

Wpływ wilgotności biomasy na straty mocy w torze falowodowym na pasmo X z wyciętym przelotowo otworem

Streszczenie. W pracy zaproponowano metodę mikrofalowej identyfikacji zawartości wody w biomasie. Zbudowano laboratoryjny, pomiarowy tor falowodowy, z przelotowo wyciętym (poprzecznym) otworem w elemencie falowodu na którym przeprowadzono badania. Otrzymane wyniki badań wskazują na możliwość wykorzystania tej metody identyfikacji do określania zawartości wilgoci nie tylko w biomasie ale również w innych materiałach sypkich nasiąkających wodą a nie przewodzących prądu elektrycznego. Dla określania wilgotności biomasy zaproponowany sposób jest alternatywny do obecnie stosowanych metod elektrycznych i wagowych.

Abstract. A method of microwave identification of the biomass water content has been proposed in the research article. A laboratory measurement waveguide with a crosswise cut hole in the examined part of the waveguide was built. The gained research results indicate the possibility of using this identification method to determining the humidity not only in biomass but also in other water absorbing but not current conducting loose materials. The proposed method of determining the humidity of biomass is alternative to nowadays used electrical and weight methods. (The biomass humidity influence on power loss in wave guide for X band with hole).

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

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

doi:10.12915/pe.2014.12.50

Wstęp

Współczesny świat nie może egzystować bez ciągłego użytkowania energii. Aby zapewnić jej stały dopływ należy wykorzystywać lokalne źródła kopalne energii, energię atomową, ale najlepiej jednak byłoby wykorzystać źródła energii, które są odnawialne, tanie i ekologiczne, czyli nie niszczące środowiska. W traktacie akcesyjnym o przystąpieniu do Unii Europejskiej, Polska zadeklarowała wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w produkcji energii elektrycznej w roku 2010 do 7,5 % a w roku 2020 do 14 %. Położenie geograficzne Polski nie pozwala uzyskać znacznego udziału źródeł odnawialnych w energetyce z energii wodnej, wiatrowej lub geotermalnej. Dlatego spośród odnawialnych źródeł energii w Polsce największym zainteresowaniem cieszy się biomasa. Niezbędna staje się więc ocena właściwości energetycznych pozyskiwanej biomasy z uwzględnieniem jej właściwości fizycznych, chemicznych oraz możliwości wykorzystania.

Pojęcie biomasy

Według Dyrektywy 2001/77/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 27 września 2001 r. w sprawie wspierania produkcji na rynku wewnętrznym energii elektrycznej wytwarzanej ze źródeł odnawialnych (Dz.U.U.E. L. 283 z 27.10.2001) biomasę stanowią podatne na rozkład biologiczny frakcje produktów, odpady i pozostałości przemysłu rolnego, leśnictwa i związanych z nim gałęzi gospodarki, jak również podatne na rozkład biologiczny frakcje odpadów przemysłowych i miejskich. Substancje pochodzenia roślinnego zwane są fitomasą a pochodzenia zwierzęcego zoomasą. Natomiast Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 9 grudnia 2004 roku (Dz.U.R.P. 2004 r., Nr 267, poz. 2656) stanowi, że biomasa to stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z owoców, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej i przemysłu przetwarzającego ich produkty, a także części odpadów z innych działów gospodarki, które ulegają biodegradacji. Biomasę stanowią głównie odpady i pozostałości poprodukcyjne. Jednak niektóre formy biomasy są celowo wytwarzane w procesach produkcji rolniczej (np. plantacje roślin szybko rosnących jak wierzba wiciowa, słazowiec peruwiański, trzcina pospolita, słonecznik bulwiasty) oraz stanowią efekt produkcji prawie przemysłowej (np.

produkcja biomasy mikroorganizmów jaką jest plankton). Właściwości różnych rodzajów biomasy wpływają na jej praktyczne zastosowanie.

Biomasa lignocelulozowa i pelet

Na cele energetyczne wykorzystuje się przeważnie biomasę lignocelulozową (to jest drewno i jego odpady, rośliny pochodzące z upraw energetycznych, odpady organiczne z rolnictwa) oraz wybrane odpady komunalne i przemysłowe [2,4,6].

Przetworzona biomasa, szczególnie przetworzona biomasa lignocelulozowa, zwana również „granulatem drzewnym”, czasem z angielska „pelletem” lub w Polsce po prostu peletem, uważana jest obecnie za ekologiczne paliwo spalane w różnego rodzaju piecach służących do ogrzewania. Ze względu na właściwości energetyczne oraz prostotę użytkowania zalicza się to paliwo do bardzo efektywnych źródeł energii cieplnej [2]. Wydaje się, że jakość peletu określić można jego gęstością nasypową, wartością opalową, wilgotnością, ilością substancji szkodliwych dla środowiska oraz ilością popiołów otrzymywanych po spalaniu. Po spalaniu dobrego peletu pozostaje niewielka ilość popiołu wynosząca do 4-5 [%] wagi spalanego materiału, a sam popiół może służyć jako nawóz. Dodatkowo stosowanie peletu jako paliwa w lokalnych ciepłowniach budynków mieszkalnych, przyczynia się również do znaczącego zmniejszenia emisji innych gazów i pyłów, która odbywa się z niskich kominów tych domów. Taka „niska emisja” powoduje przenoszenie się wszystkich zanieczyszczeń powstałych w wyniku procesu spalania do powietrza, które następnie jest wdychane przez ludzi i zwierzęta.

Historia powstania peletu

Historia peletu, rozpoczyna się w ostatnich dwóch dziesiątkach lat XX wieku. Wykorzystując maszyny przeznaczone do produkcji granulatów paszowych dla bydła, w Ameryce Północnej oraz krajach skandynawskich rozpoczęto produkcję peletu na skalę przemysłową, wykorzystując dotychczas nie zagospodarowywane odpadki przemysłu drzewnego i rolnictwa. Pelet szybko zaczął być konkurencyjny w stosunku do innych paliw takich jak ekogroszek, węgiel, olej opałowy i gaz. Rosnące uznanie dla peletu ze strony użytkowników ogrzewania budowli poprzez spalanie materiałów palnych spowodowało rozwój

gałęzi przemysłu produkującego to paliwo. Rynek peletu początkowo szybko rozwijał się w Kanadzie oraz w Szwecji, Niemczech, Francji, Austrii, Holandii, Belgii, Szwecji, Norwegii, dlatego w ciągu ostatnich lat, w krajach Unii Europejskiej produkcja peletu oraz jego zużycie bardzo dynamicznie wzrasta. Także w Polsce produkt ten zdobywa coraz więcej zwolenników. W kraju jest on używany do ogrzewania budynków przemysłowych (piekarnie, ciepłownie miejskich), użyteczności publicznej (między innymi: urzędy, szkoły, hotele) i gospodarstw domowych, czyli wszędzie tam, gdzie klient oczekuje czystości i wygody. Czasem, ze względu na swoje walory zdrowotne bywa stosowany jako podściółka dla zwierząt (a dopiero po takim wykorzystaniu, osuszany i spalany).

Pelet jako paliwo ekologiczne

Aby wyjaśnić to, że pelet uważany jest za paliwo ekologiczne, należy posłużyć się myśleniem ekologów. W czasie wzrostu roślin i zwiększania się ich masy, w procesie fotosyntezy pochłaniają one z atmosfery dwutlenek węgla oraz wodę. Podczas spalania ilość wydzielonego dwutlenku węgla jest porównywalna z ilością dwutlenku węgla pochłoniętego przez rośliny podczas jego wzrostu, dlatego spalanie peletu nie wpływa na zwiększenia w atmosferze koncentracji cząstek dwutlenku węgla, gdyż te pochłaniane są przez nowo rosnące rośliny. Natomiast węgiel kamienny, brunatny czy torf, utworzone z roślin z przed tysięcy lat, nie są uważane za paliwo ekologiczne gdyż dwutlenek węgla z atmosfery pochłaniały rośliny, z których powstał przed tysiącem lat. Ten tok myślenia powoduje, że bilans pochłaniania i dodawania dwutlenku węgla przez rośliny nie jest określany w globalnej skali czasu a tylko w okresie czas, który rozpoczyna się w chwili nieznacznie odległej a kończy w dniu spalania paliwa.

Produkcja peletu

Surowcem do produkcji peletu może być praktycznie każdy rodzaj roślin, jednak najcenniejszym i najbardziej kalorycznym materiałem są trociny, ścinki, wióry drzewne oraz kora. Produkcja peletu polega na poddaniu dowolnej biomasy trzem kolejnym procesom: suszeniu, mieleniu oraz prasowaniu. Rodzaj suszenia jest dostosowany do rodzaju surowca. Mielenie (kruszenie) lignocelulozy przeprowadza się w młynie kulowym dającym suchą masę rozmieloną na proszek. Wysuszona i rozdrobniona biomasa, poddawana jest zabiegowi podgrzewania w wyniku którego lignina, która jest jednym z podstawowych składników drewna, zaczyna wykazywać właściwości klejące. Gorąca masa złożona z cząsteczek ligniny i celulozy w dalszym procesie produkcji jest prasowana w urządzeniu rotacyjnym który przeciska ją przez matrycę posiadającą do dwóch tysięcy otworów. Wychodzący z prasy pelet jest granulowany czyli skracany do odpowiedniej długości i chłodzony. Chłodzenie to nadaje mu odpowiednią twardość i stabilność. Należy dodać, że pelet nie zawiera żadnych chemicznych dodatków typu kleje, lakiery, utwardzacze itp. Ostatecznie przyjmuje on formę małych granulek, najczęściej o średnicy 6–8 [mm] i niewielkiej długości (rys.1). Istotnymi parametrami mającymi wpływ na zagęszczanie biomasy lignocelulozowej są jej stopień rozdrobnienia a także poziom jej wilgotności. Stopień rozdrobnienia biomasy lignocelulozowej ma duży wpływ na zachowanie kształtu i formy wyprodukowanego peletu.

Zaraz po zakończeniu procesu produkcji pelet charakteryzuje się niską zawartością wilgoci, wynoszącą od 6 [%] do 10 [%], ma wysoką wartość energetyczną do 19 tys. [kJ/kg], niską zawartość popiołu wynoszącą około od 4 do 5 [%] masy, małą ilością substancji szkodliwych dla środowiska (których procentowy udział uzależniony jest od użytego surowca) [2]. Jeżeli został użyty surowiec dobrej

jakości oraz został zastosowany właściwy przebieg procesu produkcji peletu, wówczas produkt finalny może ubiegać się o certyfikat jakości DIN Plus.



Rys. 1. Wygląd granulatu lignocelulozowego czyli peletu

Duża zawartość wilgoci w pelecie, powoduje wzrost jego gęstości, co ma również wpływ na wagową cenę jego sprzedaży oraz koszty transportu od producenta do pieca. Dodatkowo suchy pelet zbyt długo magazynowany akumuluje wodę a mokry nie nadaje się do spalania w piecach, gdyż przed spaleniem niepotrzebnie pobiera ciepło na samoosuszenie a powstająca para wodna dodatkowo aktywuje chlor i siarkę, które wraz z tlenkami są przyczyną tworzenia się szkodliwych osadów i korozji wysokotemperaturowej na wewnętrznych powierzchniach grzewczych pieca. Granulat przeznaczony do spalania, według producentów pieców, powinien posiadać wilgotność nie przekraczającą $h=12-16$ [%] [4], a o większej wilgotności, bez przesuszenia nie nadaje się do efektywnego spalania w piecach. Dlatego konieczne są skuteczne i proste metody techniczne szybkiej oceny wilgotności peletu [4,6].

Wilgotność lignocelulozy

Wilgotność jest podstawowym parametrem technologicznym lignocelulozy i wpływa zasadniczo na jej parametry fizyczne. Z tego powodu szybki, dokładny i niezawodny pomiar wilgotności tego materiału jest rzeczą niezbędną.

Względna stała dielektryczna ϵ_r drewna suchego, zależy od rodzaju drewna, wynosi około 2 do 4. Stała dielektryczna wody przy 20 [°C] wynosi 80 i wraz ze wzrostem temperatury wody, stała ta maleje osiągając przy 100 [°C] wartość 55, przy 200 [°C] wartość 35 [7]. Wpływ zawartości wody w drewnie na jego stałą dielektryczną ϵ_r jest bardzo duży. Zmiana stałej dielektrycznej ϵ_r drewna w funkcji wilgotności $h\%$ ma przebieg zbliżony do bipolarnej funkcji sigmoidalnej:

$$(1) \quad \epsilon_r(h) = a \tanh(bh + c) + d$$

gdzie: $h\%$ jest wilgotnością, a jest parametrem odpowiadającym za wyskalowanie funkcji na osi stałej dielektrycznej, b jest parametrem odpowiadającym za nachylenie funkcji, c parametrem odpowiadającym za przesunięcie funkcji na osi wilgotności, d jest parametrem odpowiadającym za przesunięcie funkcji na osi stałej dielektrycznej. Dla drewna miękkiego wielkości z zależności (1) przyjmują wartości: $a=3,269$, $b=0,080$, $c=-1,559$, $d=4,912$. Wielkości tak określone powodują, że funkcja bipolarna sigmoidalna jest przeskalowana w ten sposób, że dla drewna suchego (wilgotność $h=0\%$) stała dielektryczna

ϵ_r przyjmuje wartość około 2, następnie ze wzrostem wilgotności narasta a dla wilgotności około $h=17\%$, przełamuje się zmieniając sposób narastania, osiągając przy wilgotności $h=50\%$ wartość 8,25. Określony za pomocą zależności (1) przebieg stałej dielektrycznej w funkcji wilgotności $h\%$, dla podanych wartości współczynników a, b, c, d prawie pokrywa się z tym podanym w pracy [7].

Metody stosowane do badania wilgotności masy lignocelulozowej

Do badania wilgotności masy celulozowej zasadniczo obecnie stosuje się dwie grupy metod: metody wagowe i metody elektryczne [1]. Tutaj nie opisywana, **metoda destylacyjna**, stosowana jest w pracach badawczych i laboratoryjnych dla drewna zawierającego ciała lotne (olejki eteryczne, terpeny, tłuszcze, żywice, impregnaty itp.).

Od wielu lat do badania wilgotności materiałów lignocelulozowych stosowana jest **metoda wagowa**. Ta skomplikowana, czasochłonna i pracochłonna metoda polega na oddestylowaniu z ksylenem wody zawartej w odważce próbki, pomiarze objętości oddestylowanej wody po skropleniu pary i obliczeniu zawartości wilgoci na podstawie masy odważki próbki i objętości oddestylowanej wody, ochłodzonej do temperatury pokojowej [1]. Pod warunkiem dotrzymania wszystkich parametrów procesu pomiaru, metoda ta daje stosunkowo dokładne wyniki.

Do pomiaru wilgotności lignocelulozy powszechnie stosowane są obecnie wilgotnościomierze elektryczne (elektroniczne). Działają one na zasadzie pomiarów wybranych parametrów elektrycznych odpowiednio zagęszczonej (czasem sprasowanej) próbki, przetwarzając następnie zmierzoną wartość elektryczną na wilgotność badanego materiału wyrażoną w procentach.

Wilgotnościomierze elektroniczne pojemnościowe działają na zasadzie **pomiaru stałej dielektrycznej** badanego materiału [7]. Pomiar wartości stałej dielektrycznej wilgotnego drewna lub sprasowanej masy lignocelulozowej pozwala określić, na podstawie obliczeń ich wilgotność. Po nastawieniu parametrów drewna (gęstości i grubości próbki), jest ono penetrowane przez pole elektromagnetyczne generowane przez trzy płaskie przewodzące elektrody dotykowe, traktowane jako okładki kondensatora, którego dielektrykiem jest mierzony materiał. Wartość przenikalności dielektrycznej materiału wpływa na pojemność tak utworzonego kondensatora. Pomiar tej pojemności pozwala na ocenę wilgotności materiału. Ta metoda stosowana jest najczęściej do pomiaru wilgotność litego drewna od grubości 1 [cm]. Przykładem miernika wykorzystującego tą metodę pomiaru jest wilgotnościomierz WIP-22D firmy Tanel z Gliwic.

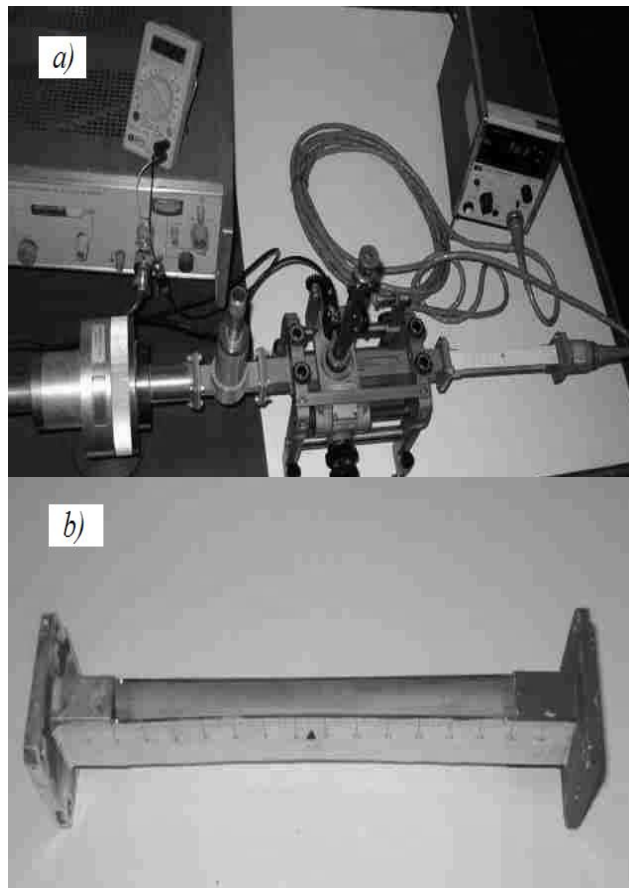
Wilgotnościomierze rezystancyjne działają na zasadzie **pomiaru rezystancji** (oporności) litego drewna lub sprasowanej próbki materiału lignocelulozowego. Pomiaru dokonuje się za pomocą elektrod metalowych wciśniętych w materiał. W praktycznie realizowanych miernikach wilgotności peletu, pomiaru dokonuje się w trzech etapach: w pierwszym zagęszcza się badaną próbkę do standardowej stałej gęstości, w drugim mierzy się jej rezystancję, w trzecim przelicza otrzymaną wartość na wilgotność materiału. Przykładem takiego miernika jest wilgotnościomierz WTR-1E firmy Tanel z Gliwic. Panuje opinia, że wilgotnościomierze pojemnościowe są dokładniejsze od wilgotnościomierzy rezystancyjnych.

Tor falowodowy na pasmo X z wyciętymi przelotowo bokami falowodu

Ponieważ cząsteczki wody zawarte w biomasie pochłaniają znaczną część energii pola

elektromagnetycznego a odbijają tylko jej niewielką część [3,5], dlatego wykorzystując to zjawisko, zaproponowano opisaną niżej metodę identyfikacji wilgotności rozdrobnionej biomasy lignocelulozowej. Dla badań wybrano pasmo X z zakresu mikrofalowego, to jest częstotliwości od 8 [GHz] do 12,5 [GHz]. Złożono doświadczalny tor mikrofalowy na elementach falowodu prostokątnego (rys. 2a) o oznaczeniach R100 (według I.E.C.) lub WR 90 (USA) [5]. Falowód ma wymiary przestrzeni wewnętrznej: 22,86 [mm] x 10,16 [mm], zalecaną częstotliwość pracy z zakresu 8,20 [GHz] - 12,40 [GHz] oraz częstotliwość odcięcia rodzaju TH₁₀ równą $f_o = 6,557$ [GHz].

Zbudowany tor mikrofalowy (układ pomiarowy) składa się z generatora typu G4-86 (produkcji rosyjskiej) o zakresie pracy 7,5 [GHz] - 10,5 [GHz] zasilającego tor falowodowy w którego skład wchodziły: przejście z kabla koncentrycznego na falowód PK.060-660 (produkcji rosyjskiej), izolator Polfer typu IX-34 (produkcji polskiej) eliminujący wpływ fali odbitej, falowodowy dzielnik mocy, pomiarowa linia szczelinowa typ P14 (produkcji rosyjskiej), badany odcinek falowodu o długości 180 [mm], mikrofalowy miernik mocy Hewlett Packard typu 423 B z głowicą pomiarową na pasmo X (rys.2a).



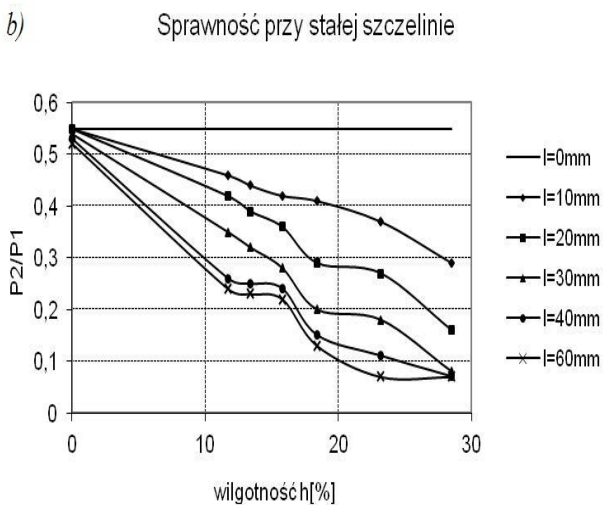
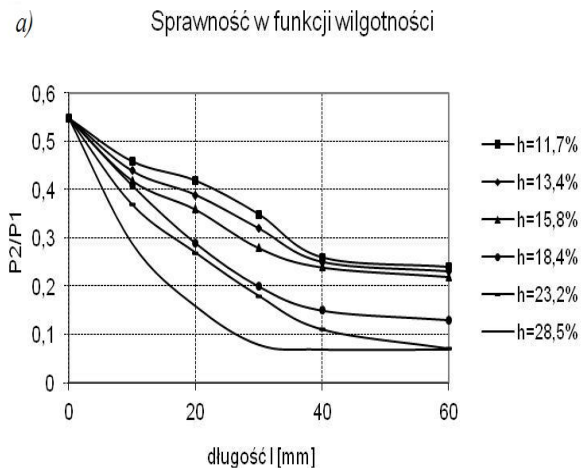
Rys.2. Widok kompletnego stanowiska badawczego (rys. 2a) oraz odcinka falowodu z wykonanym wycięciem (rys. 2b).

W skalibrowanym układzie, jako rodzaj (mod) wiodący wykorzystano TH₁₀ i przeprowadzono komplet typowych badań odcinka falowodu dla pobudzenia harmonicznego.

Następnie obustronnie wycięto otwór w falowodzie usuwając przelotowo fragment obu jego krótszych boków na długości 130 [mm], praktycznie otrzymując w tym fragmencie falowodu przejście z układu falowodowego na linię dwupaskową (rys. 2b). Przestrzeń pomiędzy płaskimi okładkami tej linii dwupaskowej wykorzystano do dalszych badań. Po pobudzeniu tak zmodyfikowanego toru

falowodowego tą samą częstotliwością co poprzednio, stwierdzono, że moc wyjściowa wynosi około 55 % mocy przy nie wyciętym odcinku falowodu. Ten poziom mocy przyjęty jako P_1 stanowi punkt wyjściowy do dalszych rozważań.

W celu określenia optymalnej długości użytkowej wycięcia, za pomocą linii pomiarowej wyznaczono długość fali w tak zmodyfikowanym torze falowodowym. Przy zasilaniu układu pomiarowego z generatora częstotliwością $f_g=9,98$ [GHz] zmierzona częstotliwość fali w zmodyfikowanym falowodzie wynosiła $f_f=7,5$ [GHz], co odpowiada długości fali $\lambda_f=40$ [mm], na którą składają się dwie takie same połówki fali stojące.



Rys. 3. a) Przebieg sprawności (P_2/P_1) w funkcji wykorzystywanej długości wycięcia l dla różnych wilgotności h [%] rozdrobnionej biomasy lignocelulozowej oraz b) przebieg sprawności (P_2/P_1) w funkcji wilgotności h [%] rozdrobnionej biomasy lignocelulozowej dla różnych długości przelotowego otworu wycięcia l [mm].

Przez wycięty przelotowy kanał w ściankach falowodu, poprzecznie do kierunku ruchu fali elektromagnetycznej, umieszczane były rozdrobnione próbki peletu, przy czym długość odcinka który wypełniano materiałem była zmienna ale zawsze stanowiła wielokrotność długości $\lambda_f/4 = 10$ [mm]. Zmianie ulegała wilgotność próbek, przy czym przed umieszczeniem ich pomiędzy płytami dwupaskowej linii pomiarowej sprawdzano ich wilgotność za pomocą wykalibrowanego elektromechanicznego miernika wilgotności rozdrobnionej biomasy lignocelulozowej typu BIO-1 firmy Tanel z Gliwic. Kryterium określania wilgotności

wyrażone zostało przez pomiar poziomu mocy P_2 na wyjściu wyciętego toru falowodowego zawierającego biomasę w stosunku do wcześniej pomierzonego poziomu mocy P_1 na wejściu układu wyciętego toru falowodowego nie zawierającego biomasy.

Czas identyfikacji wilgoci w pelecie był krótki a moc podawana na układ falowodowy wynosiła 1 [mW] i była na tyle mała, aby wyeliminować zjawisko suszenia badanych próbek materiału w czasie trwania pomiarów. Mała moc ograniczyła również zjawiska mogące zagrażać w jakikolwiek sposób zdrowiu badających.

Wnioski

Wyniki identyfikacji laboratoryjnej przedstawione na rysunkach 3, pozwalają na określenie optymalnej długości użytkowego przelotowego wycięcia (szczeliny) oraz wykazują, że stosunkowo duże zmiany spadków mocy w funkcji wilgotności są dogodnie do przybliżonego jej określania. Wskazuje to, że zaproponowana metoda doskonale nadaje się do szybkiej oceny stopnia wilgotności próbek wykonanych z biomasy lignocelulozowej. Ponieważ czas identyfikacji wilgotności jest bardzo krótki, dlatego też można zastosować tą metodę nawet wówczas, gdy biomasa lignocelulozowa będzie się przemieszczała. Metoda pozwala również na to, aby wyniki identyfikacji wilgotności mogły być podawane w czasie rzeczywistym oraz mogły służyć do blokowania dostępu do pieca partii zbyt wilgotnej biomasy lignocelulozowej.

W rezultacie zaproponowano rozwiązanie problemu przybliżonego określania wilgotności biomasy lignocelulozowej za pomocą poruszającej się w przewodnicy falowej fali elektromagnetycznej o częstotliwości mikrofalowej, która przecinana jest poprzecznie rozdrobnionym materiałem pochodzenia roślinnego, o określonej wilgotności. Pomiar odbywa się przez elementy pomiarowe nie dotykające mierzonego materiału, jest to tyle ważne, że materiał pochodzenia roślinnego może wydzielać różne agresywne związki chemiczne powodujące szybką korozję dotykowych metalowych elementów pomiarowych.

LITERATURA

- [1] Domański M., Osipiuk J.; Metrologia techniczna w przemyśle drzewnym, Wydanie 2 poprawione i uzupełnione, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2005, s. 122, ISBN 83-7244-249-5.
- [2] Jasiulewicz M.; Energetyczne wykorzystanie biomasy w działalności gospodarczej, Wydawnictwo Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2009, s. 311, ISBN 978-83-736518-2-1.
- [3] Piątek Z., Jabłoński P.; Podstawy teorii pola elektromagnetycznego, WNT, Warszawa 2010, s. 466, ISBN 978-83-2043-599-3.
- [4] Przetwarzanie biomasy na cele energetyczne, redakcja J. Frączek, Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej (PTIR), Kraków 2010, s. 268, ISBN 978-83-917053-9-1.
- [5] Szóstka J.; Mikrofałe. Układy i systemy, WKŁ, Warszawa 2006, s. 350, ISBN 978 83-2061-607-1.
- [6] Stolarski M.; Wykorzystanie biomasy do produkcji peletu, Czysta Energia, nr 6(56), 2006, s. 28-29, ISSN 1643-126X.
- [7] Tannenberg, K. Tannenberg, G.; Pomiar wilgotności drewna wilgotnościomierzami pojemnościowymi, Pomiary, Automatyka, Kontrola (PAK), nr 2, r. 57, 2011, s. 161-164, ISSN 0032-4110.

Autorzy: dr inż. Aleksander Gąsior, Politechnika Częstochowska, Instytut Elektrotechniki Przemysłowej, Zakład Podstaw Elektrotechniki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: alegg@el.pcz.czyst.pl; dr inż. Zdzisław Posytek, Politechnika Częstochowska, Instytut Telekomunikacji i Kompatybilności Elektromagnetycznej, Zakład Kompatybilności i Teleinformatyki, al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa, E-mail: zdzichu@el.pcz.czyst.pl