



PACKALL

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

Korkeakoulut ja yritykset yhdessä.

Koulutuksen moduulit:

- Uudet materiaalit ja biomateriaalit
- **Ekologinen suunnittelu ja uudet valmistusprosessit**
 - Jätteen hallinta ja kierrätys
- Kansalaisten ja kuluttajien osallistaminen



Yhteisrahoitettu
Euroopan unionin
Erasmus+ -ohjelmasta

Hanke on rahoitettu Euroopan komission tuella.
Tästä julkaisusta [tiedotteesta] vastaa ainoastaan sen laatija, eikä komissio ole vastuussa siihen sisältyvien tietojen mahdollisesta käytöstä.



Kurssi 1 – Pakkausten uudenlaiset tuotantoprosessit

5. Uusien kestävien pakkausratkaisujen tekniset vaatimukset (0.3 ECTS)

5.1. Uusien pakkaustrendien analyysit elintarvikepakkaamisessa lähitulevaisuudessa

5.2. Uusien kestävien pakkausratkaisujen tekniset vaatimukset

Mekaaniset ominaisuudet ja barrier-ominaisuudet



Mekaaniset ominaisuudet

Materiaalille kohdistetun voiman ja siitä johtuvien pysyvien muodonmuutosten välinen suhde sovelluksessa määrittää materiaalin mekaanisen käyttäytymisen.



Mekaaniset ominaisuudet

Jotta kiinteään aineen käyttäytymistä voiman kohdistamisen jälkeen voidaan kuvailla, on määriteltävä kyseisen voiman suunta ja suuruus:

Staattiset voimat: kohdistuvat jatkuvasti tai ajoittain.

Dynaamiset voimat (tai iskut): altistuksena lyhytkestoinen isku tai värähtely, määrittelee materiaalin ominaisuuden ottaa vastaan iskuja.

Sykliset voimat: kuormitus vaihtelee minimi- ja maksimiarvon välillä useita kertoja.



Mekaaniset ominaisuudet

- Vetolujuus (elastisuus ja plastisuus)
- Puristuslujuus
- Sitkeys ja kimmoisuus
- Kovuus
- Iskulujuus
- Kitkaominaisuudet



Vetolujuusominaisuudet

Vetolujuustestit ovat yleisimmin käytettyjä testejä, kun määritetään mekaanisia ominaisuuksia, kuten

- Youngin moduuli eli kimmomoduuli
- Poissonin suhde
- myötölujuus
- murtovenymä
- sitkeys.



Vetolujuus

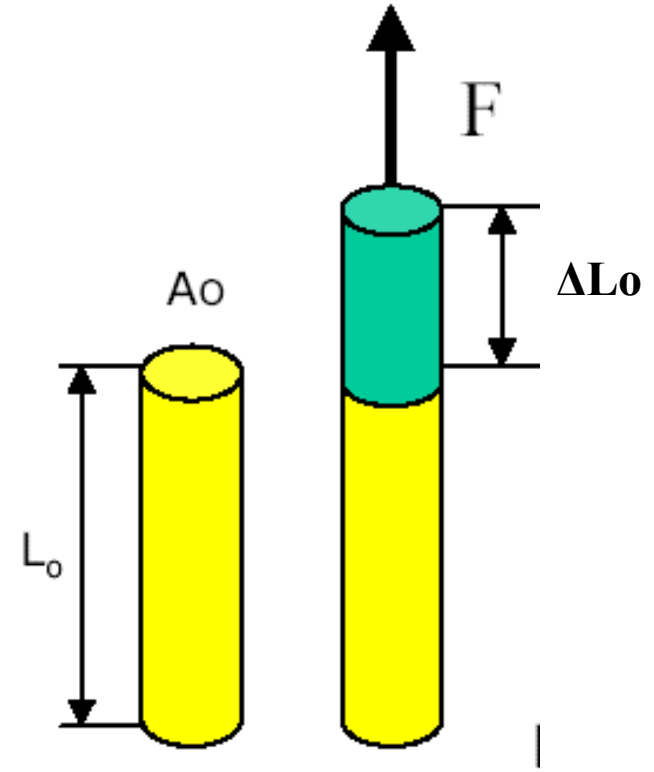
Näyte altistetaan kontrolloidulle deformaatiolle eli muodonmuutokselle ja tulos mitataan lujuuden yksikössä.

Nimellinen kuorma

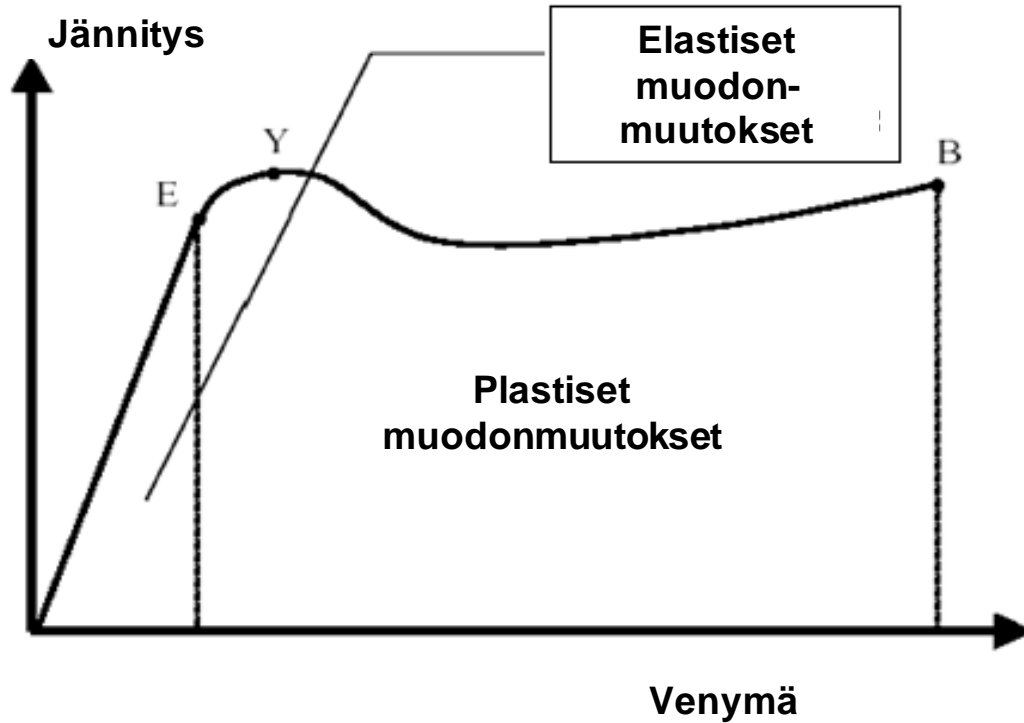
$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

Nimellinen deformaatio

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



Jännitys-venymäkäyrä



E = venymäraja;

Y = myötöraja;

B = murtoraja

Elastinen muodonmuutos: Kun kuormitus poistetaan, materiaali palaa alkuperäiseen mittaan ennen voimalle altistusta. Muodonmuutos on käänteinen, ei pysyvä.

Plastinen muodonmuutos: Kun kuormitus poistetaan, materiaali ei palaudu alkuperäisiin mittoihin vaan tapahtuu pysyvä, peruuttamaton muodonmuutos.

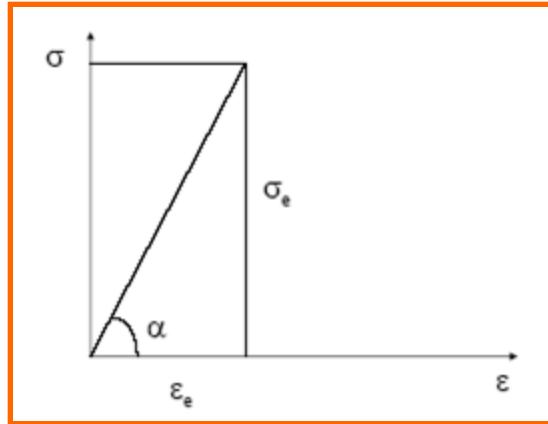


Elastinen käyttäytyminen

Jännitys-venymäkäyrän alussa (elastisen muodonmuutoksen alue) on suhde voiman ja venymään välillä (Hooken laki, Youngin moduuli, E).

$$\sigma = E \varepsilon$$

Youngin moduuli E riippuu atomien välisten sidosten kyvystä muuntautua. Mitä korkeampi sidoslujuus, sitä suurempi on materiaalin **jäykkyys**.



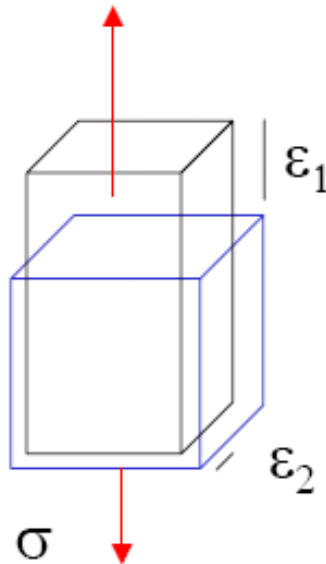
$$E = \frac{\sigma_e}{\varepsilon_e} = \frac{A \sin(\alpha)}{A \cos(\alpha)} = \operatorname{tg}(\alpha)$$

Poissonin kerroin

Kun elastisella alueella lisätään jännitystä yhden akselin suuntaan, esiintyy poikittainen veto, joka on verrannollinen pitkittäiseen kappaleeseen kohdistuneeseen venymään. Tämä poikittainen muodonmuutos eli deformaatio voidaan mitata koekappaleiden halkaisijan muutoksesta.

Muodonmuutosten välinen suoraan verrannollinen kerroin on Poissonin kerroin (positiivinen arvo), joka voidaan määrittää mittaamalla poikittaisvenymä.

Jos käyttäytyminen on isotrooppista, Poissonin kerroin voidaan määrittää



$$\nu = -\frac{\varepsilon_{\text{transverse}}}{\varepsilon_{\text{longitudinal}}} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$$

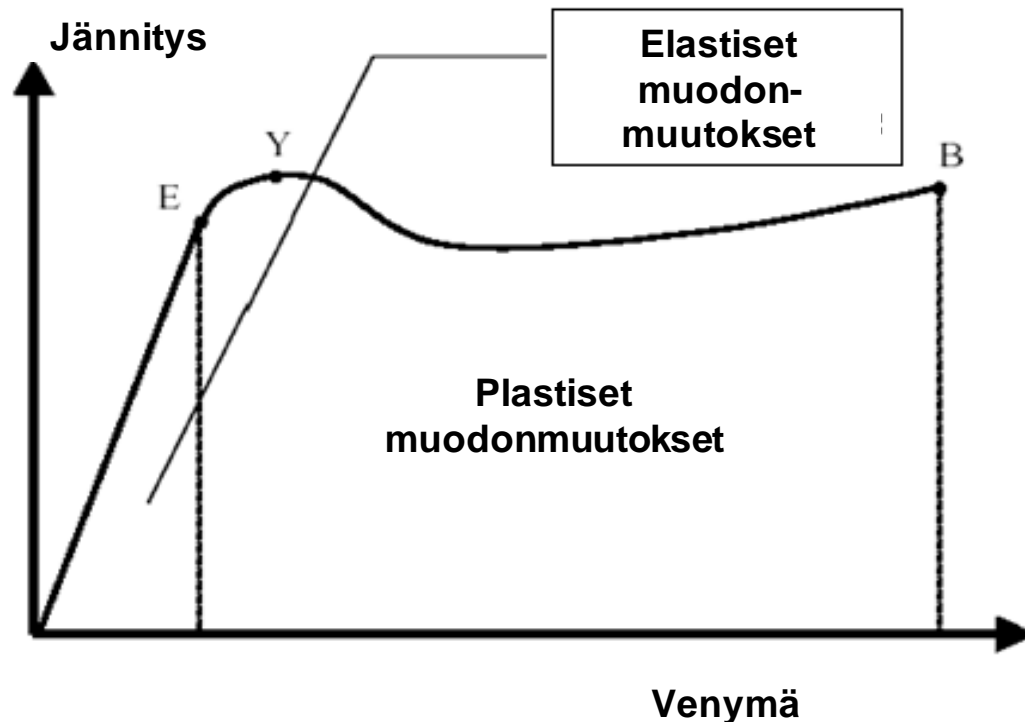
- Ideaalimateriaalille $\nu = 0,5$ (tilavuuden muutosta nollaan).
- Yleisimmin käytetyille materiaaleille kerroin on $0,25 < \nu < 0,4$ (tilavuuden kasvu).

Myötölujuus

Myötölujuus **erottaa** alueen **elastisen käyttäytymisen** **plastisen käyttäytymisen** alueesta.

Aina arvoa ei ole helppo määrittää.

Elastisuuden näennäinen raja määritetään 0,2 % pysyvästä muodonmuutoksesta.



Sitkeys ja hauraus

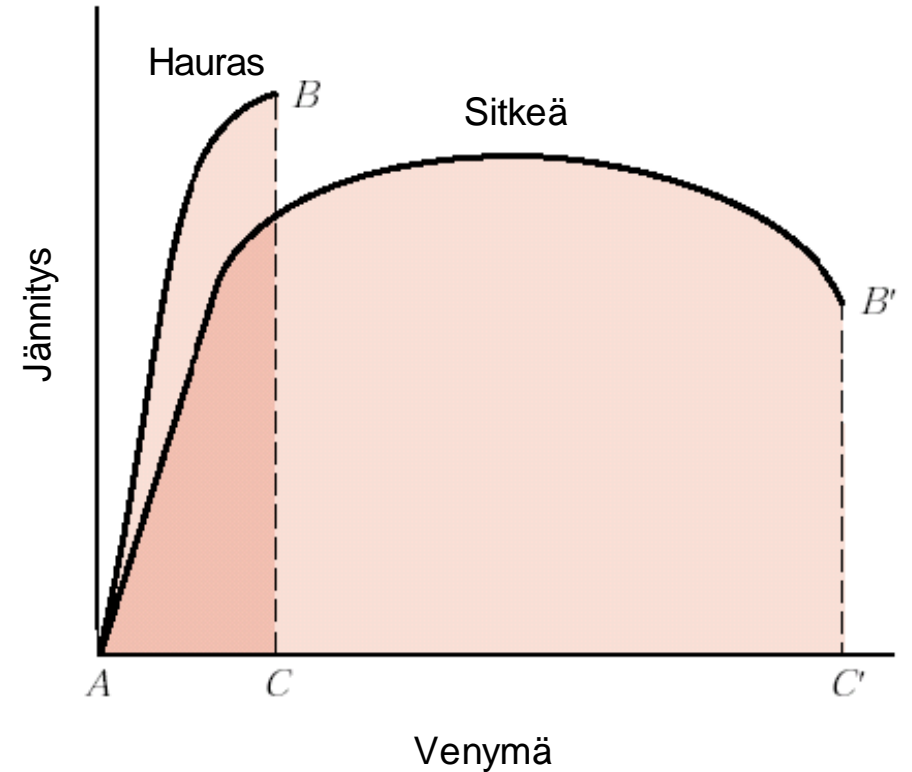
Materiaalin elastinen muodonmuutos voi ilmetä kahdella tavalla:

- Näyte **hajoaa**. □ **HAURAS MATERIAALI**
- Näyte **jatkaa muodonmuutosta**, ja muodonmuutos säilyy, vaikka siihen kohdistuva voima loppuu. □ **SITKEÄ MATERIAALI**

Hauraus ja sitkeys riippuvat lämpötilasta.

Sitkeyden mitta on materiaalin prosenttiosuus **murtovenymästä**:

$$\text{Murtovenymä} = \frac{L - L_0}{L_0} * 100$$

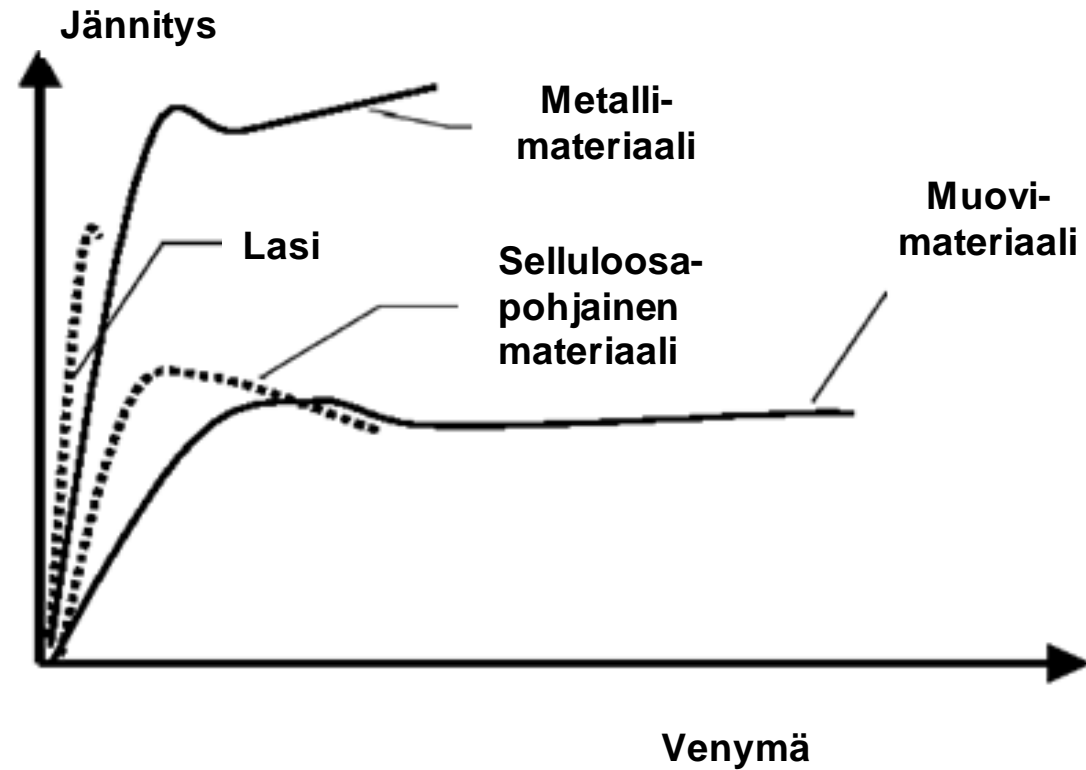


Lujuus

Energia, joka vaaditaan murtamaan materiaali staattisen kuorman alla. Voidaan esittää **lujuustestin σ - ϵ käyrän alapuolisena alueena.**



Jännitys-venymäkäyrä eri materiaaleille



Joidenkin pakkausmateriaalien mekaanisia ominaisuuksia

MATERIAALI	Youngin moduuli (MPa)	Murtovenymä (%)	Murtojännitys (MPa)
Polyesteri	4000–5000	50–120	170–270
Polypropeeni	2000–3500	600–800	35–50
Alumiini	70000	-	70–210
Tina	1800000	-	33–740
Lasi	70000	-	70



Pakkauksen ja ruuan välinen vuorovaikutus

Pakkauksen ja ruuan välinen yhteisvaikutus on lopputulos vuorovaikutuksesta astian, ruuan ja ulkopuolisen ympäristön välillä ja se pystyy muokkaamaan ruuan ja pakkauksen ominaisuuksia.

Riippuen molekyylien tyypistä ja siitä, kuinka siirtyminen ja kosketus tapahtuu, voidaan puhua

- **kaasun läpäisystä**
- **orgaanisten molekyylien läpäisystä**
- **migraatiosta.**



Läpäisevyys

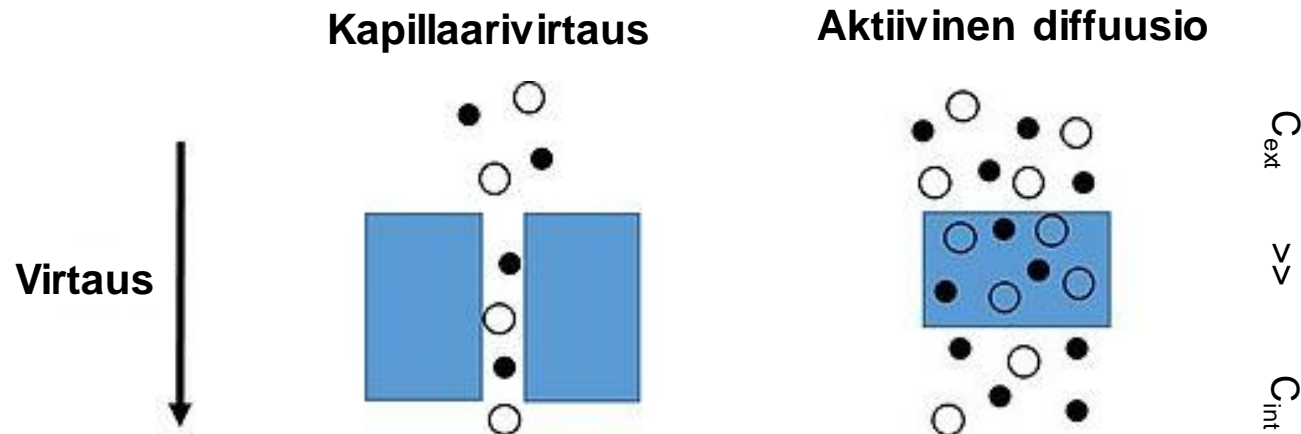
Verrattuna pakkausmateriaaleihin, jotka on valmistettu lasista tai metallista, **muovista** valmistetut pakkaukset **läpäisevät pieniä molekyylejä**, kuten vesihöyryä, haihtuvia orgaanisia aineita ja muita alhaisen molekyylipainon komponentteja.



Läpäisevyys

Kaasut ja höyryt voivat läpäistä polymeerimateriaalin kahdella tavalla:

- Kaasut ja höyryt virtaavat mikroskooppisten huokosten, mikroriekien tai halkeamien kautta materiaaliin (kapillaarinen virtaus).
- Kaasut ja höyryt liukenevat polymeeriin toiselta pinnalta, diffusoivat polymeerin läpi sisäisten tai pintojen välisten molekyyli-pintojen välistä tiivistyneinä ainesosina ja haihtuvat polymeerin toiselta pinnalta. Tämä "liukenemisdifфуusion prosessi" (tunnetaan myös nimellä "**aktiivinen diffуusion**") määritetään **todellisena läpäisevyytenä**.



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



Läpäisevyys

Murtumat ja/tai mikro- ja makromurtumat: Nämä virheet ovat satunnaisia ja siten ennalta-arvaamattomia. Ne johtavat mekaanisiin jännityksiin (hiertymät) ja fysikaalisiin virheisiin (halkeamat).

Mikro- ja makrohuokokset ja kanavat: Niiden koko vaihtelee, ja tuloksena voi olla repeämä tai komponenttien epätasainen materiaalijakauma (täyteaineet, pigmentit ja muut lisäaineet) tai virheet kappaleessa.

Sisäiset ja/tai väliset molekyylikäytävät: Edustavat alueita molekyylien välillä tai saman molekyylin sisällä, jotka mahdollistavat kaasujen läpäisyn. Niiden mitat ovat pieniä ja vaihtelevia lämpöliikkeen takia (ovat alttiina molekyylien liikkeelle). Ne riippuvat polymeerin luonteesta ja morfologiasta.



Läpäisevyys

Läpäisevyys määritellään *kaasun tai höyryn määränä, joka läpäisee sitä vastustavan materiaalin.*

Läpäisevyyden määritelmä yhdistetään yleensä materiaalin läpäisevyyden määrälliseen arviointiin (**barrier-ominaisuudet**). Materiaalilla, jolla on hyvät barrier-ominaisuudet, on alhainen läpäisevyys, kun taas alhaisen barrierin materiaalilla on korkea läpäisevyys.

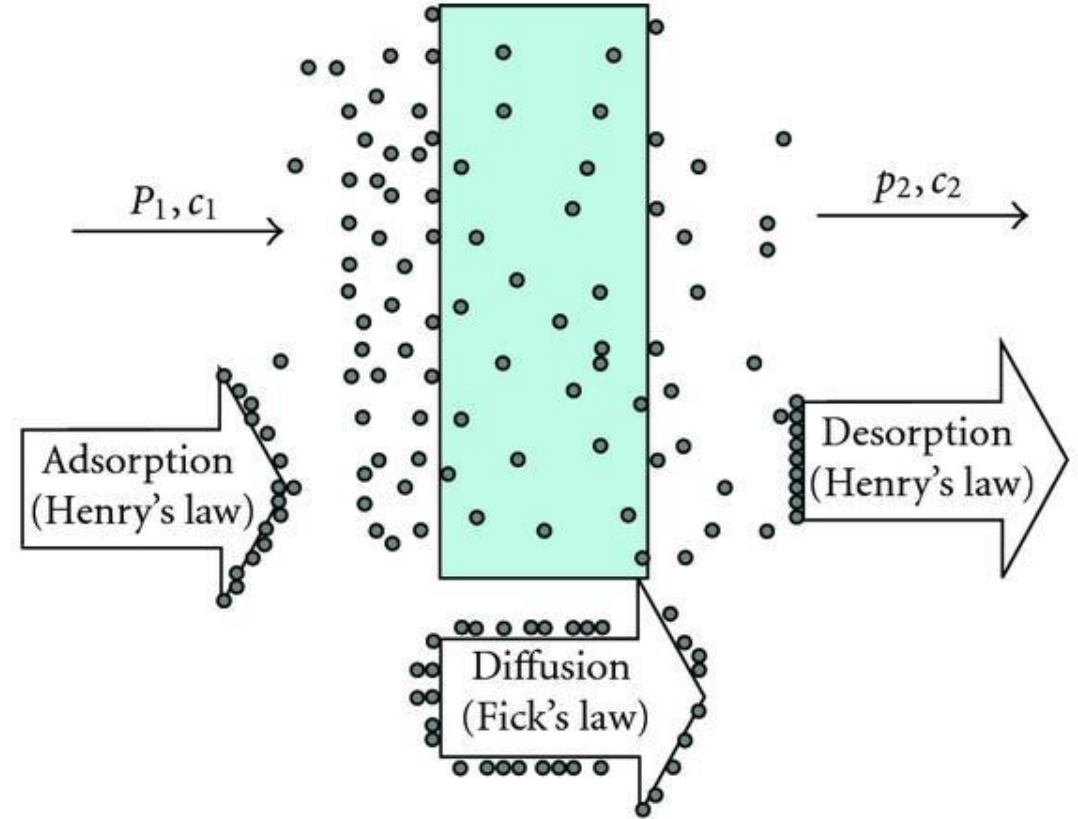
Pakattavan elintarvikkeen tapauksessa pakkauksen läpäisevyyden analysointi ja arviointi on olennaista, koska pakkauksen sisälle tai siitä ulos siirtyvä O₂, CO₂ ja H₂O(g) voivat aiheuttaa muutoksia elintarvikkeeseen.



Läpäisyn mekanismi

Kaasumolekyylien liikkuminen homogeenisen, ei-huokoisen polymeerimatriisin läpi voidaan kuvata seuraavan prosessin avulla:

- (i) **ADSORPTIO:** tiivistyminen ja liuoksen tunkeutuminen materiaaliin yhdeltä pinnalta (lämpötilan lasku ja paineen nousu suosii)
- (ii) **DIFFUUSIO:** nestemäisessä muodossa tiivistyneen ainesosan vaikutuksesta (lämpötilan nousu helpottaa)
- (iii) **DESORPTIO:** haihtuminen toiselta pinnalla kaasumaiseen muotoon.



- Gas or vapour molecules

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



Diffuusiovirtaus

Määritetään polymeerimateriaalin paksuudeksi l , pinta-ala A , jolle neste levittyy, ja Q läpäisevän aineen kokonaismäärä tämän materiaalin läpi ajassa t

DIFFUUSIOVIRTAUS:

$$J = Q/At$$

J = läpäisevän aineen määrä tietyssä ajassa ja tietyn alueen läpi.

Materiaalin diffuusiovirtauksen määrä voidaan määrittää
FICKin KAHDELLA LAILLA



FICKin ENSIMMÄINEN LAKI: käytetään laskemaan virtauksen läpäisyä VAKIO-OLOSUHTEISSA eli kun konsentraation profiili ei muutu ajan myötä ja virtaus on vakio.

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

FICKin TOINEN LAKI: mahdollistaa konsentraation muutoksen virtauksessa pakkauksen sisällä vaihtelevalla nopeudella, siis TILAPÄISISSÄ OLOSUHTEISSA. Profiilin konsentraatio vaihtelee ajan mittaan. Tällöin voidaan puhua ns. viiveestä (viiveaika).

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

D = Diffuusiokerroin
pitouden neliö per kulunut aika (cm^2s^{-1});

C = läpäisevän aineen konsentraatio massa tai tilavuus per materiaalitulavuuden yksikkö (mol cm^{-3});

X = virtauksen pituus virran suuntaan (cm).

T = aika (s)



DIFFUUSIO ON NOPEAMPAA

- amorfisille rakenteille
- alhaisemman sulamislämmön materiaaleille
- kun molekyylien liikkuvuus on suurempi
- sekundääristen sidosten läsnä ollessa
- alemman tiheyden materiaaleilla
- pienemmän diffuusio materiaaleilla
- kun sitoutuminen liukenevaan aineeseen on korkeampi.

DIFFUUSIO ON HITAMPAA

- kiteisille materiaaleille
- korkeamman sulamislämmön materiaaleille
- kun molekyylien liikkuvuus on alempi
- kovalenttisten sidosten läsnä ollessa
- korkeamman tiheyden materiaaleille
- kun atomien diffuusio on suurempi
- kun sitoutuminen liukenevaan aineeseen on alhaisempi.



Polymeerin sorptio

Termiä *sorptio* käytetään yleensä kuvaamaan lopullista läpäisyä ja pysyvien molekyylien dispersiota polymeerimatriisiin. Se sisältää sekä absorption että adsorption, kuten myös tarttumisen mikroriekiin tai aggregaattien kerääntyminen.

Annetussa lämpötilassa **C** polymeeriin liunneen kaasun konsentraatio voidaan suhteuttaa paineeseen **P** seuraavan kaavan avulla:

$$C = S(C)p$$

- **Konsentraatio C** esitetään $\text{cm}^3 \text{ (STP)}/\text{cm}^3$ polymeeri (läpäisseen kaasun konsentraatio laskettuna vakioiduissa lämpötila ja paineolosuhteissa eli 273°K ja 1 atm polymeerissä, joka altistetaan paineelle p).
- **Liukeneskerroin S** esitetään $\text{cm}^3(\text{STP})/\text{cm}^3 \cdot \text{MPa}$.

S(C) on LIUKENEMISKERROIN, ja se mitataan polymeerin ja läpäisevän aineen suhteena.

Henryn laki $\rightarrow C = S \cdot P$ *Sovellettavissa matalissa paineissa ja ideaalikaasulle*



Läpäisevyyskerroin

Kun Fickin ensimmäinen laki integroidaan paksuuteen ja konsentraatioon, ja jos voidaan olettaa, että Henryn laki on voimassa, on mahdollista määrittää läpäisseen kaasun määrä (**Q**) materiaalin läpi:

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

Tulo **D·S** on "läpäisevyyskerroin" ja sitä kuvaa symboli **P_e**:

$$P_e = D \cdot S$$

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

P_e on "läpäisevän aineen määrä, joka kulkee tietyn pinta-alan ja määritellyn paksuuden läpi johtuen osittaisesta paine-erosta".

P_e ilmoitetaan yleensä **cm³ μm m⁻² 24h⁻¹ bar⁻¹**



Läpäisevyys

P_e kuvaus osoittaa, että kaasun läpäisevyys on käänteisesti verrannollinen materiaalin paksuuteen. Käänteisesti verrannollisuus ei aina täyty: itse asiassa joskus vakioläpäisevyys tietyn materiaalin eri paksuuksien läpi ei saa samaa arvoa.

Läpäisevyys (tai läpäisykyky):

kaasun määrä, joka läpäisee kappaleen pinta-alan annetulla paksuudella per kulunut aika ΔP

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

Merkitään kirjaimella **P** ja ilmaistaan yksikkönä $\text{cm}^3\text{m}^{-2}24\text{h}^{-1}\text{bar}^{-1}$



Kaasunläpäisykerroin GTR

P_e :n määritelmä osoittaa, että kaasun läpäisy on suoraan verrannollinen paine-eroon. Kuitenkin ΔP :n suoraanverrannollisuus ei aina päde. Tästä syystä ΔP vaatii yleensä mittausolosuhteiden huomioinnin. Silloin tarvitaan toista määritelmää:

KAASUNLÄPÄISYKERROIN:

Kaasun määrä, joka läpäisee tietyn pinta-alan annetulla paksuudella määritellyssä paineessa tietyssä ajassa

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

Se mitataan $\text{cm}^3\text{m}^{-2}24\text{h}^{-1}$ ja on osoitettu, että läpäisevän aineen muodosta riippuen **GTR** voi olla monessa muodossa: O_2TR , N_2TR , CO_2TR , WVTR .



Barrier-ominaisuudet

(UNI 10534 12/94)

BARRIER	P/WVTR
Hyvin korkea	< 0.5
Korkea	0.5 - 3.0
Keskinkertainen	3.1 - 30
Matala	31 - 150
Hyvin matala	> 150

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

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



Barrier-ominaisuudet

Polymeerimateriaali	Hapenläpäisy 25 µm paksun kalvon läpi (cm³/m² 24h bar)
Alhaisen tiheyden polyeteeni (LDPE)	7000–8000
Korkean tiheyden polyeteeni (HDPE)	2800–3000
Polypropeeni (PP)	2300–3700
Plastisoitu polyvinyylikloridi (PVC)	6000–9000
Polystyreeni (PS)	3800–5400
Polyeteenitereftalaatti (PET)	45–90
Polyamidi 6 (PA6)	20–40
Polyamidi 11 (PA11)	500–1500
Polyvinyylidieenikloridi (PVDC)	12–100
Polyeteenivinyylialkoholi (EVOH)	1–





UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI SALERNO



Esitetyt mielipiteet ovat kirjoittajien omia, eivätkä ne välttämättä edusta Euroopan komission kantaa. Euroopan komissio tai sen puolesta toimivat henkilöt eivät ole vastuussa siitä, miten tämän julkaisun sisältämiä tietoja käytetään.



Yhteisrahoitettu
Euroopan unionin
Erasmus+ -ohjelmasta



PACKALL

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



Korkeakoulut ja yritykset yhdessä.



CAMPUS OF INTERNATIONAL EXCELLENCE
OF THE EBRO VALLEY



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI
DI SALERNO



El poder de la colaboración



PLASTICS INNOVATION POLE

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

Tämä lisenssi sallii muiden levittää ja muokata teosta ja luoda sen pohjalta uusia teoksia, mutta ei kaupalliseen käyttöön.

Kuitenkin vain seuraavilla ehdoilla:

Nimeä — Sinun on asianmukaisesti mainittava alkuperäinen tekijä, annettava linkki lisenssiin ja ilmoitettava, onko muutoksia tehty. Voit tehdä sen millä tahansa kohtuullisella tavalla, mutta et millään tavalla, joka viittaa siihen, että lisenssinantaja tukee sinua tai käyttöäsi.

EiKaupallinen — Et saa käyttää materiaalia kaupallisiin tarkoituksiin.

JaaSamoin — Jos muunnat tai luot materiaalin pohjalta uutta materiaalia, sinun on jaettava tuotoksesi samalla lisenssillä kuin alkuperäinen.

Ei lisärajoituksia — Et saa soveltaa laillisia ehtoja tai teknisiä toimenpiteitä, jotka laillisesti estävät muita tekemästä mitään, mitä lisenssi sallii.



Yhteisrahoitettu
Euroopan unionin
Erasmus+ -ohjelmasta

Hanke on rahoitettu Euroopan komission tuella.
Tästä julkaisusta [tiedotteesta] vastaa ainoastaan sen laatija, eikä komissio ole vastuussa siihen sisältyvien tietojen mahdollisesta käytöstä.