



PACKALL

PackAlliance:
European alliance for innovation training
& collaboration towards future packaging

Linking **Academy** to **Industry**.

Program szkolenia: moduły

- Moduł 1. Nowe materiały i biomateriały.
- **Moduł 2. Ekoprojektowanie i innowacyjne procesy produkcyjne.**
- Moduł 3. Zaangażowanie obywateli i konsumentów.
- Moduł 4. Zarządzanie i waloryzacja odpadów.



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

This project has been funded with support from the European Commission.

This publication [communication] reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.



Kurs 1 - Nowatorskie przetwarzanie produkcyjne systemów pakowania

5. Wymagania technologiczne nowych zrównoważonych rozwiązań opakowaniowych (0.3 ECTS)

5.1. Analiza trendów technologicznych dla opakowań do żywności w najbliższej przyszłości

5.2. Wymagania technologiczne nowych zrównoważonych rozwiązań opakowaniowych

Właściwości mechaniczne i barierowe

Zależności między obciążeniami przyłożonymi do materiału a odkształceniami wywołanymi przez zastosowanie tych obciążeń określają mechaniczne zachowanie materiału.

Aby opisać zachowanie ciała stałego po przyłożeniu siły, wygodnie jest sklasyfikować rodzaj i kierunek danej siły:

Siły statyczne: stosowane stale lub w określonych okresach;

Siły dynamiczne (lub uderzenie): te, które są wyczerpywane w krótkim czasie w wyniku uderzenia lub wibracji, w celu sprawdzenia zdolności materiału do pochłaniania energii uderzenia;

Siły cykliczne: te, w których wartości obciążenia różnią się od wartości minimalnej do maksymalnej dla dużej liczby razy.

Właściwości mechaniczne



- Wytrzymałość na rozciąganie (elastyczność i plastyczność)
- Zachowanie kompresji
- Wytrzymałość i odporność
- Twardość
- Odporność na uderzenia
- Właściwości tarcia



Próby rozciągania są najczęściej stosowanymi testami do określania właściwości mechanicznych, takich jak:

- Moduł Younga
- Stosunek Poissona
- Granica sprężystości
- Wydłużenie procentowe po zerwaniu
- Wytrzymałość.

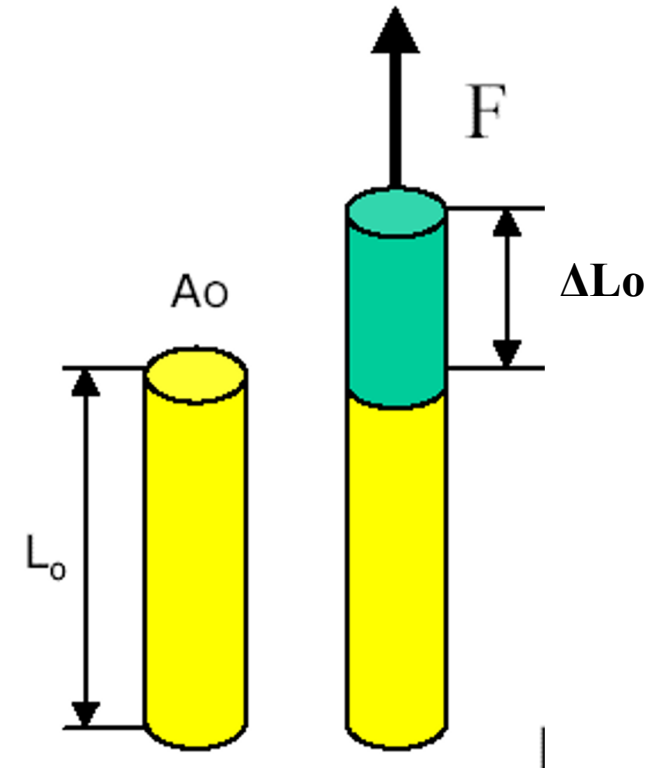
Kontrolowane odkształcenie jest nakładane na próbkę, a reakcja próbki jest mierzona pod względem wytrzymałości.

**Naprężenie
nominalne**

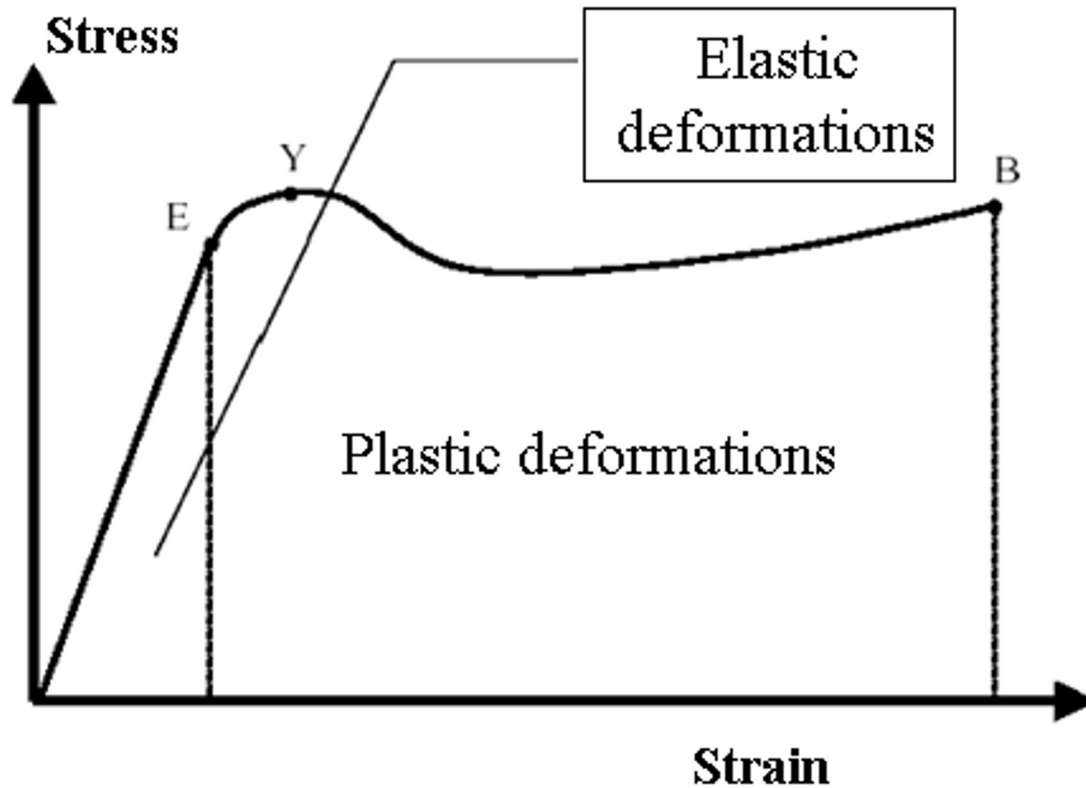
$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

**Odkształcenie
nominalne**

$$\varepsilon = \frac{\Delta L_0}{L_0}$$



Krzywa naprężenie-odkształcenie



E = Granica elastyczności;

Y = Limit wydajności;

B = limit przełamania

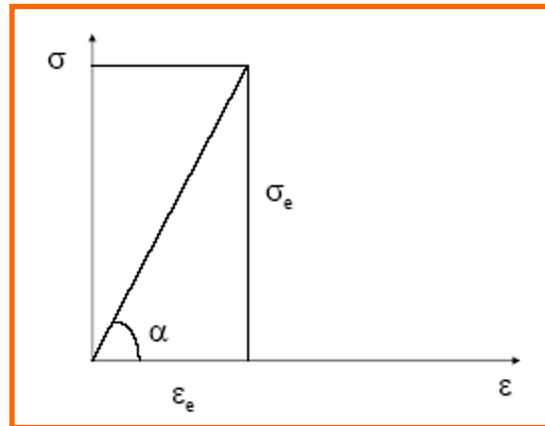
Odkształcenie sprężyste: Po usunięciu naprężenia materiał powraca do kształtu, jaki miał przed przyłożeniem obciążenia. Odkształcenie jest odwracalne, nietrwałe.

Odkształcenie plastyczne. Po usunięciu naprężenia materiał nie powraca do poprzedniego kształtu, ale następuje trwałe, nieodwracalne odkształcenie.

W początkowej części krzywej naprężenie-odkształcenie (obszar sprężysty) występuje proporcjonalność między σ i ε (Prawo Hooke'a, Moduł Younga, E).

$$\sigma = E\varepsilon$$

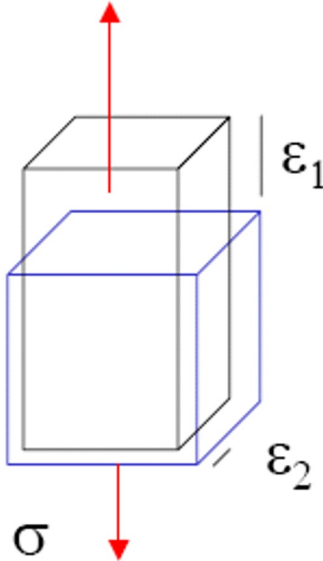
Moduł Younga E zależy od zdolności wiązań atomowych do deformacji □ Im wyższa siła wiązania, tym większa sztywność materiału.



$$E = \frac{\sigma_e}{\varepsilon_e} = \frac{A \sin(\alpha)}{A \cos(\alpha)} = \operatorname{tg}(\alpha)$$

Stosunek Poissona

W obszarze sprężystym, przy zastosowaniu napięcia jednoosiowego, występuje poprzeczny skurcz proporcjonalny do przyłożonego odkształcenia wzdłużnego. To poprzeczne odkształcenie można zmierzyć przez zmianę średnicy próbki. Stała proporcjonalności między odkształceniami jest współczynnikiem Poissona (wartością dodatnią), który można ocenić mierząc naprężenia poprzeczne. Jeśli zachowanie jest izotropowe, stosunek Poissona jest zdefiniowany:



$$\nu = -\frac{\epsilon_{transverse}}{\epsilon_{longitudinal}} = -\frac{\epsilon_2}{\epsilon_1}$$

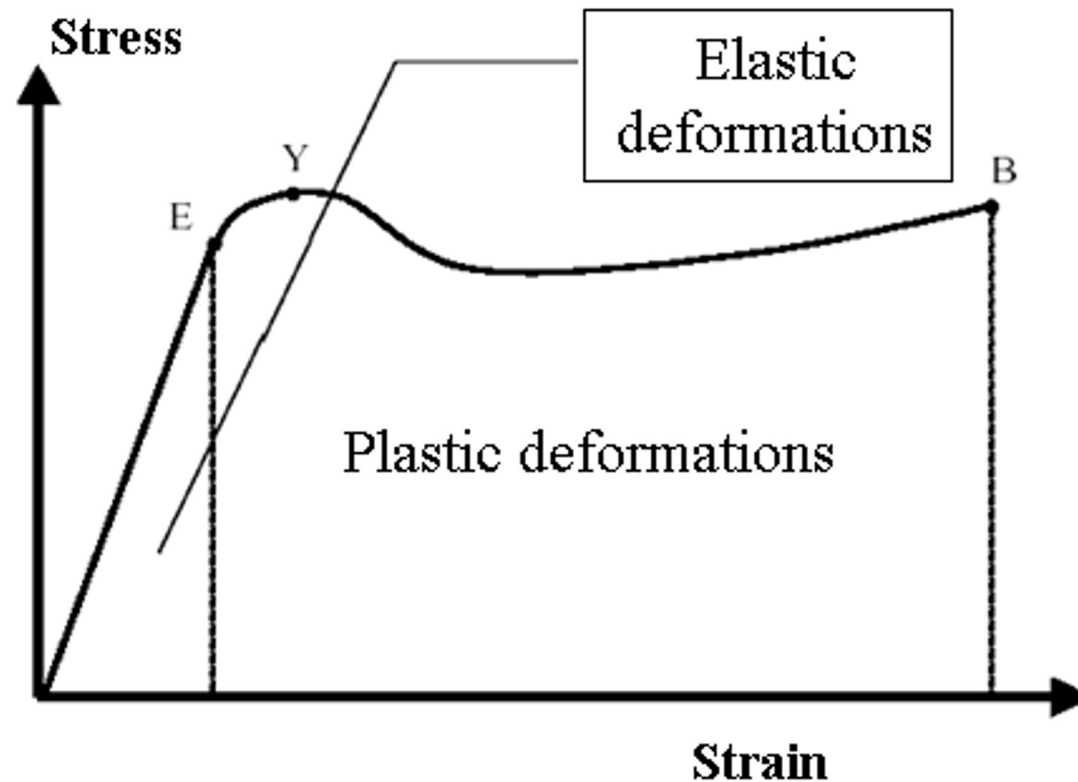
- Idealny materiał powinien mieć $\nu=0.5$ (Odpowiada zerowej zmianie objętości)
- W najczęściej używanych materiałach $0.25 < \nu < 0.4$ (zwiększenie objętości)

Granica sprężystości (Yield)

Granica plastyczności oddziela obszar zachowania sprężystego od obszaru zachowania plastycznego.

Czasami ta wartość nie jest łatwo wykrywalna.

Pozorna granica sprężystości jest określona na 0,2% trwałego odkształcenia



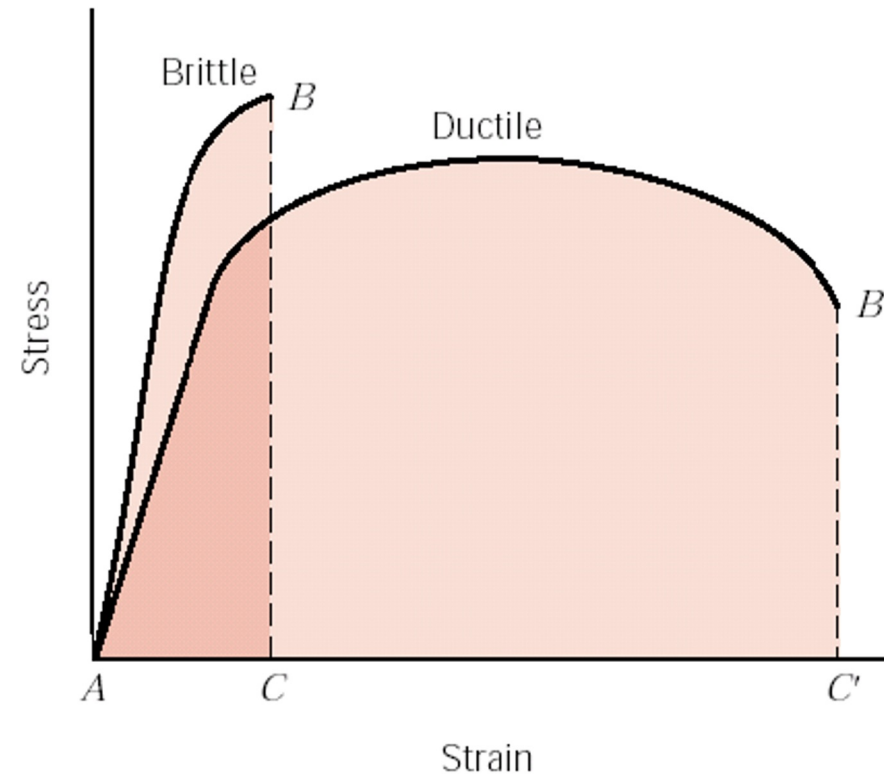
Po osiągnięciu granicy odkształcenia sprężystego istnieją dwa możliwe zachowania materiału:

- próbka pęka □ **KRUCHY MATERIAŁ**
- próbka nadal się odkształca, a odkształcenie pozostaje nawet po anulowaniu przyłożonej siły □ **MATERIAŁ PLASTYCZNY**

Kruchość i ciągliwość zależą od temperatury.

Miarą ciągliwości materiału jest procentowe wydłużenie przy zerwaniu:

$$\text{Elongation at break} = \frac{L - L_0}{L_0} * 100$$

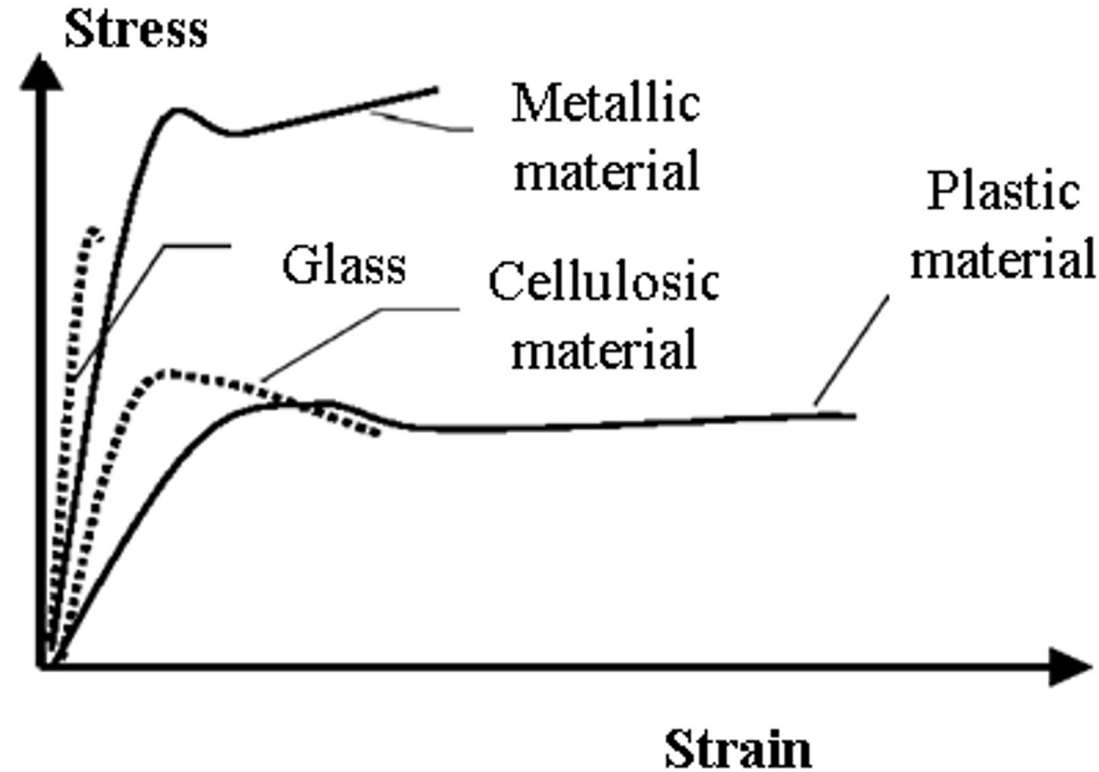


Wytrzymałość



Jest to energia wymagana do pęknięcia materiału pod obciążeniem statycznym. **Jest on reprezentowany przez obszar pod krzywą rzeczywistą σ - ϵ próby rozciągania.**

Krzywe naprężenia-odkształcenia dla różnych materiałów



Właściwości mechaniczne niektórych materiałów opakowaniowych



MATERIAŁ	Moduł Younga (Mpa)	Napężenie (%)	Napięcie (Mpa)
Poliester	4000-5000	50-120	170-270
Polipropylen	2000-3500	600-800	35-50
Glin	70000	-	70-210
Blacha ocynowana	1800000	-	33-740
Szkło	70000	-	70

Interakcja opakowanie/żywność jest wynikiem przeniesienia substancji między pojemnikiem, żywnością i środowiskiem zewnętrznym, zdolnym do modyfikowania właściwości żywności i/lub opakowania.

W zależności od rodzaju cząsteczki zaangażowanej w transfer materii i sposobu ujawniania się tej interakcji, mówimy o:

- **przenikaniu gazu**
- **absorpcji cząsteczek organicznych**
- **migracji**

Interakcja opakowanie/żywność jest wynikiem przeniesienia substancji między pojemnikiem, żywnością i środowiskiem zewnętrznym, zdolnym do modyfikowania właściwości żywności i/lub opakowania.

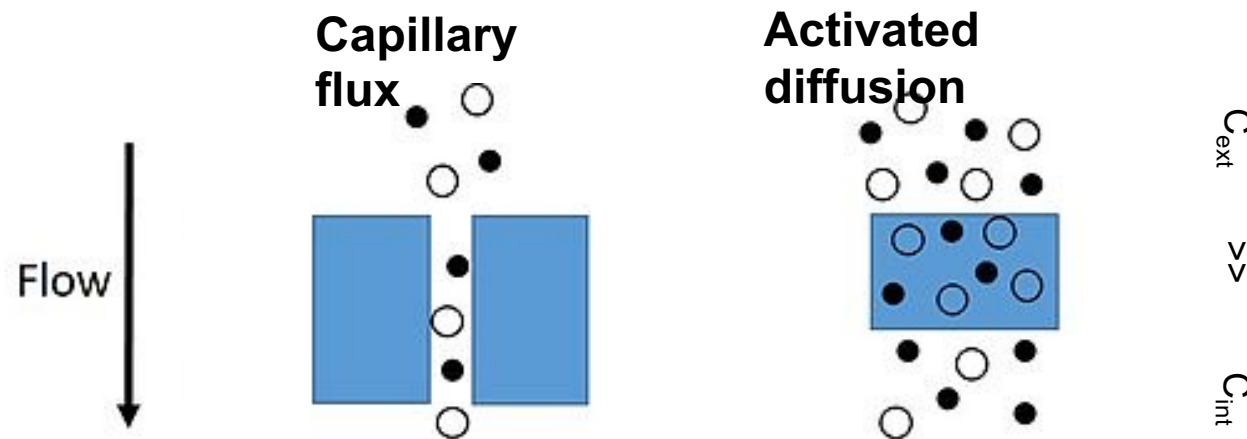
W zależności od rodzaju cząsteczki zaangażowanej w transfer materii i sposobu ujawniania się tej interakcji, mówimy o:

- **przenikaniu gazu**
- **absorpcji cząsteczek organicznych**
- **migracji**

W przeciwieństwie do materiałów opakowaniowych wykonanych ze szkła lub metali, opakowania wykonane z polimerów są przepuszczalne dla małych cząsteczek, takich jak gazy, para wodna, pary organiczne i inne związki o niskiej masie cząsteczkowej.

Istnieją 2 procesy, w których gazy i pary mogą przechodzić przez materiały polimerowe:

- Gazy i pary przepływają przez mikroskopijne pory, otwory i pęknięcia w materiale (**Strumień kapilarny**)
- Gazy i pary rozpuszczają się w polimerze na jednej powierzchni, dyfundują przez nieczynny polimerowy między i/lub wewnątrz cząsteczki dzięki gradientowi stężenia i odparowują na drugiej powierzchni polimeru. Ten proces "dyfuzji roztworu" (znany również jako "**Dyfuzja aktywowana**") jest opisana jako rzeczywista przepuszczalność.



Source: https://en.wikipedia.org/wiki/Membrane_gas_separation

Pęknięcia i/lub pęknięcia mikro- i makroskopowe: wady te są przypadkowe, a zatem nieprzewidywalne, są konsekwencją naprężeń mechanicznych (ścieranie) i uszkodzeń fizycznych (pęknięcia);

Mikro lub makroskopowe pory i naczynia włosowate: różnią się wielkością i są wynikiem przebicia lub nierównomiernego rozmieszczenia składników materiału (wypełniaczy, pigmentów lub innych składników) lub wad spoin;

Wakaty między- i/lub wewnątrzcząsteczkowe: Reprezentują one przestrzenie między cząsteczkami lub w obrębie tej samej cząsteczki, które umożliwiają przepływ gazów. Ich wymiary są małe i zmienne w wyniku ruchów termicznych, ponieważ podlegają ruchom molekularnym. Zależą one od charakteru i morfologii polimeru.

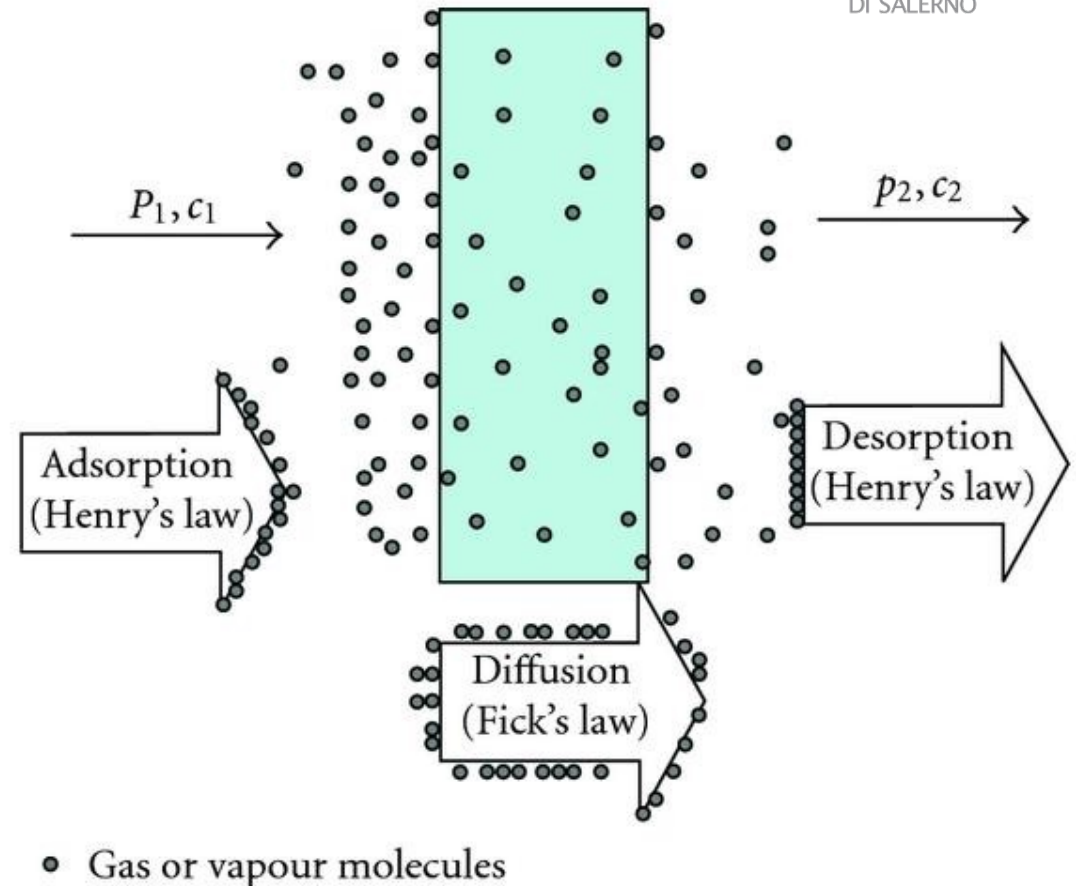
Przepuszczalność definiuje się jako kwantyfikację transmisji filtratu, gazu lub pary, przez materiał odporny.

Pojęcie przepuszczalności jest zwykle związane z ilościową oceną **właściwości barierowych** materiału. Materiał o dobrych właściwościach barierowych ma niską przepuszczalność, natomiast materiały o niskich właściwościach barierowych mają wysoką przepuszczalność.

Analiza i ocena przepuszczalności opakowań mają fundamentalne znaczenie dla **jakości pakowanej żywności**, ponieważ wymiana O₂, CO₂ i H₂O(g) między wnętrzem i zewnątrz pudełka może spowodować zmiany w żywności.

Transport cząsteczki gazu przez jednorodną, nieporowatą membranę polimerową można opisać jako następujący proces:

- (i) **ADSORPCJA:** kondensacja i rozpuszczanie penetrantu na jednej powierzchni membrany (*sprzyja spadkom temperatury i wzrostom ciśnienia*)
- (ii) **DYFUZJA:** w postaci cieczy, przez nią pod wpływem gradientu stężenia (*któremu sprzyja wzrost temperatury*)
- (iii) **DESORPCJA:** parowanie na drugiej powierzchni do stanu gazowego.



Source: Siracusa (2012). *International Journal of Polymer Science*.

Rozważmy membranę polimerową o grubości l , powierzchni A poddaną płynowi, a Q całkowitą ilość penetrantu, który przeszedł przez tę membranę w czasie t

STRUMIEŃ DYFUZYJNY:

$$J = Q/At$$

J = ilość penetrantu, który przechodzi przez membranę polimerową w ciągu jednej jednostki czasu i jednostki powierzchni.

Dyfuzyjny przepływ materii można opisać ilościowo za pomocą
DWÓCH PRAW FICKA

PIERWSZE PRAWO FICKA: służy do obliczania przepływu permeant w STANIE USTALONYM, tj. pod warunkiem, że profil stężenia nie zmienia się w czasie, a strumień jest stały.

$$J = -D \frac{dc}{dx}$$

DRUGIE PRAWO FICKA: pozwala ocenić zmianę stężenia permeant wewnątrz opakowania ze zmienną prędkością, czyli w STANIE PRZEJŚCIOWYM (profil stężenia zmienia się w czasie), a więc w tzw. czasie opóźnienia (Lag Time).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$$

D = Współczynnik dyfuzji
kwadrat długości na
jednostkę czasu (cm^2s^{-1});

C = stężenie permeant
masy lub objętości permeant
na jednostkę objętości
materiału (mol cm^{-3});

X = długość w kierunku
przepływu (cm).

t = czas (s)

DYFUZJA SZYBSZA dla...

- struktura amorficzna
- niższe topnienie materiałów T
- wyższa ruchliwość molekularna
- obecność wiązania wtórnego
- materiały o niższej gęstości
- mniejsze atomy dyfuzyjne
- większe powiązanie z permeant

DYFUZJA WOLNIEJSZA dla...

- struktury krystaliczne
- materiały T o wyższym topnieniu
- niższa ruchliwość molekularna
- obecność wiązania kowalencyjnego
- materiały o większej gęstości
- większe atomy dyfuzyjne
- mniejsze powiązanie z permeant

Termin sorpcja jest zwykle używany do opisanie początkowej penetracji i rozpraszania permeant cząsteczek w matrycy polimerowej i obejmuje zarówno absorpcję, jak i adsorpcję, a także pułapkowanie w mikropustkach lub grupowanie agregatów.

W danej temperaturze lokalne stężenie **C** gazu rozpuszczonego w polimerze można powiązać z ciśnieniem **P** następującą zależnością:

$$C = S(C)p$$

- **stężenie C** wyraża się w $\text{cm}^3 \text{ (STP)/cm}^3$ polimeru. W sposób bardziej wyraźny jest to stężenie gazu sorbowanego (obliczone w standardowych warunkach temperatury i ciśnienia, tj. 273°K i 1atm) przez polimer, który jest poddawany ciśnieniu p penetranta;
- **współczynnik rozpuszczalności S** jest podawany w $\text{cm}^3\text{(STP)/cm}^3\cdot\text{MPa}$

S(C) jest **WSPÓŁCZYNNIKIEM ROZPUSZCZALNOŚCI** i jest miarą powiązania do penetracji polimeru

Prawo Henry'ego $\rightarrow C = S \cdot P$

Możliwość zastosowania przy niskich ciśnieniach i idealnym gazie

Całkując pierwsze prawo Ficka dotyczące grubości i stężenia i zakładając, że prawo Henry'ego ma zastosowanie, możliwe jest zdefiniowanie ilości gazu (**Q**) przez materiał:

$$Q = \frac{A \cdot t \cdot D \cdot S \cdot (p_1 - p_2)}{l}$$

Produkt **D·S** jest określany jako "**współczynnik przepuszczalności**" i jest reprezentowany przez symbol **Pe**:

$$P_e = D \cdot S$$

$$P_e = \frac{l \cdot Q}{A \cdot t \cdot (p_1 - p_2)}$$

P_e to "ilość permeant przechodząca przez powierzchnię o powierzchni jednostki powierzchni i grubości w jednostce czasu i z powodu jednostkowej różnicy ciśnień cząstkowych"

Pe jest powszechnie wyrażany jako **cm³ μm m⁻² 24h⁻¹ bar⁻¹**

Z wyrażenia P_e , oczywiste jest, że transmisja gazu jest odwrotnie proporcjonalna do grubości materiału. Odwrotna proporcjonalność nie zawsze jest przestrzegana: czasami, w rzeczywistości, biorąc pod uwagę stałą przepuszczalności przez różne grubości tego samego materiału, nie uzyskujemy tej samej wartości.

PRZENIKALNOŚĆ (lub przepuszczalność):

ilość gazu, który przechodzi przez jednostkę powierzchni, o danej grubości, w jednostce czasu w ramach częściowej jednostki jednostkowej ΔP

$$P = \frac{P_e}{l}$$

Jest oznaczona literą **P** i wyrażona jako $\text{cm}^3\text{m}^{-2}24\text{h}^{-1}\text{bar}^{-1}$

Z wyrażenia P_e , oczywiste jest również, że transmisja gazu jest wprost proporcjonalna do różnicy ciśnień. Jednak bezpośrednia proporcjonalność z ΔP nie zawsze jest uznawana. Z tego powodu, ΔP jest zwykle uznawana za warunek miary i określa się inną ilość:

SZYBKOŚĆ TRANSMISJI GAZU:

ilość gazu przechodzącego przez jednostkę powierzchni o danej grubości i przy danej różnicy ciśnień parcyjnych w jednostce czasu

$$GTR = P(p_1 - p_2) = \frac{P_e}{l} (p_1 - p_2)$$

Jest mierzona w $\text{cm}^3\text{m}^{-2}24\text{h}^{-1}$ i jest oznaczony jako **GTR**. To, w zależności od przenikającego gatunku, może przybierać różne formy: O_2TR , N_2TR , CO_2TR , WVTR .

Właściwości bariery



(UNI 10534 12/94)

BARRIERA	P/WVTR
Bardzo wysoka	< 0.5
Wysoka	0.5 - 3.0
Średnia	3.1 - 30
Niska	31 - 150
Bardzo niska	> 150

$\text{cm}^3\text{m}^{-2}24\text{h}^{-1}\text{bar}^{-1}\text{d}$ at 23°C i 0% UR (gazy)

$\text{g m}^{-2}24\text{h}^{-1}\text{bar}^{-1}\text{d}$ at 38°C i 90% UR (para wodna)

Materiał polimerowy	Przepuszczalność tlenu w folii 25 μm grubości (cm^3/m^2 24h bar)
Polietylen o niskiej gęstości(LDPE)	7000-8000
Polietylen o wysokiej gęstości (HDPE)	2800-3000
Polipropylen (PP)	2300-3700
Plastyfikowany poli(chlorek kwasu vynilu) (PVC)	6000-9000
Polistyren (PS)	3800-5400
Poli(tereftalan etylenu) (PET)	45-90
Poliamid 6 (PA6)	20-40
Poliamid 11 (PA11)	500-1500
Polichlorek winylidenu (PVDC)	12-100
Poli(alkohol etylenowo-winyłowy) (EVOH)	1-



PACKALL

PackAlliance:
European alliance for innovation training
& collaboration towards future packaging

Linking **Academy** to **Industry**.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI SALERNO



Copyright: CC BY-NC-SA 4.0: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

With this license, you are free to share the copy and redistribute the material in any medium or format. You can also adapt remix, transform and build upon the material.

However only under the following terms:

Attribution — you must give appropriate credit, provide a link to the license, and indicate if changes were made. You may do so in any reasonable manner, but not in any way that suggests the licensor endorses you or your use.

NonCommercial — you may not use the material for commercial purposes.

ShareAlike — if you remix, transform, or build upon the material, you must distribute your contributions under the same license as the original.

No additional restrictions — you may not apply legal terms or technological measures that legally restrict others from doing anything the license permits.



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

This project has been funded with support from the European Commission.

This publication [communication] reflects the views only of the author, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

