałej dielektrycznej) ϵ_r od pulsacji wymuszającej ω jest na ogół dość skomplikowana i zależy od szczegółów budowy dielektryka np. rodzajów wchodzących w jego skład atomów oraz rodzaju wiązań międzyatomowych [1]. Po usunięciu wymuszającego pola elektrycznego, ładunki elektryczne w atomach dielektryka powracają do pierwotnego położenia równowagi ruchem harmonicznym tłumionym, który można zapisać w postaci ogólnej zależnością $Ae^{-\alpha t} \sin \omega_0 t$ gdzie A, α są to stała zależne od rodzaju dielektryka i wartości wymuszającego pola elektrycznego, natomiast $\omega_0 [1/s]$ jest to charakterystyczna dla każdego rodzaju atomu częstość drgań własnych (pulsacja mechaniczna). Ten efekt powoduje, że atomy uważa się za oscylatory harmoniczne tłumione.

Pod wpływem harmonicznego zewnętrznego pola elektrycznego rozkład elektronów w atomach dielektryka zmienia się periodycznie wraz z pulsacją wymuszającą ω . Amplituda wychyleń elektronów zależy od różnicy $\omega - \omega_0$ pomiędzy pulsacją pola elektrycznego a częstością drgań własnych atomów. Wartość różnicy $\omega - \omega_0$ wpływa również na przenikalność elektryczną ϵ_r ośrodka dielektrycznego. Dla pulsacji ω znacznie mniejszej od częstości ω_0 amplituda wychyleń elektronów jest taka jak dla pola elektrycznego stałego w czasie. Stała dielektryczna ϵ_r jest więc taka jak w przypadku pola elektrycznego stałego a wartość tej przenikalności dielektrycznej nosi nazwę statycznej stałej dielektrycznej. Gdy pulsacja ω jest znacznie większa od częstości drgań własnych ω_0 , amplituda drgań wymuszonych jest znikomo mała, można powiedzieć obrazowo, że elektrony nie zdążają się wychylić w jedną stronę, a pole elektryczne już zmienia kierunek i zmusza je do wychylenia w drugą stronę. Polaryzacja dielektryka jest wtedy mała i przyjmuje się, że stała dielektryczna ϵ_r dla wielkich częstości ma wartość zbliżoną do jedności. Dla pulsacji ω zmierzającej do wartości porównywalnej z częstością drgań własnych ω_0 , amplituda wychyleń elektronów dielektryka gwałtownie rośnie a przy występującym wtedy rezonansie stała dielektryczna ϵ_r osiąga szczególnie duże zespolone wartości.



Rys. 1. Typowa zależność stałej dielektrycznej od pulsacji w materiale dielektrycznym. Do ω_{01} obszar małych częstości (prawie wymuszenia stałe) stała dielektryczna jest bliska jej wartości statycznej, w obszarze częstości większych od ω_{03} stała dielektryczna ma wartość równą jedności. W punktach pulsacji drgań własnych $\omega_{01}, \omega_{02}, \omega_{03}$ stała dielektryczna, na skutek istniejących rezonansów, osiąga duże wartości.

W materiałach dielektrycznym zbudowanych z atomów różnego rodzaju substancji mamy do czynienia z kilkoma częstościami drgań własnych atomów materiałów

składowych a zależność stałej dielektrycznej od częstotliwości komplikuje się jeszcze bardziej ϵ_r staje się liczbą zespoloną. Dla częstotliwości bliskiej którejkolwiek z częstotliwości rezonansowej materiałów składowych stała dielektryczna ϵ_r osiąga szczególnie duże wartości.

Częstości drgań własnych w atomach, z których zbudowany jest dielektryk są tak duże, że zależność stałej dielektrycznej od częstotliwości drgań wymuszającego pola zewnętrznego odgrywa dopiero istotną rolę dla pola elektrycznego o długości fali elektromagnetycznej mniejszej od $\lambda = 0,159 [m]$ co odpowiada pulsacji $\omega = 1,884 [GHz]$.

Falowód z przelotowym otworem, budowa toru falowodowego, prowadzone pomiary

W pracy [2] przedstawiono założenia określające możliwości pomiaru wilgotności biomasy w postaci sypkiej a początkowe badania tam przedstawione wykonano wypełniając stopniowo otwartą przestrzeń w falowodzie dla pasma X z zakresu mikrofal od 8 [GHz] do 12,5 [GHz] na torze falowodowym typu WR (USA) 90 o wymiarach wewnętrznych: 22,86 [mm] x 10,16 [mm]. Już po przeprowadzeniu badań, autorzy doszli do wniosku, że dla planowanego w przyszłości pomiaru wilgotności w ruchu przesywowym rozdrobnionej lignocelulozy, wykorzystanie tak niewielkiego przekroju wykonanego otwory w węższej ścianie falowodu jest dużym ograniczeniem zaproponowanej metody.

Ponieważ cząsteczki wody zawarte w lignocelulozie pochłaniają znaczną część energii pola elektromagnetycznego a odbijają tylko jej niewielką część, dlatego wykorzystując to zjawisko, zaproponowano zmodyfikowaną metodę identyfikacji wilgotności w tym materiale. Tym razem do badań wybrano falowód o oznaczeniu WR 159 lub (R 58) o dwukrotnie większych wymiarach wewnętrznych: 40,38 [mm] x 20,193 [mm], przy dolnej częstotliwości granicznej rodzaju podstawowego $TE_{1,0} (H_{1,0})$ wynoszącej $f = 3,712 [GHz]$ (pasmo S). Wycięto przelotowo otwór o wymiarach 60 [mm] x 40 [mm] w szerszej ścianie falowodu, co odpowiadało połowie długości fali tj. 40 [mm]. Falowód z prostokątnym przelotowym otworem pozwolił na złożenie doświadczalnego toru mikrofalowego składającego się z generatora VGSH 100A firmy Alcatel o zakresie 0,5 [GHz] do 18 [GHz] zasilającego tor falowodowy, w którego skład wchodziły: badany odcinek falowodu z przelotowym otworem, odcinek falowodu z przyłączonym detektorem oraz miernikiem mocy typu 4220 o zakresie od 0,5 [GHz] do 18 [GHz] firmy Boonton na wyjściu. W tym torze przeprowadzono komplet typowych badań odcinka falowodu mierząc początkowo moc wyjściową dla pełnego falowodu (bez wyciętego przelotowego otworu).

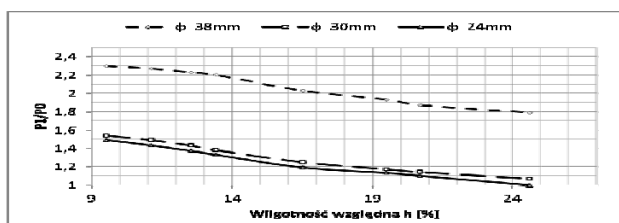
Po wycięciu przelotowego otworu w szerszym boku falowodu o długości $\lambda/2$, zmniejszyła się wartość składowej elektrycznej w falowodzie w stosunku do wartości składowej elektrycznej w falowodzie bez otworu. Przelotowy otwór, na całą szerokość ścianki, wykonano w falowodzie na długości 60 [mm] (długość fali elektromagnetycznej). W czasie badań w otworze tym umieszczano próbki w postaci wałków z drewna sosnowego oraz sprasowanego peletu. Próbki te miały odpowiednio średnice: 24, 30 i 38 [mm] oraz wysokość 25 [mm]. Umieszczenie w osi środkowej przelotowego otworu pionowo suchych próbek walcowych o różnym promieniu powodowało wzmocnienie składowej elektrycznej fali elektromagnetycznej w falowodzie. Z teoretycznego punktu widzenia, istnieje możliwość takiego doboru średnicy próbki o określonej przenikalności elektrycznej ϵ , aby skompensować połowę wpływ wycięcia falowodu przez umieszczoną w nim próbkę walcową z lignocelulozy. Określenie poziomu odniesienia mocy wyjściowej jak i kalibrację całego układu pomiarowego

przeprowadzić można dla próbki wzorcowej o takich samych wymiarach i tak samo umieszczonej jak próbka badana ale wykonanej z materiału nie nasiąkającego wodą, takiego jak np. teflon. Działania takie umożliwiają kalibrację całego układu wykorzystując dielektryczne własności próbki wzorcowej. Jeżeli w wewnętrznej strukturze próbki występuje jakaś niejednorodność (np. bańka powietrza), to za pomocą zaproponowanej metody jest ona możliwa do wykrycia poprzez określenie zmiany wartości mocy na wyjściu. Im większe wskazania miernika mocy, tym przenikalność elektryczna próbki ma wyższą wartość. Najlepsze warunki do badania próbek lignocelulozowych otrzymuje się, jeżeli jest ona umieszczona centralnie w osi symetrii wyciętego prostokątnego otworu. W tym miejscu, niezależnie od tego czy koniec falowodu będzie zwarty czy też będzie pracował w stanie dopasowania, wartość mocy przepływającej przez falowód będzie maksymalna. Zdaniem autorów, przez otwór można przepuszczać odpowiednio spreparowane badane medium również w ruchu otrzymując ciągłą kontrolę jego wilgotności w czasie rzeczywistym.



Rys. 2. Zależność P1/P0 w funkcji szerokości badanej próbki dla różnej wilgotności względnej materiału h[%].

Na rys.2 przedstawione zostały charakterystyki stosunku mocy na wyjściu P1 układu do mocy P0 uzyskanej na wyjściu falowodu z otworem ale bez próbki, uzyskane ze stopniowego wypełniania prostokątnego przelotowego otworu w falowodzie rozdrobnioną, odpowiednio ubitą masą wykonaną z peletu oraz odpowiedniej szerokości przycinanymi kawałkami długości wysuszonego drewna sosnowego. Przy wypełnieniu otworu w falowodzie (do 1/6 długości wycięcia) dla wilgotności próbek do 30 [%] iloraz P1/P0 osiągał wartość bliską 1,35. Natomiast próbka z suchego drewna sosnowego przy wypełnieniu od 1/6 długości wycięcia do całkowitego wypełnienia, licząc od osi symetrii szczeliny, iloraz P1/P0 osiągnął wartość od 1,3 do 1,9 w sposób praktycznie proporcjonalny. Dla próbki z rozdrobnionego peletu o wilgotności względnej 29,8 [%] już przy wypełnieniu 1/6 długości przelotowego wycięcia iloraz P1/P0 osiąga wartość 1,4 i dalsze wypełnianie wycięcia nie zmienia wartości tego ilorazu. Dlatego dalsze wypełnianie otworu w falowodzie wilgotnym peletem nie zmienia w sposób znaczący przekazu mocy, to znaczy że dla wilgotnych próbek wystarczy wypełnić np. tylko 1/6 długości otworu w falowodzie.



Rys. 3. Zależność P1/P0 mocy pomierzonej w funkcji wilgotności względnej próbek walcowych o różnych średnicach.

Na rys. 3 przedstawiono zależność ilorazu mocy P1/P0 w funkcji wilgotności względnej h [%] dla różnych średnic próbek walcowych wykonanych z ubitego rozdrobnionego peletu, pokazano wyniki otrzymane dla próbek walcowych o

średnicy 24, 30, 38 [mm] o różnych stopniach ich wilgotności. Z rysunku 3 widać wzrastanie wartości ilorazu P1/P0 dla próbek wraz z rosnącą ich średnicą oraz spadek wartości tego ilorazu jeżeli zwiększa się wilgotność próbki. Dla próbki o średnicy 24 [mm] już przy wilgotności ok. 25 [%] wartość ilorazu P1/P0 jest w przybliżeniu taka sama jak dla tego falowodu z otworem bez próbki.

Wydaje się, że przez dobór odpowiedniej średnicy próbki można kalibrować układ pomiarowy. Dla średnicy próbek w przybliżeniu równych około połowie szerokości dłuższej ścianki falowodu zmiany ilorazu P1/P0 następują w sposób proporcjonalny i mogą zmierzać, przy określonej wilgotności względnej, do wartości równej jedności. Wielkość tych zmian można regulować przez odpowiedni dobór średnicy próbek.

Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić że optymalne są próbki lignocelulozowe walcowe, prawie dotykające boków wyciętej przestrzeni, chociaż możliwe jest wykorzystanie próbek walcowych, których średnica jest znacznie mniejsza od szerokości przelotowego otworu wyciętego w falowodzie. Umieszczając próbkę walcową o promieniu 24 [mm] wykonaną z suchego drewna, otrzymano na wyjściu układu pomiarowego prawie identyczną moc wyjściową P1 jak przy falowodzie bez otworu. Taka moc może być wykorzystana do kalibracji układu pomiarowego.

W zaproponowanym rozwiązaniu możliwa była kontrola wilgotności względnej lignocelulozy praktycznie w zakresie od 5 [%] do 30 [%].

Zbyt małe wymiary przelotowego otworu wykonanego w węższym boku falowodu WR 159 mogą być przyczyną trudności w prowadzeniu badań wilgotności niektórych materiałów lignocelulozowych. W przyszłości planuje się antenowe tubowe rozszerzenie części falowodu z otworem w celu przeprowadzenia badań z większym strumieniem lignocelulozy przechodzącego przez zwiększone wymiary otworu.

LITERATURA

- [1] Chełkowski A., Fizyka dielektryków, wydanie 3 zmienione, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993, s. 395, ISBN 83-01-11245-X
- [2] Gąsiorowski A., Posytek Z., Wpływ wilgotności biomasy na straty mocy w torze falowodowym na pasmo X z wyciętym przelotowo otworem, Przegląd Elektrotechniczny 90 (2014), Nr 12, 204-207, ISSN 0033-2097
- [3] Jasiulewicz M., Energetyczne wykorzystanie biomasy w działalności gospodarczej, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2009, s. 311. ISBN 9788373651821.
- [4] Kozakiewicz P., Krzosek S., Inżynieria materiałów drzewnych, Wydawnictwo Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa 2013, s. 164, ISBN 978-83-7583-426-0
- [5] Lide D. R. (Ed.), CRC Handbook of chemistry and physics: a ready – reference book of chemical and physical data, 90, Boca Raton: CRC Press, 2009.p. 2660, ISBN 9781439817551.
- [6] Overman M., Woda, Biblioteka Problemów T. 235, Państwowe Wydawnictwa Naukowe, Warszawa 1977, s. 262
- [7] Piątek Z., Jabłoński P., Podstawy teorii pola elektromagnetycznego, WNT, Warszawa 2010, s. 466, ISBN: 978-83-2043-599-3

Autorzy: dr inż. Aleksander Gąsiorowski, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, Zakład Podstaw Elektrotechniki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: alekq@el.pcz.czest.pl; dr inż. Zdzisław Posytek, Instytut Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej, Zakład Energoelektroniki i Podstaw Telekomunikacji, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: zdzychu@el.pcz.czest.pl; dr inż. Tomasz Drózdź, Uniwersytet Rolniczy im. H. Kołłątaja w Krakowie, Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki, 30-149 Kraków, ul. Balicka 116 D, E-mail: tomasz.drozdz@ur.krakow.