

# POMIARY WIELKOŚCI NIEELEKTRYCZNYCH

**Dr inż. Eligiusz PAWŁOWSKI**  
**Politechnika Lubelska**  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki

*Prezentacja do wykładu dla EMST*

Semestr letni

Wykład nr 13



# Prawo autorskie

Niniejsze materiały podlegają ochronie zgodnie z **Ustawą o prawie autorskim i prawach pokrewnych** (Dz.U. 1994 nr 24 poz. 83 z późniejszymi zmianami).

Materiał ten udostępniam **do celów dydaktycznych** jako materiały pomocnicze do wykładu z przedmiotu Pomiar Wielkości Nielektrycznych prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Mogą z nich również korzystać inne osoby zainteresowane tą tematyką. Do tego celu materiały te można **bez ograniczeń przeglądać, drukować i kopiować wyłącznie w całości**.

Wykorzystywanie tych materiałów bez zgody autora w inny sposób i do innych celów niż te, do których zostały udostępnione, **jest zabronione**.

W szczególności **niedopuszczalne jest**: usuwanie nazwiska autora, edytowanie treści, kopiowanie fragmentów i wykorzystywanie w całości lub w części do własnych publikacji.

Eligiusz Pawłowski

## Uwagi dydaktyczne

Niniejsza prezentacja stanowi **tylko i wyłącznie materiały pomocnicze** do wykładu z przedmiotu Pomiary Wielkości Nielektrycznych prowadzonego dla studentów Wydziału Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej. Udostępnienie studentom tej prezentacji nie zwalnia ich z konieczności samodzielnego sporządzania **notatek z wykładów** ani też nie zastępuje studiowania obowiązujących podręczników.

Tym samym zawartość niniejszej prezentacji w szczególności **nie może być** traktowana jako zakres materiału obowiązujący na kolokwium zaliczeniowym.

Obowiązujący jest **zakres materiału wyłożony podczas wykładu** oraz zawarty w odpowiadających mu fragmentach **podręczników** podanych w wykazie literatury do wykładu.

Eligiusz Pawłowski

# Tematyka wykładu

**Miary wilgotności ciał stałych, materiałów sypkich i gleby**

**Metody pomiaru wilgotności ciał stałych, materiałów sypkich i gleby**

**Metody grawimetryczne**

**Metody rezystancyjne**

**Metody dielektryczne**

**Inne metody: chemiczne, radiacyjne, optyczne**

## Wielkości opisujące wilgotność ciał stałych, sypkich i gleby

Sposoby charakteryzowania wilgotności ciał stałych:

- ❑ **zawartość wilgoci (wilgotność bezwzględna)** – iloraz masy wody zawartej w badanym ciele stałym do masy suchego ciała,
- ❑ **wilgotność względna** - iloraz masy wody zawartej w badanym ciele stałym do masy wilgotnego ciała,
- ❑ **objętościowa zawartość wilgoci** - iloraz objętości wody zawartej w badanym ciele stałym do objętości ciała,

## Zawartość wilgoci w ciele stałym

**Zawartość wilgoci  $w$**  (wilgotność bezwzględna) – najczęściej stosowana miara wilgotności ciał stałych, jest to iloraz masy wody  $m_w$  zawartej w badanym ciele stałym do masy suchego ciała  $m_s$ , wyrażona w procentach:

$$w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100\%$$

## Wilgotność względna ciała stałego

**Wilgotność względna  $W$**  – jest to iloraz masy wody  $m_w$ , zawartej w badanym ciele stałym do masy wilgotnego ciała, wyrażona w procentach:

$$W = \frac{m_w}{m_s + m_w} \cdot 100\%$$

## Objętościowa zawartość wilgoci w ciele stałym

**Objętościowa zawartość wilgoci  $W_V$**  – jest to iloraz objętości wody  $V_w$  zawartej w badanym ciele stałym do objętości ciała  $V_s$ , wyrażona w procentach:

$$W_V = \frac{V_w}{V_s} \cdot 100\%$$



## Pomiary wilgotności materiałów stałych, sypkich i gleby

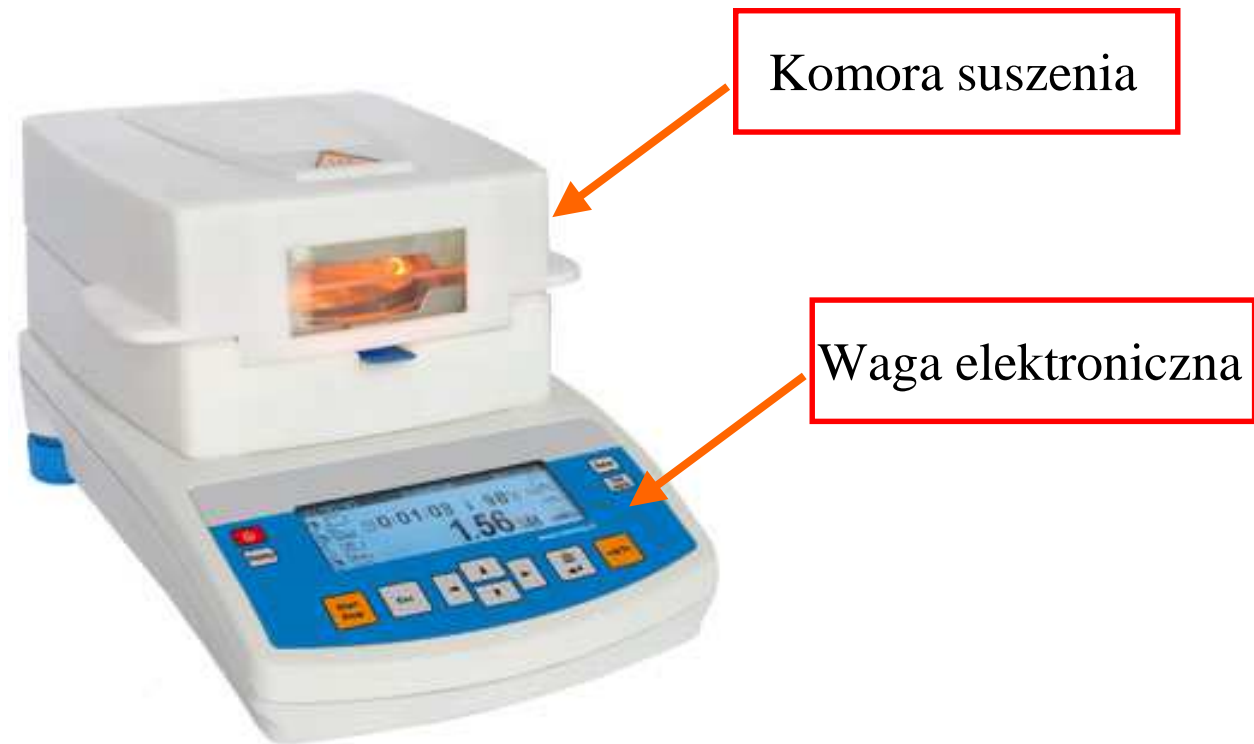
- ❑ metoda grawimetryczna nazywana też szuszkową,
- ❑ metody elektryczne: pomiar wilgotności materiałów w oparciu o ich własności rezystancyjne i dielektryczne,
- ❑ spektrometria mikrofalowa – pomiar absorpcji lub odbicia promieniowania z zakresu mikrofal,
- ❑ spektroskopia podczerwieni – pomiar absorpcji lub odbicia promieniowania z zakresu podczerwieni,
- ❑ metody chemiczne: miareczkowanie metodą K. Fischera, metoda karbidowa, chromatografia gazowa,
- ❑ metody jądrowe: spektroskopia MRJ – pomiar magnetycznego rezonansu jądrowego, metoda spowalniania neutronów ciężkich, metoda osłabiania promieniowania beta lub gamma.

## Metoda grawimetryczna (suszkarkowa)

**Metoda grawimetryczna (suszkarkowa)** - polega na suszeniu materiału i mierzeniu ubytku masy. Jest to najbardziej rozpowszechniona metoda często stosowana jako metoda odniesienia do **kalibracji** i sprawdzania innych metod pomiarowych. Jest to metoda laboratoryjna, wymaga stacjonarnego oprzyrządowania.

Podstawowym przyrządem stosowanym w metodzie grawimetrycznej jest **wagosuszkarka.**

## Wagosuszarka



Obciążenie maksymalne wagosuszarki wynosi 50 g /0,1 mg (60 g /1 mg). Pomiar wilgotności odbywa się z **dokładnością 0,01%** (0,001 % dla próbek do 1,5 g). Maksymalna temperatura suszenia próbki wynosi 160°C (opcją jest wagosuszarka z maksymalną temperaturą suszenia 250°C).

## Wyznaczanie zawartość wilgoci metodą suszarkową

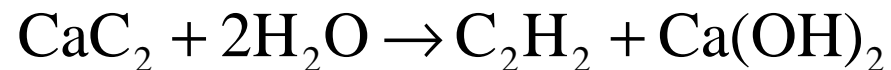
**Zawartość wilgoci  $w$**  metodą suszarkową wyznaczana jest na podstawie masy początkowej naczynka z wilgotną próbką  $m_p$ , masy końcowej naczynka z suchą próbką  $m_k$  i masy pustego naczynka  $m_0$  :

$$w = \frac{m_w}{m_s} \cdot 100\% = \frac{m_p - m_k}{m_k - m_0} \cdot 100\%$$

## Metoda karbidowa

Zasada działania wilgotnościomierza karbidowego wykorzystuje wiedzę o procesie rozpadu węgla wapnia, czyli karbidu, w wodzie. W wyniku tej reakcji powstaje gaz (acetylen), który z kolei powoduje wzrost ciśnienia w pojemniku. Poziom wilgoci odczytuje się bezpośrednio z manometru, który wskazuje wysokość ciśnienia w pojemniku oraz w specjalnych tabelach, które podają **wilgotność względną materiału.**

Metodę karbidową stosuje się w **budownictwie** do pomiaru wilgotności **posadzek betonowych, tynków** itp.



# Zestaw do metody karbidowej



## Metody elektryczne

**Metody elektryczne** pomiaru wilgotności materiałów dają możliwość konstruowania tanich przyrządów przenośnych, dzięki, którym jest możliwy pomiar wilgotności materiałów w naturalnym, pierwotnym miejscu bez potrzeby pobierania próbek i transportu ich do laboratorium. Najbardziej rozpowszechniony jest pomiar wilgotności materiałów w oparciu o ich własności:

- **rezystancyjne** (metoda rezystancyjna),

- **dielektryczne** (metoda dielektryczna, pojemnościowa).

## Metoda rezystancyjna

**Metoda rezystancyjna** - opiera się na pomiarze rezystancji materiału, która uzależniona jest od zawartości wody w materiale. Woda zawarta w materiale w połączeniu z elektrolitami przewodzi prąd elektryczny. W zależności od ilości wody w materiale różna jest rezystancja i na tej podstawie można określać wilgotność materiału. Niestety rezystancja materiału zależy również od składu chemicznego wody jaka znajduje się w materiale, co zawęża zakres pomiarowy od góry oraz wpływa na błędy pomiaru np. w przypadku nadmiernego zasolenia materiału.

Metoda rezystancyjna bardzo dobrze sprawdza się w pomiarze **wilgotności drewna i materiałów drewnopochodnych.**



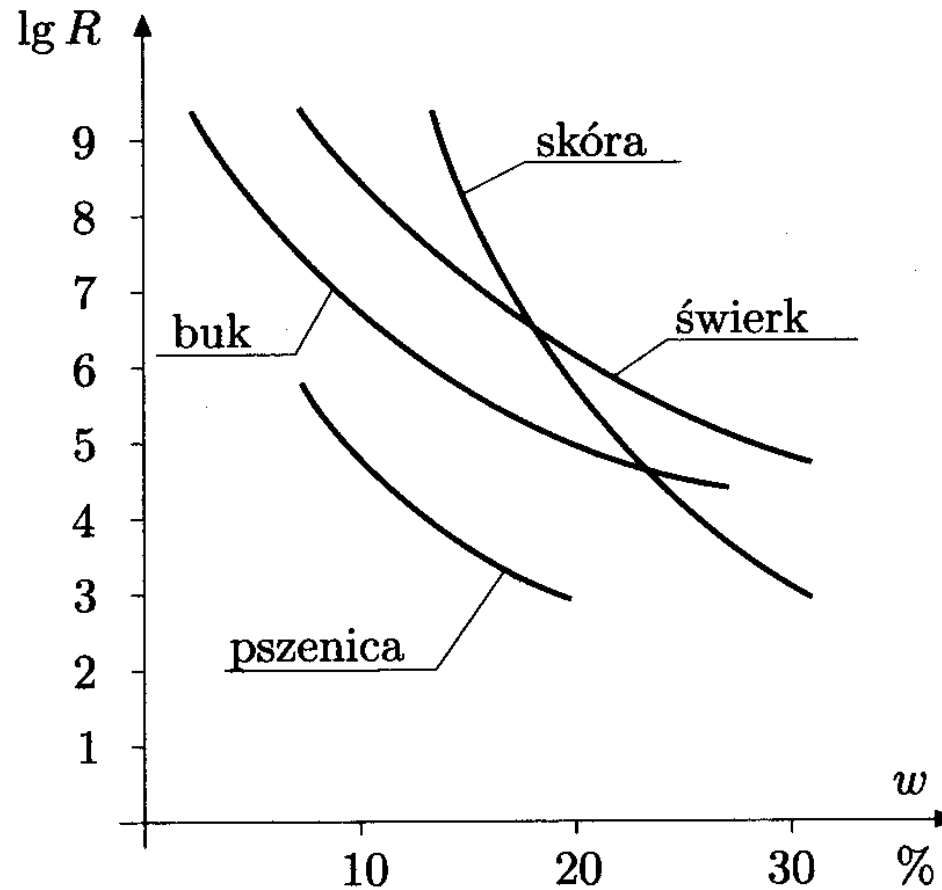
## Pomiary wilgotności drewna

W dość szerokim zakresie pomiarowym **wilgotność drewna** zależy prawie **liniowo od logarytmu z rezystancji.**

Trudnością elektroniczną jest w tym przypadku pomiar bardzo dużych rezystancji np. aby osiągnąć zakres 5% wilgotności potrzeba mierzenia rezystancji na poziomie **100 GΩ**.

Dla innych materiałów metoda rezystancyjna dobrze nadaje się do stwierdzania stanu suchości – nawet materiał, który zawiera w sobie wodę silnie przewodzącą staje się izolatorem po wysuszeniu.

## Higrometr rezystancyjny do drewna



Przykładowe charakterystyki rezystancji próbek w funkcji zawartości wilgoci dla różnych materiałów

# Higrometr rezystancyjny do drewna

**Zasada pomiaru** rezystancyjny pomiar wilgotności materiałów za pomocą zintegrowanych, wymiennych końcówek, zgodnie z normą DIN EN 13183-2: 2002

**Krzywe charakterystyczne** 4 różne grupy drewna (A, B, C, D)

1 uniwersalna grupa materiałów budowlanych (E, tabele)

1 grupa materiałów budowlanych (P)=tynk

**Zakres pomiaru** 0.0 – 100 % zawartości wilgoci w drewnie, zależnie do grupy

0.0 – 4.4 % zawartości wilgoci w tynku

Grupa A 0,0 – 82 %

Grupa B 1,1 – 94 %

Grupa C 2,2 – 100 %

Grupa D 3,2 – 100 %

**Rozdzielczość** 0.0... 19.9 %: 0,1 % zawartości wilgoci

20... 100%: 1 % zawartości wilgoci



## Metoda dielektryczna

**Metoda dielektryczna** – polega na pomiarze przenikalności dielektrycznej  $\epsilon_r$  materiału, która zależy od zawartości wody w materiale. Dipolowa budowa cząsteczek wody powoduje, że jej przenikalność dielektryczna ma znacznie większą wartość niż pozostałych składników materiału: w temperaturze pokojowej **przenikalność dielektryczna wody  $\epsilon_r$  wynosi około 81**, a np. dla drewna 2...7.

Mierząc przenikalność  $\epsilon_r$  materiału w sposób pośredni możemy ocenić ilość wody w materiale.

## Przenikalność dielektryczna niektórych materiałów

### *Przenikalności elektryczne względne części stosowanych materiałów*

Materiał	$\epsilon_r$	Materiał	$\epsilon_r$
Asfalt	2,7	Marmur	8,3
Bakelit	4,5 ÷ 5,5	Olej	2,2 ÷ 4,7
Drewno	2,5 ÷ 7,7	Papier	2 ÷ 2,6
Ebonit	2,8	Parafina	2,1 ÷ 2,5
Fibra	2,5 ÷ 5	Powietrze	1,0005
Guma	2 ÷ 3,5	Szkło	5,4 ÷ 9,9
Łupek	6,6 ÷ 7,4	Woda	81

Przenikalność dielektryczna  $\epsilon_r$  mieszaniny o objętościowym stężeniu  $p_1$  składnika o przenikalności  $\epsilon_1$  i składnika o przenikalności  $\epsilon_2$  :

$$\epsilon_r = \epsilon_2 \left( 1 + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{a\epsilon_1 + b\epsilon_2} p_1 \right)$$

## Metody pomiaru stałej dielektrycznej

Podstawowe metody pomiaru stałej dielektrycznej:

- w dziedzinie częstotliwości, metoda **FD** (*Frequency Domain*), polegające na pomiarze napięciem przemiennym pojemności odpowiednio skonstruowanego kondensatora,

- w dziedzinie czasu, metoda **TDR** (*Time Domain Reflectometry*), polegające na pomiarze rozchodzenia się impulsu elektromagnetycznego w badanym ośrodku.

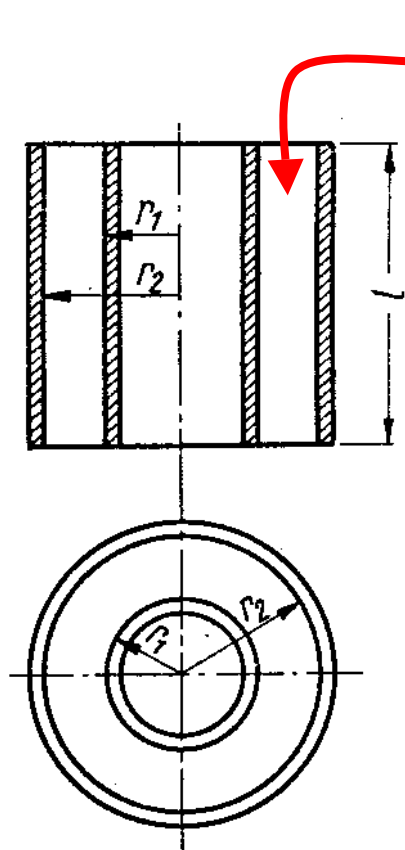
## Pomiar stałej dielektrycznej w dziedzinie częstotliwości

Podstawowe metody pomiaru stałej dielektrycznej:

- **w dziedzinie częstotliwości, metoda FD** (*Frequency Domain*)

W metodach FD przewodzące elektrody umieszczone w materiale traktuje się 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.

# Zasada działania czujnika pojemnościowego



Przestrzeń pomiarowa

Jednolite wypełnienie

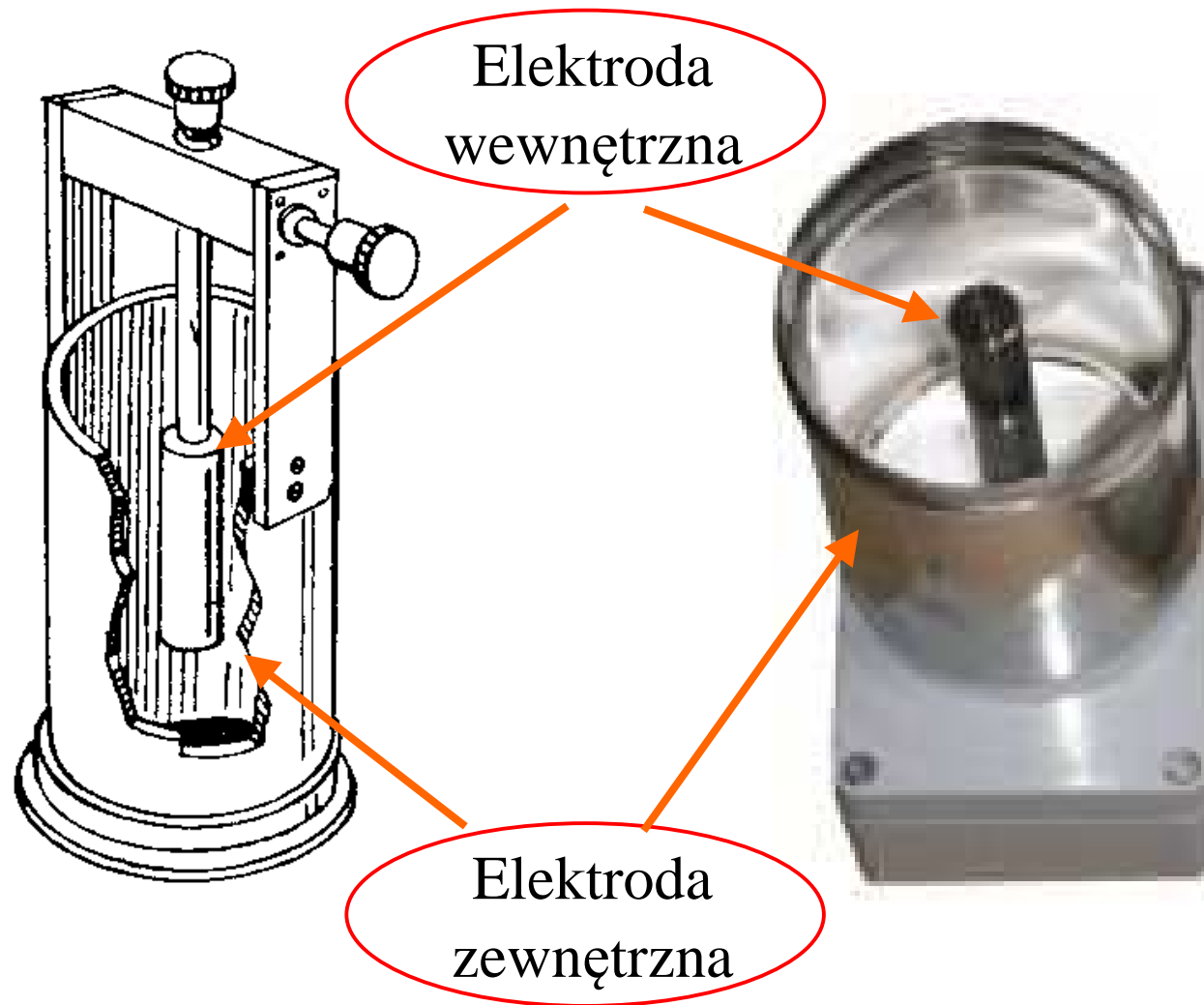
$$C = \frac{2 \pi \epsilon_0 \epsilon_r l}{\lg \frac{r_2}{r_1}}$$

Kondensator cylindryczny

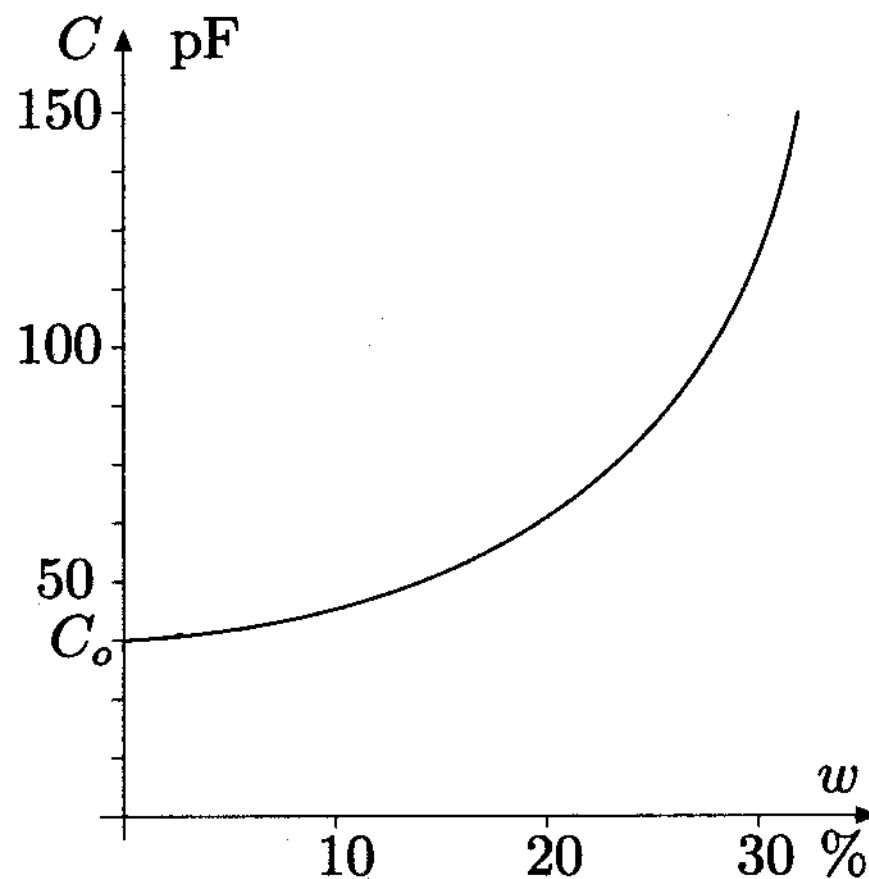
$$\epsilon_r = \epsilon_2 \left( 1 + \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{a\epsilon_1 + b\epsilon_2} p_1 \right)$$



## Pojemnościowy czujnik wilgotności materiałów sypkich



## Pojemnościowy pomiar wilgotności ciał stałych



Przykładowa charakterystyka zmian pojemności ciała stałego w funkcji zawartości wilgoci

## Pomiar stałej dielektrycznej w dziedzinie czasu

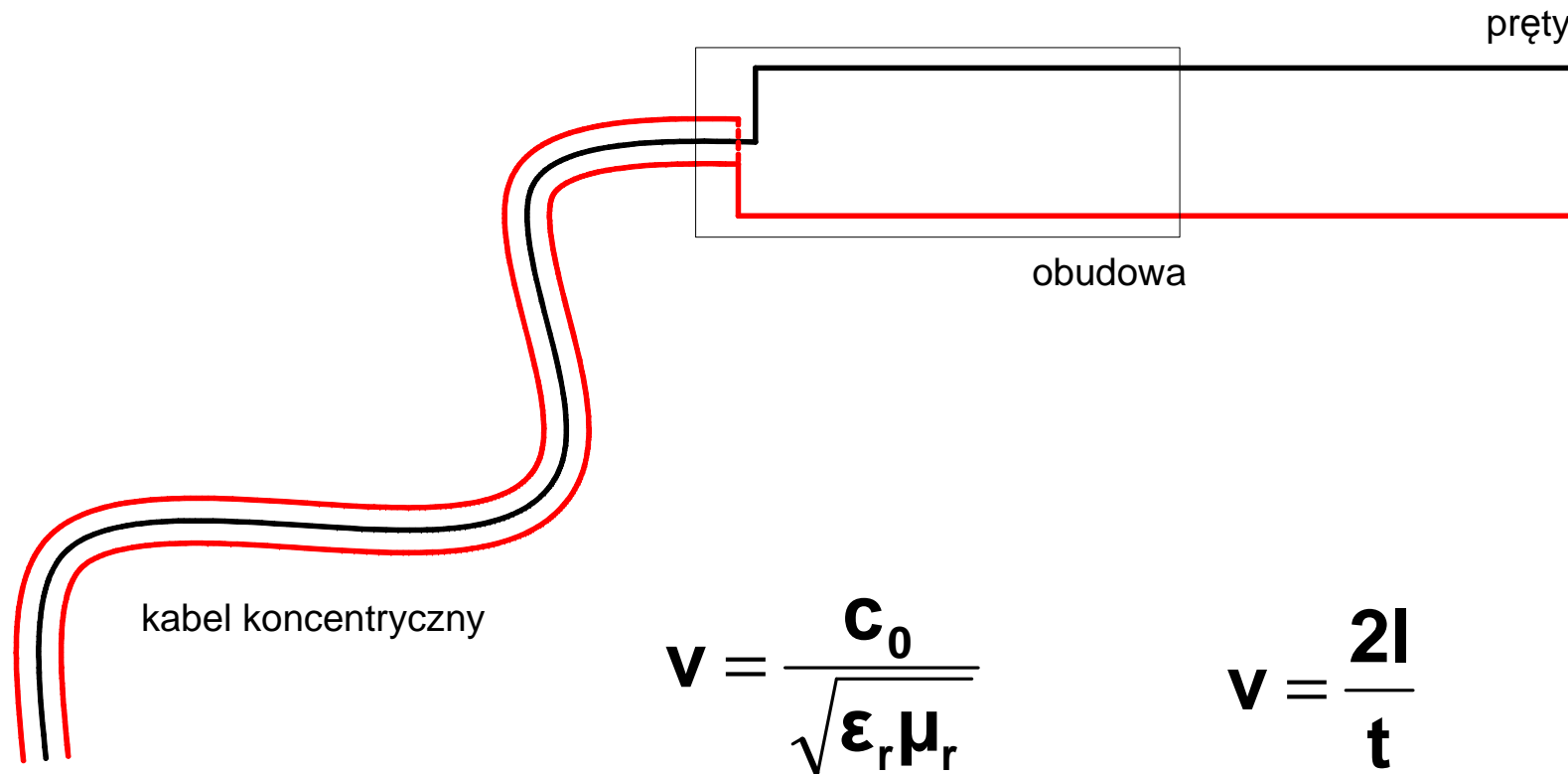
Podstawowe metody pomiaru stałej dielektrycznej:

- **w dziedzinie czasu, metoda TDR** (*Time Domain Reflectometry*)

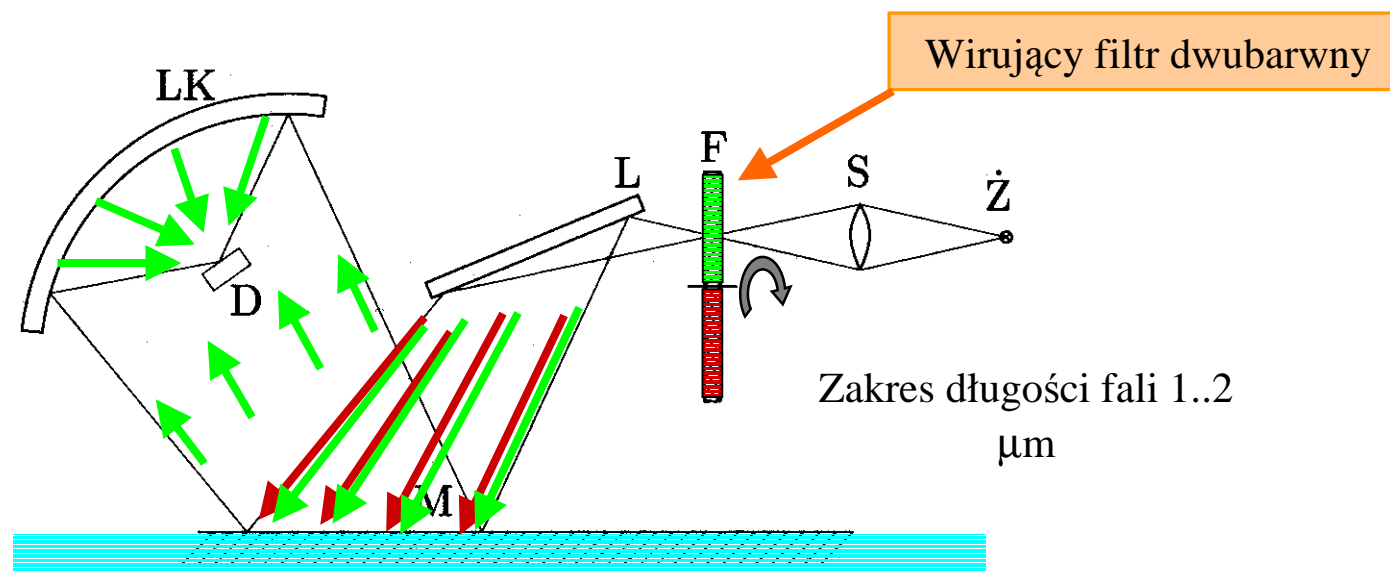
W metodzie TDR przenikalność dielektryczna gleby wyliczana jest na podstawie pomiaru prędkości propagacji impulsu elektromagnetycznego wzdłuż falowodu utworzonego z elektrod przewodzących prąd elektryczny, tworzących sondę pomiarową umieszczoną w badanym materiale. Przenikalność dielektryczna warunkuje prędkość propagacji w takim falowodzie. Na podstawie pomiaru prędkości propagacji impulsu elektromagnetycznego można ocenić wilgotność materiału.

Metoda powszechnie stosowana w pomiarach **wilgotności gleby**.

# Pomiar wilgotności gleby metodą TDR



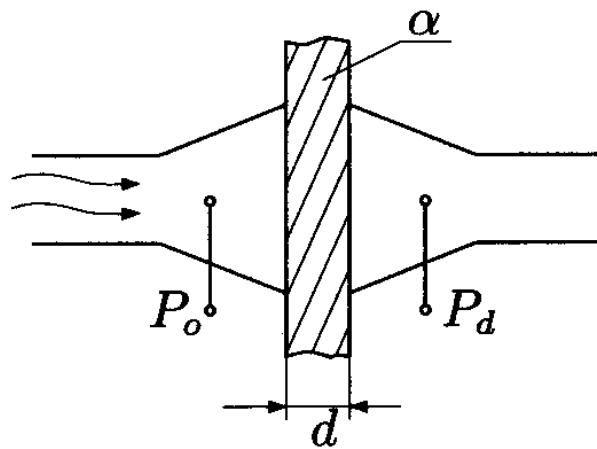
## Zasada działania higrometru spektrometrycznego



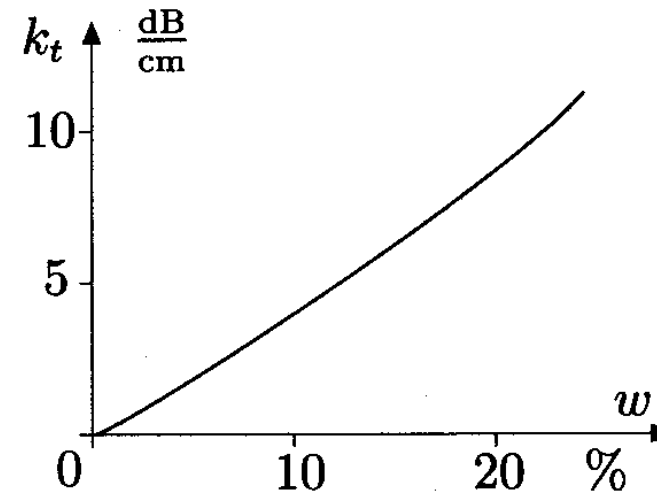
Ilustracja działania higrometru spektrometrycznego do pomiaru zawartości wilgoci

Woda zawarta w materiale silnie tłumí promieniowanie podczerwone

# Zasada działania higrometru mikrofalowego



Higrometr mikrofalowy – ilustracja zasady działania



Higrometr mikrofalowy – zależność tłumienia od zawartości wilgoci

Pochłanianie wilgoci z powietrza przez niektóre ciała stałe

**Sorpcja** – pochłanianie jednej substancji – *sorbatu*, przez inną substancję – *sorbent*.

Wiele substancji pochłania wilgoć z otaczającego powietrza.

W stanie ustalonym **adsorpcja** (pochłanianie) wilgoci z powietrza oraz **desorpcja** (wydalanie) wilgoci do otaczającego powietrza zachodzą w sposób ciągły równoważąc się wzajemnie.

W stanie ustalonym istnieje związek pomiędzy ilością pochłoniętej przez substancję wilgoci a wilgotnością otaczającego powietrza.

Znając tę zależność **można wyznaczyć wilgotność substancji na podstawie wilgotności otaczającego powietrza.**

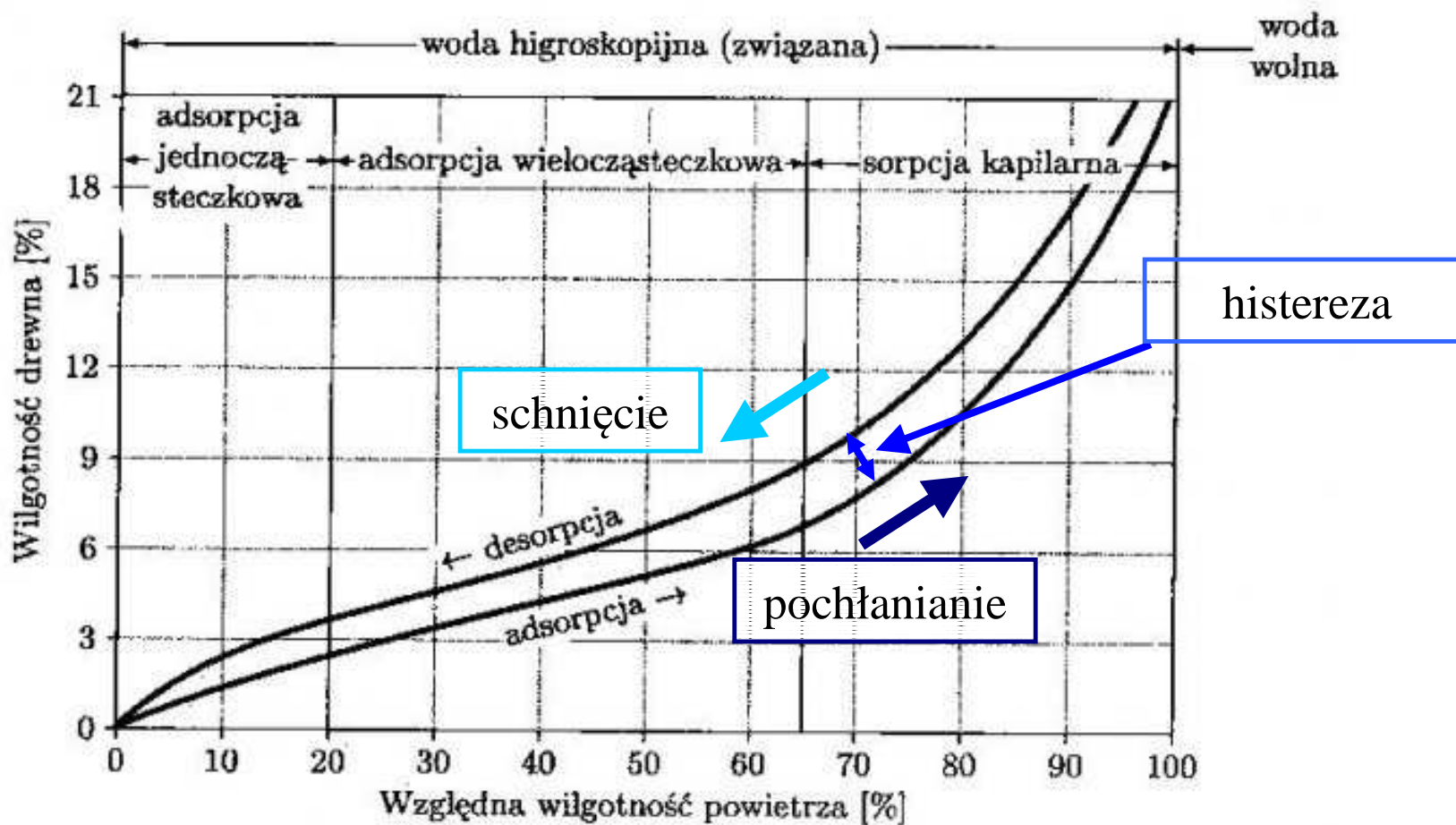
## Izoterma sorpcji wody

**Izoterma sorpcji wody** opisuje zależność w stanie równowagi pomiędzy zawartością wody w materiale a wilgotnością względną otaczającego powietrza, dla ustalonej temperatury.

W stanie ustalonym adsorpcja (pochłanianie) i desorpcja (wydalanie) zachodzą w sposób ciągły równoważąc się wzajemnie, ale w stanie przejściowym, gdy wilgotność względna otaczającego powietrza zmienia się, występuje **histereza**.



## Przykładowa izotermy sorpcji wody z histerezą

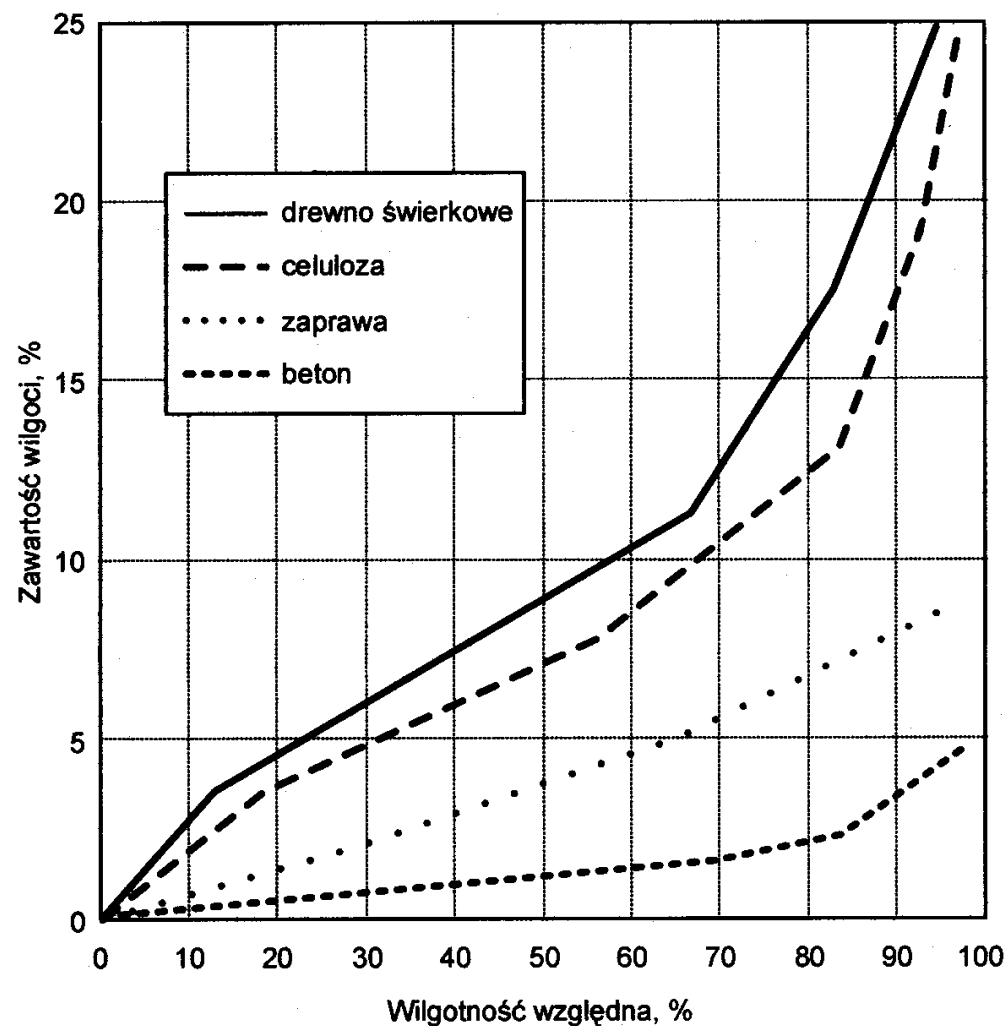


## Zastosowanie izotermy sorpcji wody

Zastosowania znajomości izotermy sorpcji wody:

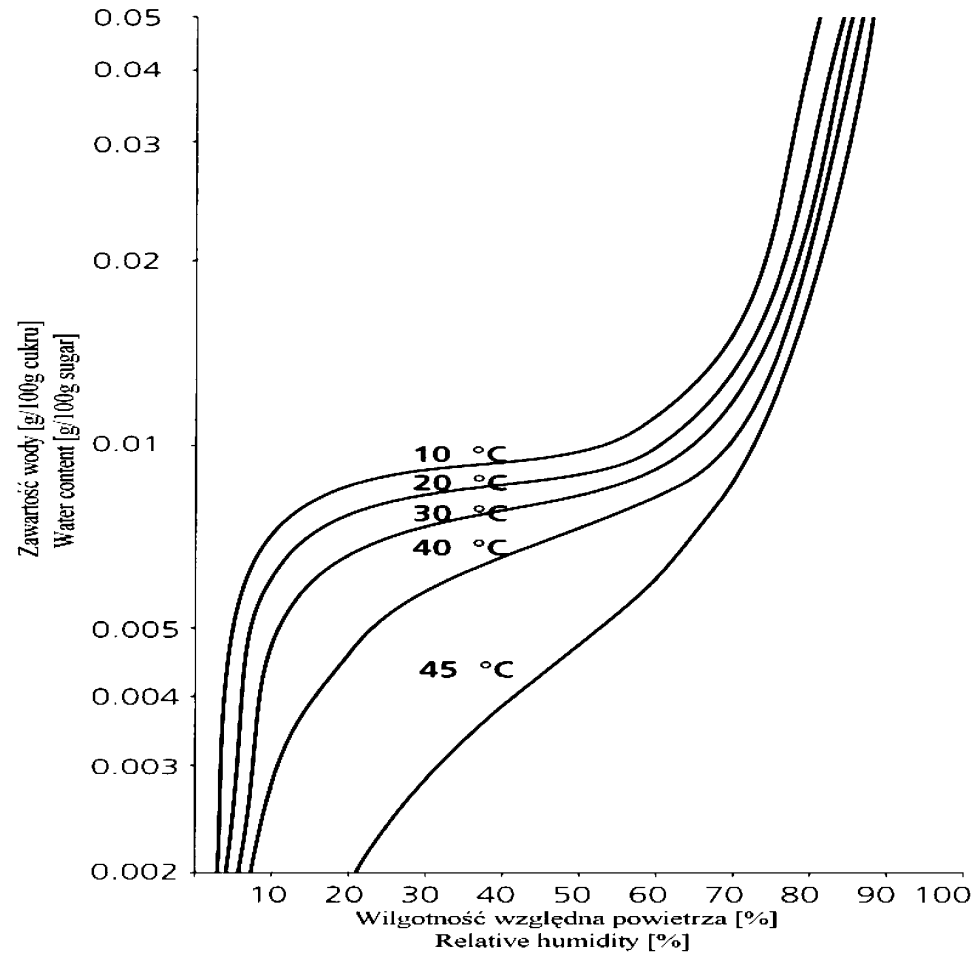
- pomiary wilgotności **materiałów budowlanych**: betonów, tynków, zapraw murarskich na podstawie pomiaru wilgotności powietrza w pomieszczeniach,
- pomiary wilgotności **produktów spożywczych**: cukru, ziarna zbóż, tytoniu na podstawie pomiaru wilgotności powietrza w magazynie,
- pomiary wilgotności **drewna** podczas procesu suszenia na podstawie pomiaru wilgotności powietrza w suszarni.

# Izotermy sorpcji niektórych materiałów budowlanych



Izotermy sorpcji dla niektórych materiałów budowlanych

# Izotermy sorpcji produktów spożywczych - cukru białego



Izotermy sorpcji cukru białego w różnych wartościach temperatury

## Posumowanie

- Stosowane są różne miary wilgotności ciał stałych: wilgotność bezwzględna, wilgotność względna oraz objętościowa zawartość wilgoci,
- Wilgotność ciał stałych wyznacza się metodami bezpośrednimi i pośrednimi,
- Podstawową i najdokładniejszą metodą bezpośrednią jest metoda grawimetryczna (suszarkowa),
- Wśród metod pośrednich można wyróżnić metody elektryczne (rezystancyjne i pojemnościowe) oraz nieelektryczne,
- Do metod pośrednich zalicza się również metoda wykorzystująca znajomość izotermy sorpcji wody przez niektóre substancje.

