

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

جامعة الملك سعود

كلية علوم الأغذية والزراعة

الهندسة الزراعية

## الجزء الثاني من مذكرة

(مقرر ٣٤١ هزر)

# الخواص الهندسية للمنتجات الحيوية

(ب)

أستاذ المادة:

د / عبد الله بن محمد الحمدان

مشرف العملي

محاضر / بندر النهدي

الطبعة الرابعة

١٤٢٧-١٤٢٨ هـ

## محتويات

### مذكرة الخواص الهندسية للمنتجات الحيوية

الصفحة	الموضوع
٣	الفصل الأول
١٥	الفصل الثاني
١٥	٢- الخواص الطبيعية وطرق قياسها
١٨	١-٢ الشكل والمقاس
٣٣	٢-٢ مساحة السطح
٤١	٣-٢ الحجم والكثافة
٥١	٤-٢ المسامية
٥٤	٦-٢ النشاط المائي ومنحنيات الإمتزاز الرطوبي
٨٦	٧-٢ خصائص العبوات الغذائية ونفاذية العبوات البلاستيكية لبخار الماء
١٠٨	٨-٢ الخصائص الميكانيكية للمواد الغذائية
١٣٢	الفصل الثالث
١٣٣	٣- الخواص الحرارية وطرق قياسها
١٣٣	١-٣ مقدمة
١٣٣	٢-٣ آليات انتقال الحرارة
١٣٦	٣-٣ الخواص الحرارية للمنتجات الحيوية
١٣٦	١-٣-٣ الحرارة النوعية
١٤٧	٢-٣-٣ معامل التوصيل الحراري
١٥٧	٣-٣-٣ معامل الانتشار الحراري
١٦٢	٤-٣-٣ معامل انتقال الحرارة السطحي (بالحمل)
	الفصل الرابع
	٤- موضوعات مستجدة
	١-٤ تصميم أجهزة الفرز والتصنيع وعلاقتها بالخواص الهندسية
	٢-٤ مواضيع مختارة..

## ٣-٧ العبوات الغذائية

### وظائف وخصائص مواد التغليف وناذية الأغشية البلاستيكية

#### ١-٧-٢ مقدمة

في الأسواق المركزية وغيرها، نادراً ما توجد مواد غذائية مباعه بدون عبوات مناسبة. حيث تلعب عبوات المادة الغذائية دوراً هاماً في نقل المنتج (بكميات محددة) وكذلك الحفاظ على جودة المنتج، وأيضاً حمايته من بعض الظروف الخارجية الغير مرغوبة بالإضافة أن العبوة وسيلة للتعرف على المنتج. بالطبع فإن العبوات لا تحسن من جودة المنتج ولكن المحافظة بقدر الإمكان على جودة المادة الغذائية لأطول فترة ممكنة.

هناك أكثر من ١٠٠ عامل (اعتبار) يجب أخذها في الحسبان عند تطوير عبوة جديدة. ولكن يمكن جمع هذه الوظائف المختلفة للعبوات في ٢٢ عنوان و الذي يمكن حصره في ٧ مجموعات رئيسية كما في التالي.

#### ١-٧-٢ وظائف العبوات الغذائية وأنواعها

١. **احتواء المنتج:** من البديهي أن أهم هدف للعبوة هو منع تسرب المكونات مثل السوائل والبودرة. وهذا يشمل أيضاً تسربات النكهات والغازات وبخار الماء عبر العبوات.
  ٢. **الحماية الطبيعية من الأضرار الميكانيكية والعطب:** وهذا يتضح عند التعامل مع الأغذية المعرضة للكسر مثل البيض والأطعمة الخفيفة. وتشمل الحماية الطبيعية العوامل التالية:
    - تحمل عمليات التغليف في خطوط الإنتاج والتداول عند التوزيع.
    - منع الأوساخ والملوثات الأخرى والحماية من الروائح والتعفن
    - مقاوم لهجوم القوارض و تسرب الحشرات
  ٣. **سلامة الأغذية:** وذلك لمنع تلوث الأغذية المعبأة بالأحياء الدقيقة ولتجنب التسمم البطني -على المدى الطويل- الذي قد يتسرب من الأغشية إلى الأغذية.
- وتشمل مواصفة العبوة:

- متوافقة مع المواد الغذائية وأن تكون غير سامة
- توفر بيئة معقمة وإحكام الغلق
- منع دخول الميكروبات

٤. إطالة فترة الصلاحية: الاكتساب أو الفقد الرطوبي للأغذية من العوامل الرئيسية التي تحدد فترة الصلاحية. كذلك فإن أكسدة الأطعمة المعقمة مثل الحليب والعصائر - وبوجود الضوء كعامل مساعد- يعتبر من العوامل المهمة لتحديد فترة صلاحيتها. وتعمل لمواد المعيقة للإضاءة و الأوكسجين مثل رقائق الألمنيوم والصفائح على إطالة فترة صلاحية هذه المنتجات. وفي بعض الأحيان تتغلب اعتبارات اقتصادية على نوع مادة العبوة مثل اختيار العبوات البلاستيكية لأنها رخيصة بالرغم من محدودية فترة صلاحيتها مقارنة بالعبوات المعدنية أو الزجاجية.

وتعمل العبوة على إطالة فترة صلاحية المنتج من خلال:

- التحكم في فقد أو اكتساب المحتوى الرطوبي
- الحماية ضد الضوء
- المحافظة على نسب غازات محددة ( مثل نسبة ثاني أكسيد الكربون CO<sub>2</sub> للنيتروجين N<sub>2</sub> والأوكسجين O<sub>2</sub>)

٥. وسيلة اتصال (بيان لمعلومات ومحتويات المنتج): وذلك لإعلام المشتري نوع الغذاء بداخل العبوة وكذلك مكوناته. بالإضافة إلى ذلك، هناك الكثير من المعلومات المقدمة للمستهلك مثل الوزن الصافي، قائمة بالمحتويات والقيمة الغذائية والمعاملة الحرارية، رقم التصنيع، و تاريخ الإنتاج والصلاحية.

٦. مرغبات البيع وجوانب تسويقية ودعاية: لابد أن تكون العبوة جذابة وأن تكون ملفتة لنظر المشتريين. ومن المتطلبات أيضاً سهولة فتح العبوة وكذلك التخلص منها (إمكانية إعادة التدوير).

٧. الجدوى الاقتصادية: حيث يخضع لسعر العبوة الخام، خطوات التصنيع المختلفة والأجهزة المستخدمة، القدرة التسويقية، ومدى تقبل المستهلكين لها.

### أنواع العبوات:

يمكن تقسيم أنواع العبوات إلى ٥ أقسام رئيسية:

(١) عبوات معدنية: تتطلب صناعة العبوات المعدنية العديد من الرقائق المعدنية المختلفة

اللازمة لبناء العبوة. معظم هذه الرقائق تنتج من الحديد الصلب أو الألمنيوم

وسبائكها

(٢) عبوات بلاستيكية مرنة وصلبة وأخرى خاصة بالتعقيم

(٣) العبوات الزجاجية

(٤) عبوات خشبية وفخارية

(٥) عبوات ورقية وكرتونية.

(٦) عبوات مركبة: من عدة أنواع كما هو الحال في العبوات التعقيم للحليب والعصير حيث

تحوي على عدة طبقات معدنية وبلاستيكية وورقية وغيرها.

## ٢-٧-٣ العبوات البلاستيكية

انتشر استخدام الأغشية البلاستيكية بشكل واسع حتى بلغ الإنتاج العالمي من الأغشية البلاستيكية البلايين من الكيلو غرامات، وذلك منذ أن بدأت محاولة استخدام غشاء البولي فينيل كلورايد في تغليف الأغذية عام ١٩٣٠ م وذلك لحماية الأغذية والمشروبات. ويستخدم ٢٥% من هذه المواد البلاستيكية في التغليف -في الولايات المتحدة الأمريكية. لهذا سيتم التطرق في هذا الجزء إلى العبوات البلاستيكية لانتشارها الواسع وشيوع استخدامها.

يستعمل في صناعة المواد البلاستيكية مركبات تسمى البوليمرات Polymers وهي تتكون من وحدات من مادة عضوية واحدة أو أكثر ذات وزن جزيئي كبير قابلة للتشكيل حسب الرغبة ويكون الكثير منها عبارة عن مركبات بتروكيميائية ، وتخلط معها مواد مضافة Additives لإكسابها خواص معينة كالمرونة والليونة ومقاومتها للكسر وشفافيتها للضوء. وهناك عدة تسميات للبلاستيك Plastics والتي تتميز بأنها إذا تم سحبها أو ضغطها بقوة فإن شكلها يتغير بسهولة، أي يمكن تشكيلها بسهولة. أما كلمة اللدائن فهي التسمية العربية لها. أما التسمية الثالثة فهي "البوليمرات" وهذا هو الاسم العلمي لللدائن أو البلاستيك، وهناك نوعان من اللدائن، اللدائن الطبيعية، مثل المطاط والصمغ الطبيعي، واللدائن المصنعة Synthetic Polymers وهي الأكثر شيوعاً واستخداماً وتصنع من النفط والغاز.

ويرجع الانتشار السريع للعبوات البلاستيكية إلى اكتشاف النفط وتطور صناعة الغاز المنتج. وتصنع معظم المنتجات البلاستيكية من الغاز المستخرج من الأرض غالباً مصاحباً للنفط. حيث تقوم بإنتاجه في المملكة شركة أرامكو ومن ثم تقوم شركات البتروكيمياويات العملاقة مثل شركة سابق بتحويل الغاز إلى بلورات حبيبية (بوليمرات) عبر عمليات معقدة من التكثيف ودرجة الحرارة العالية. تتكون "البوليمرات" من مواد هيدروكربونية ذرات الكربون وذرات الهيدروجين مضافاً إليها بعض المواد الأخرى مثل النتروجين والأكسجين والكلور. هذه المواد تتكون من وحدة أساسية تسمى المونيمر Monomer أو الجزء الصغير. وعندما تترايط أعداد كبيرة جداً قد تصل إلى عشرات أو مئات الآلاف من هذه الأجزاء الصغيرة يتكون جزءاً البوليمر Polymer. يتم تشكيل المواد البلاستيكية التي توجد عادة على شكل حبيبات أو مساحيق أو قشور بإجراء بعض العمليات كالتسخين والضغط والصب وغيرها . وفي النهاية تقوم مصانع البلاستيك بتحويل هذه الحبيبات البلاستيكية إلى عبوات في شكلها النهائي عبر عدة طرق تصنيعية مثل القولية والنفخ والبتق والي تستخدم فيها الحرارة والقولية.

## طرق تصنيع العبوات البلاستيكية:

من أهم طرق التصنيع والتشكيل للعبوات البلاستيكية ما يلي:

١. **الضغط** : يتم التشكيل بالضغط ( PRESSURE Molding ) بوضع المواد البلاستيكية المراد تشكيلها في الجزء السفلي من القالب الذي يكون ثابتاً ثم يتحرك الجزء العلوي من القالب مع الضاغط إلى اسفل ويقفل القالب ، وتحت تأثير الضغط ودرجة الحرارة تتصلب المادة ويلي ذلك تحرك الضاغط إلى أعلى فيفتح القالب وتخرج القطعة في حالتها النهائية وبالشكل المطلوب. وتعد طريقة التشكيل بالضغط من اقدم طرق التشكيل ويعتمد مقدار الحرارة والضغط المطلوبين للتشكيل على طبيعة المادة المراد تشكيلها وعادة تصل درجة الحرارة إلى ١٥٠°م بينما يتراوح الضغط من ٦٠ إلى ٢٠٠ ضغط جوي . وتخضع المادة المشكلة إلى عمليات تشطيب للتخلص من بعض المواد الزوائد البسيطة للمحافظة على شكل المنتج النهائي .

٢. **الحقن** : يتم التشكيل بالحقن ( INJECTION Molding ) بإدخال المادة البلاستيكية المراد تشكيلها في اسطوانة ساخنة تتحول فيها المادة إلى مادة لدنة ( سائله ) تحقن بواسطة الكبس داخل القالب الذي يبرد خلال عملية الحقن فتبرد وتأخذ شكل القالب وتخرج في الشكل المطلوب .

٣. **النفخ** : ( Blow Molding ) : تتم بتسخين المادة ودفعها إلى داخل القالب بواسطة تيار قوي من الهواء بحيث تنتشر المادة البلاستيكية بصورة متساوية على الجدار الداخلي للقالب وتأخذ شكله يلي ذلك فتح القالب ورمى القنينة أو الحاوية المصنوعة إلى خارجه ومن أهم المواد البلاستيكية الناتجة عن استخدام هذه الطريقة القناني ، البراميل ، ألعاب الأطفال ، أدوات حفظ السوائل ، قطع توزيع الهواء في السيارة وغيرها.

٤. **البثق** : يستخدم التشكيل بالبثق ( Extrusion Molding ) لتصنيع المواد البلاستيكية المتصلدة ( TP ) وذلك عن طريق العجن اللولبي والتلدين بالحرارة المستمرة في اسطوانة تحتوي لولباً يدور فيدفع العجينة المدونة للأمام نحو فوهة الخروج الموجودة في نهاية اسطوانة البثق . وتساعد فتحات البثق المركبة على الفوهة على إنتاج مجموعة لا نهاية من أشكال المقاطع المنبثقة المستمرة الطول والتي تقطع حسب الطول المرغوب فيه . ومن أهم منتجات هذه الطريقة : أنابيب المياه ، المواسير الرقيقة اللينة ، الصفائح الملفوفة ، رقائق التغليف ، الأغشية العازلة للحرارة والرطوبة وغيرها .

٥. **السكب (القولبة)** : يتم التشكيل بالسكب عن طريق صب المواد البلاستيكية السائلة في قالب للحصول على منتج معين بالشكل المطلوب .

٦. **التلييف** : تستخدم القولبة بالتلييف لتحويل المادة البلاستيكية إلى ألياف عن طريق تسخينها وتحويلها إلى مادة لدنة وضغطها خلال منخل ذي ثقوب صغيرة جداً فتخرج المادة من المنخل على شكل ألياف وتبرد ثم تلف بواسطة اسطوانة متحركة. ومن أهم منتجات التشكيل بالتلييف ألياف : النايلون ، البوليستر ، الاكريلونتريل ، بولي رباعي فلوروايثيلين .

## خصائص الأغشية البلاستيكية:

تتميز العبوات البلاستيكية -بشكل عام بالتالي:

١. أخف وزناً مقارنة بالزجاج والمعدن: متوسط ١ جم/سم<sup>٣</sup> بينما ٨ للحديد و٧,٢ للألمنيوم و ٣ للزجاج.
٢. سهولة تشكيلها: وهي متوسطة الصلابة. ويمكن زيادة صلابتها بواسطة المواد المضافة المحسنة.
٣. محدودة التآكل وخاملة كيميائياً.
٤. شفافية بعض أنواعها للضوء فيمكن رؤية محتويات العبوات المصنوعة منها.
٥. إمكانية الغلق: عند درجات حرارة عالية تتراوح ما بين ٨٥ - ٢٢٠ م يمكن تليين طبقتين من مواد البلاستيك المتشابهة وإصاقهما ليكون بالإمكان إحكام غلق العبوات - بدون مواد إضافية.
٦. انخفاض كلفة إنتاجها وبالتالي رخص ثمنها.
٧. إمكانية صناعة العديد من أنواع البلاستيك باختلاف ما يدخل في صناعته من مواد مضافة.

ولكن من سلبيات المواد البلاستيكية مقارنة بالعبوات المعدنية والزجاجية:

١. نفاذيتها لبخار الماء والغازات. وتختلف درجة نفاذيتها حسب أنواعها.
٢. تشقق بعضها خاصة عند تعرضها لمواد معينة مثل بعض الزيوت الطيارة.
٣. ضعف مقاومة البلاستيك الميكانيكية عند وجود أحمال
٤. محدودية مقاومة الحرارة العالية.
٥. التقاط الغبار
٦. إمكانية انتقال بعض وحدات بناء جزيئات اللدائن أو المواد المضافة المستخدمة في صناعتها لإكسابها خواص معينة إلى الأغذية المحفوظة فيها.

ولقد أمكن التغلب على كثير من هذه العقبات عن طريق خلطها بمواد أخرى معينة مثل مزج البولي إيثيلين بالليف الزجاجي لاستخدامها كأطباق أغذية يتم تسخينها في الأفران.

### تصنيف المواد البلاستيكية

يتوفر في الأسواق العشرات من البوليمرات المستخدمة في صناعة البلاستيك يمكن تصنيفها إلى مجموعتين رئيسيتين هما :

- أ. لدائن حرارية : Thermoplastics وهي نوع من البلاستيك يكون صلدا على درجة الحرارة العادية ، ويمكن إذابته وإعادة تصنيعه، وتشمل الأكريليك والنايلون وعديد الإيثيلين وعديد البروبلين وعديد الستايرين Polystyrene وعديد الإستر وعديد كلور الفينيل (P.V.C) وعديد ميثايل ميثا أكريلات وأكريلونتريل Acrylonitrile وثنائي فينولات Biphenols وغيرها.

ب. لدائن صلدة حرارياً : Thermosetting plastics وهي نوع من البلاستيك لا ينصهر بالحرارة ، فلا يمكن إعادة تشكيله مثل ميلامين فورمالدهيد وفينول فورمالدهيد ويوريا فورمالدهيد

### أنواع البلاستيك المستخدمة في الأغذية:

تتنوع المواد البلاستيكية (الدائن) المستخدمة في صناعة عبوات المواد الغذائية والدوائية إما لوحدها أو مع غيرها من المركبات، وأهمها:

١. **عديد الإيثيلين (البولي إيثيلين) منخفض الكثافة (L.D.P.E):** وهو مكون من ١٠,٠٠٠ إلى ٥٠,٠٠٠

جزء من الإيثيلين  $CH_2=CH_2$  مترابطة وذات تفرعات كثيرة. يستعمل في تحضير معظم الأكياس المستخدمة في تعبئة الأغذية الساخنة وهو يلتصق بالحرارة، عديد الإيثيلين منخفض الكثافة جيد التوصيل للكهرباء عالي المرونة، ويتأثر بالمذيبات العضوية ، ودرجة انصهاره ١١٠ مئوية ويستعمل في صناعة الصفائح البلاستيكية الرقيقة الشفافة للتغليف ، وما يسميه العامة أحد أنواع الأكياس البلاستيكية.

٢. **عديد الإيثيلين (بولي إيثيلين) عالي الكثافة (H.D.P.E) :** وهو مكون من ٢٠٠,٠٠٠ إلى ٥٠٠,٠٠٠

جزء من الإيثيلين  $CH_2=CH_2$  مترابطة ولكن بتفرعات أقل مقارنة بمنخفض الكثافة. له نفس استخدامات النوع قليل الكثافة، وهو أكثر مرونة ومقاومة للمذيبات العضوية وأشد صلابة واحتمالاً لدرجات الحرارة المرتفعة التي تصل إلى ١٢٠ مئوية ويستعمل في صناعة أدوات منزلية وأنايب وخرطوم المياه ، كما يمكن استعماله في تعبئة الأغذية التي تتعرض لدرجات حرارة التعقيم ويتميز بقدرته على عزل الرطوبة والاحتفاظ بمرونته على درجة حرارة التجميد التي تقل عن -٥ مئوية ولم تكتشف له أي أضرار صحية.

٣. **عديد البروبيلين (بولي بروبلين) P.P :** وهو مكون من جزيئات البروبيلين  $CH_3=CH-CH_2$  المترابطة.

وهو أكثر صلابة وتحماً وشفافية من عديد الإيثيلين عديد البروبيلين (p.p) وتكون مرونته وصلابته أعلى من عديد الإيثيلين وله نفس استخدامات عديد الإيثيلين.

٤. **عديد الإيثيلين تيرافثالات (PET):** وهو مقاوم لدرجات الحرارة المرتفعة حتى ٣٠٠ م ، ويتميز بمحدودية

نفاذية للرطوبة والغازات ولونه شفاف ويقاوم بشكل جيد المذيبات العضوية ويستعمل في تعبئة المياه الصحية والدواجن المذبوحة المبردة والمجمدة وغيرها، وتفضل بعض مصانع تعبئة المياه الصحية استخدامه عوضاً عن بلاستيك عديد كلور الفينيل.

٥. **عديد كلوريد الفينيل P.V.C :** وهو مكون من جزيئات من كلوريد الفينيل  $CH_2=CHCl$  (به ذرة كلور

واحدة بديلة عن الهيدروجين مقارنة بالإيثيلين) المترابطة. وهو جيد الالتصاق ولا يتأثر بالدهون والزيوت ويستعمل في صناعة الحاويات والصفائح و القوارير والأنايب. وهو شديد المقاومة لنفاذ الرطوبة ويستعمل في صناعة عبوات الأغذية الجاهزة للطعام التي تؤكل بعد تسخينها أو عليها ready to use foods، وينتشر استعمال النوع الصلب منه في عمل عبوات زيوت الطبخ ومياه الشرب



وعصائر الفواكه المركزة والزيتون المخلل وأغذية أخرى لأنه يمتاز بشدة مقاومته للدهون والزيوت وعدم نفاذيته للرطوبة والغازات. إلا أن استخدامه في العبوات الملائمة للغذاء بدأ يقل نتيجة لبعض الدراسات التي تشكك في ملائمة الغذاء لهجرة بعض مكوناته للغذاء.

٦. الساران: وهو مشابه لعديد كلوريد الفينيل ولكن يزيد بذرة كلور أخرى.

٧. عديد الستايرين (P.S): وهو نوع من البلاستيك شديد المقاومة للصدمات والكيماويات والظروف الجوية ويتصف بالشفافية في لونه وصلابته ، ويستخدم في صناعة الأدوات المنزلية ورضاعات الأطفال وفي عبوات بعض المواد الغذائية كالألبان.

٨. عديد الإستر (P.E.S): مقاوم للحرارة واللهب والمواد الكيماوية وجيد التوصيل للكهرباء ، ويستخدم في صناعة الألياف والأقمشة وعبوات مياه الشرب.

٩. ميلامين فورمالدهيد: وهي لا تتصهر بالحرارة ، فلا يمكن إعادة تشكيلها ، وتستخدم في صناعة أطباق الطعام والصواني وغيرهما المشهورة بالميلامين.

كما ينتشر استخدام البلاستيك مع مواد أخرى في صناعة العبوات الغذائية والدوائية مثل رقائق الألمنيوم المكسو بعديد الإيثيلين والسيلوفان المبطن بعديد الإيثيلين وعديد البروبيلين المبطن بالألمنيوم وغيرها.

وهناك العديد من الإختيارات والمواصفات للعبوات البلاستيكية، ومنها :

- الصلابة: Stiffness - الشفافية: Clarity - المقاومة عند التعبئة والنقل
- تحمل درجات الحرارة: سواء عند درجات الحرارة المرتفعة أو عند التجميد.
- نفاذية بخار الماء - نفاذية الغازات - نفاذية المحاليل
- المضافات. - الهجرة: - المقاومة الكيميائية
- قوة الشد - قوة القص - قوة الاختراق
- التمدد والانكماش - عدد ونوع الجزيئات المترابطة
- التكلفة: Cost

ومن متطلبات العبوات البلاستيكية المخصصة للتعقيم الحراري أن تكون متحملة للحرارة، مقاومة للتحلل الكيميائي والأشعة فوق البنفسجية، عاتقة للغازات وبخار الماء، المتانة والقوة، عديمة التفاعل مع الأغذية المعبأة وغير منفذة للضوء.

ولقد نجح العلماء في إنتاج مواد بلاستيكية جديدة تباع في الأسواق ذات مواصفات تتفوق على سابقتها بقلّة معدل نفاذيتها للغازات وارتفاع ثباتها الحراري عند تعرضها لدرجات حرارة مرتفعة وتقاوم الكثير من الكيماويات كالأحماض والقلويات وسواها وانخفاض معدل هجرة وحداتها البنائية منها إلى الأغذية. كما تمكنوا من تطوير إنتاج مواد بلاستيكية جديدة تحتوي من مواد مضافة أكثر أمانا لصحة الإنسان لاستخدامها

في إنتاج عبوات ومواد تغليف للأغذية والأدوية. وتستمر الجهود العلمية في مجالات تطوير مثل هذه الأنواع من اللدائن كي تطول فترة تخزين المشروبات الغازية وغيرها في عبواتها. كما نجح إنتاج مركب عديد كلور الفيناييل P.V.C جديد تقل نسبة المتسرب من المادة الأحادية الحرة Monomer منه إلى الأغذية، وأمكن زيادة درجة الثبات الحراري لبعض أنواع البلاستيك الحراري حتى تتحمل درجات حرارة التسخين لاستعماله في إنتاج قوارير مقاومة للحرارة المرتفعة، كما يباع في الأسواق بلاستيك من نوع عديد الإيثيلين نفاثات (P.E.N.) له ثبات جيد لدرجات الحرارة المرتفعة ونقل نفاذيته للغازات، ووفر إنتاج أنواع البلاستيك المحسنة استبعاد الأخطار الصحية التي صاحبت قديماً استخدام بعض أنواعه، ويتوفر في الأسواق أنواع جديدة من اللدائن تتضاءل بشكل كبير نفاذيتها للهواء والرطوبة لاستخدامها في تعبئة الأغذية والأدوية حتى تطول فترة حفظها.

### مواصفات المواد البلاستيكية:

(١) **الخواص الطبيعية:** Physical properties وتشمل: الكثافة والمستخدم لخدمة لتقدير كميات الأغلفة البلاستيكية وكذلك كدليل لنفاذية الأغشية لبخار الماء والغازات.

(٢) **الخواص الميكانيكية:** Mechanical properties وتشمل: القوة والصلابة المتأثرة بأحمال الشد والرص، مقاومة الصدمات، والقابلية للتمدد عند التصنيع والاستخدام. وأيضاً الخصائص الميكانيكية المعتمدة على الزمن من حيث تغير سلوك المادة عند تعرضها لحمل معين و معدل التغير مع الزمن.

(٣) **الخواص الكيميائية:** Chemical properties وتعتبر عن قدرة المادة على مقاومة هجوم مواد كيميائية. وتؤثر على هذه المقاومة ظروف أخرى مثل: درجة الحرارة، الرطوبة، الجهد الميكانيكي، شدة الإضاءة والإشعاع، ومدة وكيفية التعرض لهذه العوامل. ويختلف تأثير المواد الكيميائية من محدود جداً إلى الانتفاخ بسبب الامتصاص، وإلى تأثير كبير يؤدي إلى انهيار مادة البلاستيك. معظم الأغشية البلاستيكية لا تتأثر بمحتويات المواد الغذائية. إلى أن بعض الأغشية تستطيع امتصاص جزءاً من المكونات الغذائية.

(٤) **الخواص البصرية (الضوئية):** Optical properties نفاذية الضوء عبر مواد التغليف يؤثر على جودة الأغذية حيث يساعد على تسريع بعض التفاعلات السلبية والتي تؤثر على مظهر ووظيفة العبوة. وبالتالي يتم استخدام بعض الإضافات لحجب الضوء خاصة لبعض الإشعاع المضر مثل الأشعة فوق البنفسجية.

(٥) **الاستمرارية:** Permanence وتعتبر عن تأثير الزمن على عمر البلاستيك - عند عدم وجود أحمال ميكانيكية خارجية. يترتب على ذلك -في الغالب-: التشوه والانكماش، وفي بعض الأحيان انهيار ميكانيكي.

(٦) **خواص الانتقال:** Transport properties : ومنها مكونات الأغذية، الغازات، الماء وبخار الماء، ومكونات العبوة معرضة للهجرة إلى داخل أو خارج العبوة. كذلك مكونات الهواء والبيئة قد تدخل العبوة المنفذة وتسبب الضرر للمواد الغذائية المعلبة. وهي من الخواص المهمة جداً خاصة للعبوات

البلاستيكية والتي يجب العناية بها ودراستها لكل نوع من الأغشية. النفاذية تعبر عن انتقال الكتلة عبر غشاء العبوة حسب:

$$P = Q \times x / A \Delta p t$$

حيث

P تعبر عن انتقال كمية Q من النادة عبر غشاء بسماك x ومساحة A خلال زمن t عند وجود القوة الدافعة (المحركة)  $\Delta p$ .

(٧) **صفات السطح:** Surface characteristic حيث تزيد النفاذية بزيادة مساحة السطح الداخلية المتصلة بالأغذية. خصائص انزلاق السطح الخارجية تؤثر على تداول العبوات. كذلك خصائص السطح تؤثر على طباعة أو لصق البيانات على سطح العبوة.

(٨) **السلوك الحراري:** وذلك عند تعرض العبوات لظروف التجمد (مثل عبوات الدواجن) إلى درجات عالية قرب نقطة الذوبان لبعض الأغشية البلاستيكية المعقمة ولفترات محدودة وحتى العمر التخزيني. ذلك تبرز أهمية دراسة الجهد الحراري المسبب للتشوه وعلاقته بكل من الزمن ودرجة الحرارة والرطوبة، والجهد الميكانيكي عند نقاط التوزيع المختلفة وحتى استخدامه من قبل المستهلك.

ومن أشكال العبوات البلاستيكية: قنينات (قوارير)، جرة (مرطبان)، علب اسطوانية، أنابيب، عبوات ورقية، صناديق، أطباق، أكياس حرارية، أنابيب انضغاطية، ملصقات، أغشية تغليف، قفل بالانكماش، أغطية أغذية الميكرويف.

## ٧- ٢- ٤ نفاذية الأغشية البلاستيكية لبخار الماء والغازات

من المعروف أن معظم الأغشية البلاستيكية منفذة لبخار الماء والغازات الأخرى مما يسبب انتقال قد يكون غير مرغوباً إلى داخل العبوة الغذائية. تتفاوت الأغشية البلاستيكية في نفاذيتها لبخار الماء والغازات الأخرى حسب عدد من العوامل منها:

- (١) نوع المادة البلاستيكية (بولي إيثيلين أو بولي بروبيلين مثلاً)
- (٢) التركيب الجزيئي ويشمل عدد الجزيئات طبيعة التفرعات والروابط بينها.

- ٣) نوع وطبيعة المواد المضافة والمحسنة.  
 ٤) طريقة تصنيع البلاستيك  
 ٥) ظروف التخزين (خاصة درجة الحرارة والرطوبة النسبية).

تتأثر الإنفاذية بظروف تخزين الأغذية وكذلك بطبيعة الأغذية بالإضافة إلى طبيعة المادة المنفذة. للتحكم في المحتوى الرطوبي للأغذية، فإن نفاذية بخار الماء لمادة التعبئة يمكن أن تختار بناء على فترة الصلاحية للمنتج، المحتوى الرطوبي الابتدائي للغذاء، ومساحة السطح وسمك مادة التغليف. كذلك الحال للتحكم في تركيز الغازات الأخرى مثل الأكسجين، ثاني أكسيد الكربون، والنيتروجين ضمن بيئة الغذاء المغلفة. يمكن تقليل معدلات التنفس للفواكه والخضروات بواسطة تقليل تركيز الاوكسجين في بيئة العبوة. التركيز المنخفض للأكسجين أيضاً مطلوب لحماية الإغذية المحتوية على احماض دهنية غير مشبعة. للأغذية الجافة، التحكم في كل من الأكسجين و بخار الماء أساسي لإطالة فترة الصلاحية. لهذا الغرض يمكن إصاق طبقتين للتحكم في الأكسجين و بخار الماء، طبقة للتحكم في الأكسجين والأخرى للتحكم في إنتقال بخار الماء. أحيانا، للتحكم في الأكسجين و بخار الماء داخل بيئة مغلفة، توضع مواد مُجففة (مجففات) أو كاسحات للأكسجين داخل العبوة لتقليل نسبة  $O_2$  داخل العبوة. وهناك أنواع مختلفة من الأغشية يمكن إستخدامها في عبوات الأغذية. خصائص الأغشية تعتمد على عدد من العوامل مثل درجة التبلر والوزن الجزيئي، توجيه البوليمر المكاني، وجود ملدن plasticizer ( ملين )، وتقنية تكوين الغشاء. فمثلاً هيدروكربونات الفلورين لها نفاذية عالية للأكسجين وتعتبر خاملة (inertness). من ناحية أخرى، تريفلورو-كلورو إيثيلين trifluoro chloroethylene له نفاذية منخفضة للغازات. أما فلورايد بوليفينيل فله نفاذية متوسطة لمختلف الغازات. وهناك أغشية ذوابة للماء مثل كحول البوليفينيل polyvinyl كوللاجين collagen، وبعض مشتقات السيليلوز والمتعدد السكريات polysaccharides. تعتبر أغشية النايلون خامدة ومقاومة للحرارة. وعلى ذلك، فأغشية العبوات تتحكم في تركيزات كل من الإضاءة والأكسجين، ثاني أكسيد الكربون، والرطوبة. كما وجود الأكسجين يؤدي إلى أكسدة الدهون والزيوت في الأغذية وبالتالي يحدث التزنخ الأسيدي. كما أن مكونات أخرى مثل بعض الأحماض الأمينية، الصبغات، البروتينات، والفيتامينات أيضاً تعتبر حساسة للأكسجين.

ويمكن التحكم وتقليل معدل تنفس في الفواكه والخضروات من خلال تقليل نسبة الأوكسجين داخل العبوات. ولكن، مع استمرار التنفس اللاهوائي لبعض الوقت فإن هذا يؤدي إلى فساد الفواكه و الخضروات. لذا يجب اختيار الغشاء البلاستيكي ذو النفاذية المناسبة للحفاظ على نسب الغازات المطلوبة (خاصة الأكسجين وثاني أكسيد الكربون) داخل العبوة لفترة التخزين المطلوبة.

كما أن إنفاذية الأغشية البلاستيكية لبخار الماء قد يسبب فساد الأغذية أو تقليل جودتها وبالتالي مدى تقبل المستهلك لها. فعندم تكون الرطوبة النسبية عالية في البيئة المحيطة بالعبوة (ظروف ساحلية) فتؤدي النفاذية العالية لبخار الماء لتلك الأغشية إلى الاكتساب الرطوبي ومن ثم احتمالية الفساد العالية. أما

في الظروف الجافة (المناطق الصحراوية) فتؤدي الإنفاذية العالية إلى الفقد الرطوبي من المنتج الغذائي إلى خارج العبوة ومن ثم جفافه وبالتالي عدم تقبل المستهلك له أو إلى مشاكل تصنيعية عند التعامل مع هذا المنتج العالي الصلابة.

تتفاوت قيم الإنفاذية بشكل كبير حسب نوع الغشاء البلاستيكي بالإضافة إلى الظروف الأخرى الموضحة سابقاً. قيم الإنفاذية لبعض الغازات لعدد من أغشية العبوات معطاة في جدول (٧) بينما يعطي جدول (٨) قيم لنفاذية بخار الماء لبعض أغشية العبوات البلاستيكية والمطاط.

### حسابات نفاذية بخار الماء والغازات

بخار الماء والغازات (خاصة  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ) تنفذ من خلال مواد الأغلفة البلاستيكية عبر مسامات مجهرية أو بواسطة الانتشار النشط بسبب التباين في التركيز.

يمكن حساب نفاذية الغاز والبخار باستخدام قانون فيك الأول (Fick's first law) والانتشار أحادي

الاتجاه:

$$J = -D_g \cdot A \cdot dC/dx$$

حيث:

- J = معدل الانتشار، جزيء غرامي (مول) اثنائية ؛
- A = مساحة السطح، م<sup>٢</sup> ؛
- $D_g$  = إنتشارية الغاز، م<sup>٢</sup> اثنائية ؛
- C = تركيز الغاز، جزيء غرامي (مول) م<sup>٣</sup> ؛
- x = المسافة في اتجاه الانتشار، متر.

جدول ٧. إنفاذية بعض الأغشية البلاستيكية للغازات عند درجة حرارة الغرفة.

م	الغشاء	الإنفاذية، سم <sup>٣</sup> . ميل م <sup>٢</sup> . يوم <sup>-١</sup> . ضغط جوي <sup>-١</sup>	النيتروجين	ثاني أكسيد الكربون	الأوكسجين
١	ساران	٣	٧٥	١٣	
٢	نايلون ٦	٢٥	٤٠٠	١٠٠	
٣	ميلار ( بولستر )	٢٠	٢٦٠	٨٠	
٤	تراي ثين أو كيل-ف	٤٠	١٠٠٠	١٥٠	
٥	بولي إيثيلين عالي الكثافة HDPE	٧٠٠	١٠٠٠٠	٢٠٠٠	
٦	بولي إيثيلين منخفض الكثافة LDPE	٣٥٠٠	٧٠٠٠٠	١٢٠٠٠	
٧	مطاط طبيعي	٢٠٠٠٠	٣٥٠٠٠٠	٦٠٠٠٠	
٨	مطاط سيليكوني	--	٦١.٠×٦	١.٦	

جدول ٨. إنفاذية الأغشية البلاستيكية وبعض مواد تعبئة الأخرى لبخار الماء عند ١٠٠° ف و ٩٥% مقابل ٠,٠% رطوبة نسبية.

م	المادة	مدى الإنفاذية جم. ٠,٠٠١ بوصة (ميل) ٢٤ ساعة <sup>-١</sup> ١٠٠ بوصة <sup>-٢</sup> .
١	سيلوفان cellophane	١٠٠-٢٠
٢	نتروالسيلوز-سيلوفان	٢,٠-٠,٢
٣	ساران-سيلوفان	٠,٥-٠,١
٤	بولي إيثيلين، تقليدي	١,٥-٠,٨
٥	بولي إيثيلين، ضغط منخفض	٠,٥-٠,٣
٦	ساران	٠,٥-٠,١
٧	أغشية تعتمد على كلوريد-فينيل	٨,٠-٠,٥
٨	شرائح الألمنيوم، سمكها ٠,٠٠٠٣٥ بوصة	١,٠-٠,١
٩	شرائح الألمنيوم، سمكها ٠,٠٠١٤ بوصة	٠,١>
١٠	صفائح شرائح الألمنيوم ورقية بلاستيكية	٠,١>
١١	أوراق مشمعة	١٥,٠-٠,٢
١٢	أوراق مغطاة	٥,٠-٠,٢
١٣	( بولي ) ترايفلورو كلورو إيثيلين	٠,١-٠,٠١
١٤	مطاط سيليكوني	٢٠٠ >
١٥	بولي بروبيلين	٠,٤-٠,٢

بتطبيق قانون هنري (Henry's law)، حيث التركيز معطى ب

$$C = S.P$$

حيث:

$$S = \text{ذوبانية الغاز، مول (باسكال.م}^3\text{)};$$

$$P = \text{ضغط الغاز الجزئي، باسكال.}$$

وبالتالي:

$$J = -D_g.S.A.dP/dx$$

و يعرف  $D_g.S$  بمعامل الإنفاذية (B) ويعني إنفاذية الغاز عبر سمك الغشاء لكل وحدة زمن لكل وحدة مساحة سطح للعبوة ولكل وحدة فرق ضغط بين البيئة و مادة العبوة (مثلاً مول (ثانية.باسكال.متر)).  
معملياً، يمكن التعبير عن خواص إنفاذ الاغشية لبخار الماء بثلاث معادلات هي:

(١) معدل انتقال بخار الماء water vapor transmission rate ( WVTR )

ويعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$WVTR = 24.m_v / (t.A)$$

حيث:

$m_v$  الكتلة المكتسبة أو المفقودة بالجرام،

$t$  الزمن بالساعات،

$A$  مساحة سطح الغشاء بالمتر<sup>٢</sup>.

فتكون وحدات WVTR هي جرام بخار الماء المنتقل عبر ١ متر<sup>٢</sup> من مساحة غشاء خلال

٢٤ ساعة.

(٢) نفاذية بخار الماء water vapor permeance ،

ويعبر عنه بقسمة معدل بخار الماء على فرق الضغط بين جانبي الغشاء:

$$\text{Water vapor permeance} = \frac{\text{WVTR}}{\Delta p} = \frac{\text{WVTR}}{P_s(\text{RH}_1 - \text{RH}_2)}$$

حيث:

$\Delta p$  فرق ضغط البخار، مل زئبق ;  
 $P_s$  ضغط البخار المشبع عند ٢١° م، مل زئبق ;  
 $\text{RH}_1$  و  $\text{RH}_2$  الرطوبة النسبية على كل جانب من عينة الغشاء.

وتكون وحدات نفاذية بخار الماء بالجرام لبخار الماء المنتقل عبر ١ متر<sup>٢</sup> من مساحة غشاء خلال ٢٤ ساعة عندما يكون فرق ضغط البخار ١ مل زئبق.

### (٣) إنفاذية بخار الماء (B) water vapor permeability

ويعبر عنه بقسمة نفاذية بخار الماء على سمك الغشاء x:

$$\text{Water vapor permeability (B)} = \frac{\text{water vapor permeance}}{\text{film thickness, cm}}$$

وتكون وحدات الإنفاذية جرام بخار الماء النافذ عبر ١ متر<sup>٢</sup> من مساحة الغشاء خلال ٢٤ ساعة عندما يكون فرق ضغط البخار ١ مل زئبق و سمك الغشاء ١ سم.

تأثير درجة الحرارة والرطوبة النسبية على الإنفاذية:

تعطي معادلة ارهينيوس (Arrhenius) تأثير درجة الحرارة على معامل الإنفاذية، B في التالي:

$$B = B_0 \cdot e^{-E_a/R \cdot T}$$

حيث:

$B_0$  = ثابت

$E_a$  = طاقة التنشيط،

R = ثابت الغاز،

T = درجة الحرارة المطلقة.

كما أن إنفاذية بخار الماء للأغشية تزيد أسياً مع زيادة فرق الرطوبة النسبية بسبب إمتصاص الماء وإنفخاخ الأغشية (كاريل وغيره، ١٩٧٥، Karel et al.).

الرسوم البيانية في شكل (٣٩) تبين التأثير الكبير لدرجة الحرارة وكذلك نوع المادة البلاستيكية على إنفاذيتها لبخار الماء والأكسجين.



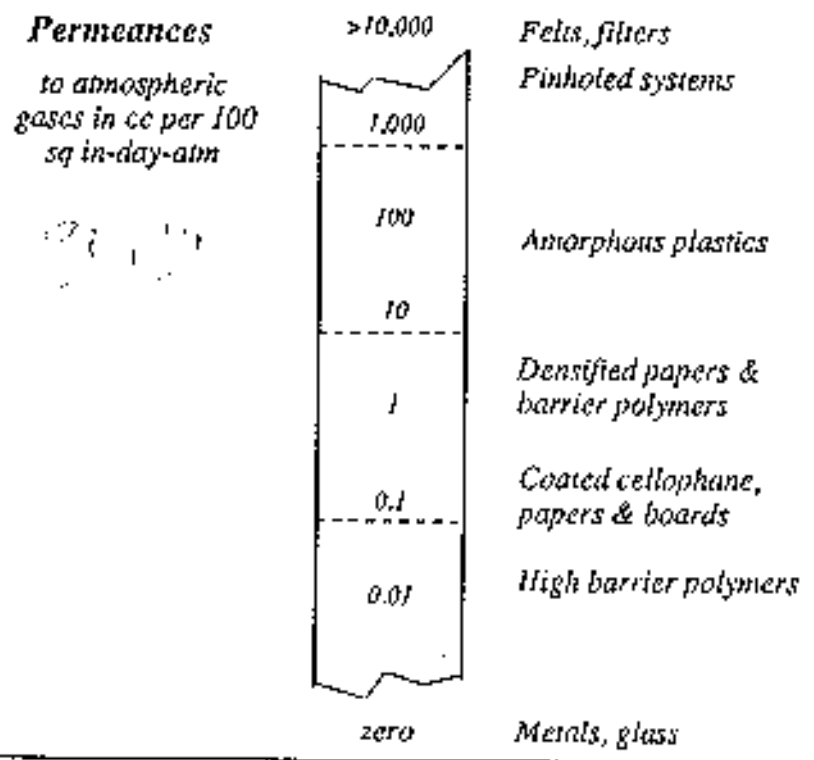


Figure 8.3 - Typical ranges of permeance for common food packaging materials. The logarithmic scale belies the zero values, of course, for metals and glass, both of which can be permeated by certain gases under extraordinary conditions.

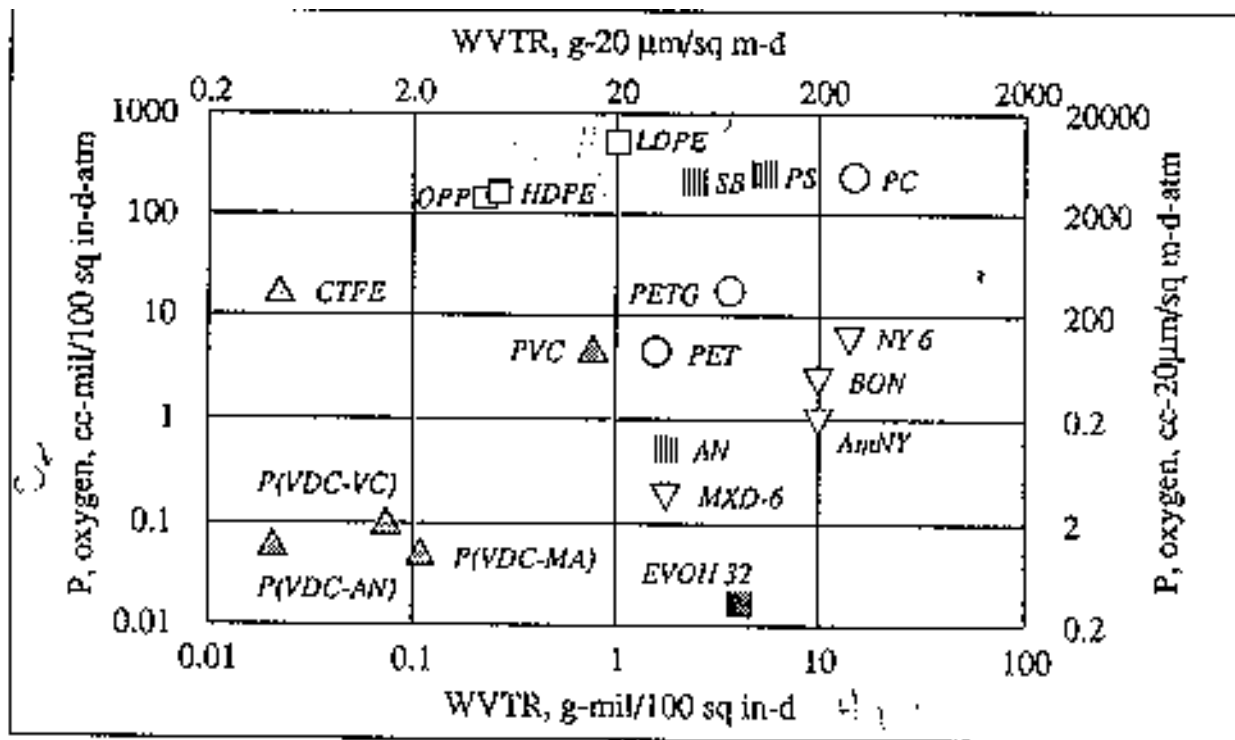


Figure 8.4 - Barrier plastics exhibit a thousand-fold range in water vapor transmission rates and more than a ten thousand-fold range in oxygen barrier. Related polymers are indicated by common symbols. WVTRs are taken at 100°F (38°C) and 90% rh; oxygen permeabilities at 73°F (23°C) and 75% rh. Data are based on manufacturers' literature.

حساب إنفاذية الأغشية متعددة الطبقات لبخار الماء والغازات على التوالي والتوازي:

أ. على التوالي: يوضح شكل (٤٠) ترتيب أغشية التعبئة المتوالية.

مشابه لمعادلات انتقال الحرارة، تحسب النفاذية الكلية ( $B_T$ ) لعدة طبقات على التوالي كالتالي:

$$B_T = \frac{\Delta X_1 + \Delta X_2 + \Delta X_3}{\frac{\Delta X_1}{B_1} + \frac{\Delta X_2}{B_2} + \frac{\Delta X_3}{B_3}}$$

حيث:

$x_i$  سمك الغشاء لطبقة  $i$

$B_i$  إنفاذية طبقة الغشاء  $i$

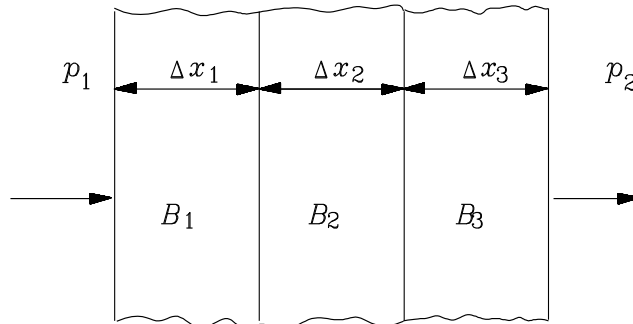
هذه المعادلة صالحة متى كانت مساحة السطح لهذه الأغشية ثابتة، ولكنها لا تنطبق على العبوات ذات الأشكال الإسطوانية و الكروية. كما أن هذه المعادلة قد لا تنطبق على المواد المطلية بطلاء من مواد أخرى مقاومة للرطوبة أو للغاز.

ب. على التوازي: يوضح شكل (٤١) ترتيب أغشية التعبئة المتوازية.

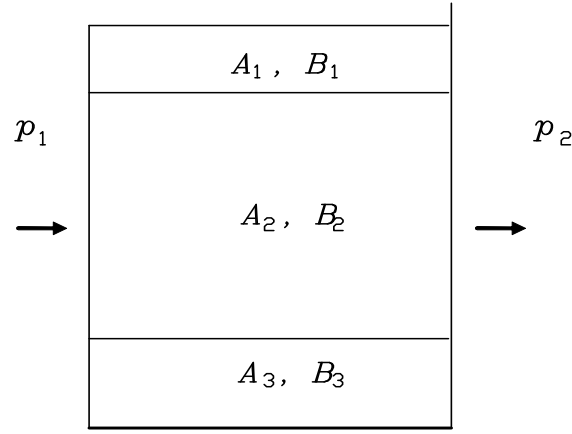
النفاذية الكلية ( $B_T$ ):

$$B_T = \frac{A_1 \cdot B_1 + A_2 \cdot B_2 + A_3 \cdot B_3}{A_1 + A_2 + A_3}$$

حيث  $A$  مساحة كل طبقة. وهذه المعادلة تنطبق في حال ثبات سمك مواد التعبئة.



شكل 40 أغشية العبوة على التوالي

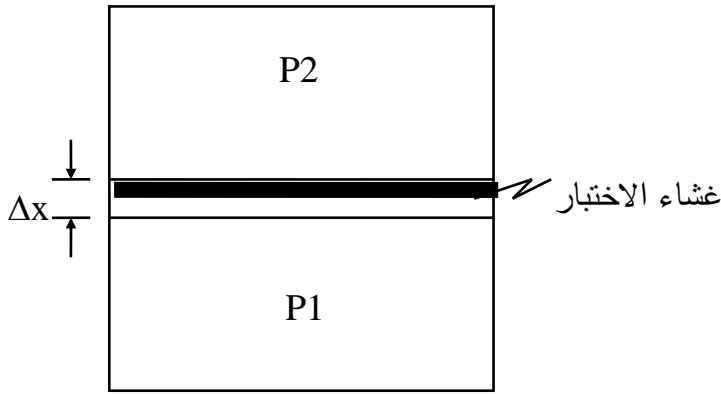


شكل 41 أغشية العبوة على التوازي

### طرق قياس الإنفاذية بفرق الضغط:

لقياس إنفاذية الغاز فإن طريقة فرق الضغط هي الأسهل استخداماً. في طريقة فرق الضغط يوضع غشاء العبوة بين حيزين (شكل ٤٢)، ويتم عمل ضغط ثابت ( $P_1$ ) على جانب واحد من الغشاء، وعلى الجانب الآخر يتم ملاحظة الزيادة في الضغط ( $P_2$ ) بالنسبة للزمن. يعطي التغيير في  $P_2$  لكل وحدة زمنية معامل الإنفاذية (B):

$$T_B = \frac{\Delta P_2}{\Delta t} \cdot \frac{V}{101,325} \cdot \frac{273}{T} \cdot \frac{\Delta X}{A}$$



$$P_1 \gg P_2, \text{ in Pa}$$

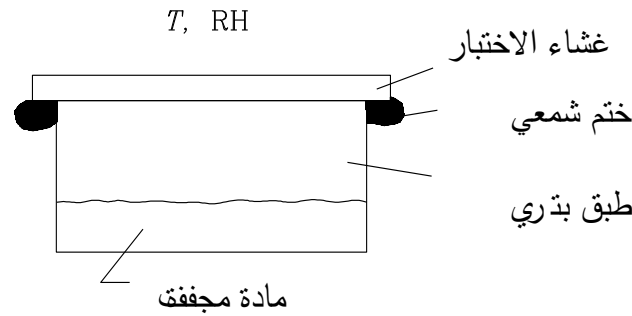
شكل (٤٢). طريقة زيادة الضغط لقياس إنفاذية الغشاء للغازات.

تعتبر الطرق التالية قياسية ومرجعية معتمدة (طريقة المجففات المعدلة ASTM procedure 9A وطريقة الماء المعدلة ASTM procedure 10B) المذكورة في مواصفة ASTM procedure E96-66 والمعتمدة من مرجع (ASTM Book of Standards (1978).

### طرق قياس إنفاذية بخار الماء بالطريقة الوزنية:

يمكن قياس إنفاذية بخار الماء إما بقياس فرق الضغط الجزئي لبخار الماء على جانبي الغشاء كما في الطريقة السابقة. كذلك يمكن قياس فرق الرطوبة النسبية بين جانبي الغشاء البلاستيكي. أما الطرق الأكثر شيوعاً والأسهل في قياس كتلة الماء المفقودة أو المكتسبة من مواد كيميائية أو عينة غذاء. في الطريقة الأخيرة يتم وضع العينة في وعاء صغير مغطى بالغشاء البلاستيكي داخل حاوية ذات رطوبة نسبية ثابتة. وتكون العينة داخل لوعاء ذات رطوبة نسبية متوازنة (نشاط مائي  $\times 100$ ) مختلفة عن المحيط على الأقل بـ ٥٠%. وعليه، سيتم التطرق إلى طريقتين تعتمد على وزن العينة وتحديد مقدار الفقد/الاكتساب الرطوبي خلال فترة زمنية محددة.

١. **طريقة المجفف:** يوضع مجفف ملحي (مثل السليكا جيل تنتجه DRI-RITE) في قاع طبق بتري بقطر ١٤٠ مم (شكل ٤٣). يتم إحكام غلق غشاء التعبئة حول فتحة الطبق، ويوضع الطبق في غرفة التحكم البيئي (رطوبة نسبية ١٠٠% R.H. و درجة الحرارة ٢١°م). يفترض أن الرطوبة النسبية داخل الطبق ٥٠%. يتم وزن طبق العينة دورياً لتحديد مقدار الرطوبة المكتسبة (المتصدة).
٢. **طريقة الماء:** يوضع ماء في قاع طبق بتري بقطر ١٤٠ مم. يتم إحكام غلق غشاء العبوة حول فتحة الطبق، ويوضع الطبق في غرفة التحكم البيئي (رطوبة نسبية ٣٠% R.H. و درجة الحرارة ٢١°م). يفترض أن الرطوبة النسبية داخل الطبق ١٠٠%. يتم وزن طبق العينة دورياً لتحديد مقدار الرطوبة المفقودة من خلال الغشاء. حث يتم تسجيل وزن الطبق كل يوم لمدة أسبوع تقريباً.



شكل 43 طريقة المجفف لقياس إنفاذية غشاء بلاستيكي

في التجارب السابقة يتم استخدام نظام لقياس الرطوبة النسبية، درجة الحرارة، أوعية زجاجية، ميزان حساس، وغرفة تحكم بيئي.

الموضوع التالي عن سلامة البلاستيك ((للقراءة والاستفادة))

لإطلاع فقط.. ((سلامة استخدام الأغلفة البلاستيكية:))

أثبتت النتائج العلمية والصناعية المختلفة أنه لا يمكن ولا يصح الحكم على البلاستيك بصورة عامة بالخطورة أو الأمان لأنه أنواع مختلفة ودرجة خطورته (إن وجدت) مرتبطة بالنوع.

ومما أن يؤكد عليه هنا النوع الذي يدخل في تركيبه الكلور (البولي فينيل كلورايد) أو ما يسمى بالفينيل PVC فهو موضع الجدل الأكبر. فهذا النوع من البلاستيك اتفق على أنه أثناء تصنيعه أحياناً وإذا ما تعرض لحرارة وحرق فإنه يتسبب في وجود مشاكل بيئية وصحية خطيرة، وذلك بإنتاج مركبات ثانوية خطيرة وعالية السمية، ومن أهمها بنزين سداسي الكلور وغازات ومادة الديوكسين Dioxin ومادة الديوكسين هذه تصنف بأنها أحد أكثر الكيماويات سمية، فهي تتكون كمنتج ثانوي في صناعة الكلور بطريقة عرضية لا يمكن تجنبها، وهي مادة لها القدرة على تعطيل جهاز الغدد الصماء (المسؤولة عن إفراز الهرمونات) الخاصة بالنمو والإخصاب والتكاثر عند الإنسان فهي تعطل النمو والتكاثر، وقد تكون مسببه (بقدر من الله) لعدد من أنواع السرطان. وما تعنيه نتائج حرق PVC هو إطلاق هذه المواد الخطيرة للبيئة ومنها للإنسان والحيوان ومع تراكمها في جسم الإنسان تحدث الأعراض. أما أثناء تصنيع وإنتاج PVC فهو يصنع من الوقود الحفري وغاز الكلور القاتل ويتضمن إنتاجه نقل مواد متفجرة وبقايا سامة كما يحتاج تصنيعه إضافة عدد من المضافات تشمل معادن ثقيلة وملونات مضرّة بالصحة عند تبخرها علماً بأن PVC لا يستخدم في أنية وعبوات الطعام وكان PVC يستخدم ولفترات زمنية في تكنولوجيا التغليف ومازال يستخدم في الأنابيب والبلاط واحتياجات المستشفيات والملابس الواقية من المطر وبعض لعب الأطفال.

أما اليوم فقد توجهت مصانع البلاستيك ونظم التغليف والتعليب إلى إبعاده بصورة كبيرة من نظم التغليف وأكياس أو عبوات نقل وحفظ الأغذية والمشروبات. ورغم هذا فما تزال بعض الدول الصناعية يستخدمه إلى يومنا هذا في عبوات وأنظمة تغليف الأطعمة. أما استخداماته الأخرى في الأنابيب والبلاط وغيرها فهناك توجه جاد لدى بعض الدول للتقليل من استخدامه، فمثلاً استطاعت مصانع في ألمانيا (بيلبفد) الوصول إلى نسبة إحلال (بنوع آخر بدلاً من PVC بلغت ٩٠% في مواد البناء في فترة زمنية لا تتعدى العامين فقط. أما في فيينا (النمسا) فقد استطاعوا أن يتخلصوا من PVC في وسائل النقل العامة واستطاعوا استبداله من جميع المقاعد وأدوات المستشفيات بمواد بلاستيكية أخرى. كما أوقفت شركة فولكسواجن الألمانية استخدام PVC في قطع غيار سياراتها، وفي الدينمرك استطاعت إحدى الأسواق المركزية أن تخفض استخدام PVC في خطوط الإنتاج إلى ٩٩%.

والسؤال المهم وهو ماذا لو لم يحرق ولم يسخن PVC؟ هل هو خطر؟ ماذا لو تم تصنيع منتج محتو على PVC هل هناك خطورة من استخدامه؟ إن النظرة العلمية وللوهلة الأولى تقول طالما أننا لم نسخن أو نحرق هذا المنتج فإنه لن ينتج مواد سامة أو خطيرة. و أغلبية المتحمسين لمحاربة هذا النوع من البلاستيك تهدف إلى الحفاظ على البيئة بل أن يؤكد خطورة هذه المادة حتى وإن لم تسخن أو تحرق! وبعيداً عن النظرات أو التهجم الذي تحمله بعض منظمات حماية البيئة المتشددة نسبياً يمكن أن يؤخذ الأمر بشيء من الإدراك الأوسع للمشكلة.

الهجرة.. وحقيقتها

لبعض منظمات صحة البيئة (المتطرفة) مثل السلام الأخضر وغيرها، نظرات في تهجمها على مادة الفينيل PVC بحجة أنه ينتقل ويهاجر (ينزح) تدريجياً من المنتجات البلاستيكية إلى الطعام أو إلى أجسامنا. ولصد مثل هذه الهجمات تقف بعض الجهات التشريعية في الحكومات موقف عدم التسرع في الهجوم أو تحريم أو منع مثل هذه المنتجات بمرتكزات واهية أو دراسات هزيلة. ولتوضيح مثل هذه المواقف لابد من التأكيد بأن الجهات التشريعية للحكومات مثل الحكومة الأمريكية تأخذ مثل هذه الأمور بجدية وتحري علمي قبل اتخاذ قراراتها، فعلى سبيل المثال الموقف من ألعاب الأطفال المصنوعة من مادة الفينيل PVC والتي تصنع من هذه المادة منذ أكثر من ٥٠ سنة وكانت فتحةً علمياً لوقاية الأطفال من الألعاب المعدنية (التي تسبب حوادث الجروح والخدوش عند الأطفال في أعمارهم الأولى) وفي بداية هذه المادة (٥٠ عاماً ماضية) استبشرت مصانع ألعاب الأطفال بهذا الفتح لأنه آمن، وبعد هذه السنوات ونتيجة لفكرة هجرة PVC من البلاستيك إلى جسم الطفل طالبت تلك المنظمات بأن تمتنع المصانع من صناعة ألعاب الأطفال بهذه المادة، مما دفع باللجنة الاستشارية للعلوم والصحة الأمريكية (ACSH) إلى تشكيل لجنة مكونة من ١٧ عالماً لدراسة المشكلة بجميع جوانبها وحقيقة ما يثار عن مادة الفينيل الموجودة في ألعاب الأطفال، و خرج تقرير اللجنة في واشنطن في 24/6/1999 م بتوصية تقول بأنه إذا استمر الطفل يمص ويلعب اللعبة المصنوعة من PVC لمدة عشر سنوات متصلة يومياً فإنه سيصل بعدها إلى مستوى يمكن أن يطلق عليه «لا تأثير». وإذا انتفى أمر الخطورة من PVC وهجرته للجسم تبقى قضية البيئة! كم النسبة؟

إن من أكثر ما يثير «البلبل» في أذهان الناس حول خطورة أي منتج أو مادة كيميائية هي إطلاق جوانب الخطورة عن هذه المادة دون تحقيق أمرين أساسيين: الأول: هو في أي حالة تكون هذه المادة خطرة أو سامة؟ الثاني: كم هي الكمية أو النسبة التي تسبب التسمم أو الخطورة من هذه المادة؟ وما أمر مادة PVC البلاستيكية إلا نموذج لهذا الأمر، فمادة الفينيل PVC خطيرة إذا سخنت أو احترقت، فكم النسبة التي يمكن أن تحدث الخطورة أو التسمم إذا تراكمت في الجسم بعض منتجاتها الثانوية، ثم إذا لم تحرق فهل تعتبر النسبة التي تهاجر أو تنزح منها لجسم الإنسان كافية لإحداث الخطورة والتسمم؟

البلاستيك مادة DEHA : يحوي بعض أنواع البلاستيك المستخدم لتغليف الأغذية مادة تساعد على طراوته وعلى سهولة طيّه وتثبيته عند تغطية الأغذية به بهدف جعل الأغذية بصورة طازجة. هذه المادة تسمى DEHA (Di(2-ethylhexyl)adipate) وأثير جدل حول خطورة هذه المادة وأنها تهاجر (تنزح) من البلاستيك إلى الأغذية.

وعودة إلى أمر النسبة فإن التشريعات لوكالة المجموعات الأوروبية تسمح باستخدام هذه المادة على ألا تزيد نسبة وجودها في الغذاء (إذا هاجرت) عن ١٨ جزءاً في المليون. وقد أثيرت الزوبعة ضد هذه المادة نتيجة لعدد من الدراسات والتي منها الدراسة التي قام بها اتحاد المستهلكين في يونيو عام ١٩٩٨م والتي وجدت أنه من بين ١٩ عينة من جبن التشردين فإن ٧ عينات مغلقة ببلاستيك يحوي DEHA انتقلت المادة إلى داخل الجبن بنسبة 153 جزءاً في المليون (أعلى من النسبة المشروعة) كما أن هناك دراسة دينمركية تشير لمثل هذه النتيجة. مادة DEHA وحقيقة سُميتها تصنف مادة DEHA ضمن قوائم السموم ولكن أين موقعها في

القوائم وكم جرعة السمية منها. فمنظمة (IARC) تضع هذه المادة ضمن القائمة رقم ٣ من السموم ويقع في هذه القائمة نفسها الشاي والقهوة. وهذه القائمة (3) لا تصنف المواد التي بها ضمن المواد التي تسبب السرطان للإنسان.، بينما تضع منظمة (F-PA) مادة DEHA ضمن مجموعة (C) وهي قائمة تصنف محتوياتها أنها تسبب السرطان للإنسان ولكن بجرعات كبيرة جداً، وقد اعتمدت هذه المنظمة في وضع مادة DEHA في القائمة على دراسات على إناث الحيوانات والتي ظهر أنها تسبب لها سرطان الكبد إذا أخذت بجرعات كبيرة. كما وجد أن هذه المادة لها تأثير على انخفاض وزن مواليد الأمهات من الحيوانات التي أخذت جرعات كبيرة من هذه المادة (الجرعة ١٠٨٠ مللجراماً لكل كيلو جراماً من الوزن في اليوم). وللمقارنة فإن هذه الجرعة تساوي حوالي ٧٥ جراماً في اليوم من مادة DEHA للإنسان. وهذا يعني أن على الإنسان أن يأكل حوالي ١٠٠٠ رطل من الجبن المغلف بهذه المادة يومياً حتى يصل إلى هذا الرقم المستحيل. وقد أبدت منظمة EPA حالياً هذه المادة من القائمة. وتبعتها بعض المنظمات الأخرى بإزالة هذه المادة من قوائم الخطر.

يؤكد المدافعون عن مادة DEHA والرافضون لما يشاع عن سميتها بأن مثل هذه الأقوال التي تشاع عنها ما هي إلا قصص تعني تجاهل عشرات السنوات من الدراسات على الجوانب الآمنة لهذه المادة وكونها آمنة للاستخدام، وبناء على تقارير إدارة الأغذية والأدوية الأمريكية FDA ومراجعة مكثفة للدراسات حول هذا النوع من البلاستيك المحتوى على DEHA فإن إدارة الأغذية والأدوية DEHA سمحت باستخدام مادة DEHA للتغليف والتعليب لجميع أنواع الأغذية. ولكن تبقى كمية النفايات التي تحوي PVC وبالتالي DEHA وتأثيرها على البيئة. وهذه مسألة لا بد لكل بلد أو قطر أن يتخذ حيالها قراراته. أما في أمريكا فحسب إحصائية وزارة الزراعة الأمريكية فإنها تؤكد أن نفايات البلاستيك المحتوية على مادة DEHA أقل من أن تشغل البال وأن انطلاق التخوف من خطورة مادة عديد الكربونات كان بسبب دراسة يتيمة لم تنتشر علمياً، كما أنه لا صحة لما يثار من خطورة مادة BPA على الحيوانات ناهيك عن تأثيرها على الإنسان. و تُجمع الجهات الرسمية في كل من أمريكا وبريطانيا واليابان بأن استخدام مادة بولي كربونات (بعديد الكربونات) آمنة صحياً ولا خطر من استخدامها في حفظ الغذاء أو رضاعات الأطفال. مادة عديد الكربونات يستخدم نوع البلاستيك المسمى عديد الكربونات Polycarbonate في أنية وعبوات الطعام والشراب والكاسات والأطباق البلاستيكية وفي رضاعات الأطفال وغير ذلك، فهذه المادة آمنة حسب تشريعات الجهات الحكومية المختلفة في العالم.

ورغم ذلك ظهرت مشكلة مازال يتمسك بها بعض المتطرفين من منظمات حماية البيئة، وكانت بداية ظهور هذا التشكيك عندما نشرت إحدى المجالات الموجهة للمستهلك في أمريكا نتائج دراسة (لم تنتشر في دورية علمية) قام بها رجل يسمى فردريك فان سيل (Frederic Van Sael) في جامعة ميزوري (كولومبيا) تقول الدراسة بأنه تمت تغذية ١٤ فأرة على مادة تسمى ABP (bisphenol A) وبكميات لا تتعدى ٢٠ ميكروجراماً لكل كيلو جرام من الوزن في اليوم لمدة سبعة أيام وبعد ولادة هذه الأمهات لوحظ أن ذكور الفئران المولودة حدث عندها أعراض مختلفة، منها ارتفاع في وزن البروستات وانخفاض في إنتاج الحيوانات المنوية وتأثيرات أخرى في أجهزتها التناسلية. و أطلق على هذه المادة بمزقات الهرمونات، هذه المادة تنتج من البلاستيك

عديد الكربونات ويعتقد أنها تهجر من البلاستيك للغذاء. وبعد ذلك أخذ الأمر بشيء من الحذر وقام عدد ليس قليلاً من الباحثين بإعادة لتجربة فردريك بنفس الطريقة ولكن ليس على ١٤ فأرة إنما على عدد زاد في مجملته عن ٦٠٠ فأرة، وكانت النتائج تنفي مزاعم فردريك وتكذب ما توصل إليه. ورغم نتائج هذه الدراسات إلا أن النتيجة التي طار بها الإعلام هي نتائج دراسة «فردريك» فإن مادة BPA تهجر من أغلفة الكربونات العديدة البلاستيكية إلى الطعام وقد تسبب مشكلات صحية للإنسان. بل إن البعض حملها بمحمل أبعد من ذلك فقال وطالما أن لهذه المادة تأثيراً جنسياً شبيهاً بهرمون الاستروجين (estrogen) فقد يكون لها تأثير مسرطن، ومما هو مؤكد أن مثل هذه الاستنتاجات لا يسندها أي دليل علمي أو دراسة على الحيوانات تثبت أن هذه المادة تسبب السرطان.

حقيقة الهجرة وقبل الحكم على مادة BPA وتأثيرها على الصحة، ما هي حقيقة هجرتها (نزوحها) ابتداءً من رضاعات الأطفال أو أغلفة وعبوات البلاستيك، (من نوع الكربونات العديدة) إلى الطعام؟ لقد قامت كل من إدارة الأغذية والأدوية الأمريكية، ووزارة الزراعة البريطانية وشركة فيشرز عام 1997 م بثلاث دراسات لملاحظة حقيقة الهجرة لهذه المادة من رضاعات الأطفال إلى المادة الغذائية الموجودة بها (سواءً بحليب أو بعصير برتقال أو ماء) وأهم ما جاء من نتائج في هذه الدراسات هو أنه قد تحدث هجرة بسيطة حسب المادة الغذائية تتراوح بين ١,٢ جزء من البليون إلى ١٠٠ جزء في البليون وأنه من الغسل المتكرر في غسالة الصحون لم تلاحظ هجرة للمادة من البلاستيك.

**والنتيجة؟..**

مما هو متوفر من معلومات فإن مادة عديدة الكربونات البلاستيكية (Poly Carbonate) آمنة الاستخدام في تغليف أو تغليب الأغذية ولا صحة لخطورة المادة المهاجرة بنسبة بسيطة جداً (لا تكاد تذكر هذا إذا هاجرت أصلاً) المادة BPA منها إلى الطعام. ويدعم مثل هذا الاستنتاج ما أكدت كل من إدارة الأغذية والأدوية الأمريكية FDA واللجنة الأوروبية بالتأكيد على أنه لا يوجد أي خطورة من استخدام هذا النوع من البلاستيك في كاسات أو أطباق أو عبوات الطعام أو رضاعات الأطفال بل وأكدت هذه الجهات بأن هجرة مادة BPA للطعام لا تحدث في الظروف العادية. (((

**== نهاية جزء العبوات والأغشية البلاستيكية ==**



## ٢-٨ الخصائص الميكانيكية للمنتجات الحيوية

### ٢-٨-١ مقدمة

تلعب الخواص الميكانيكية للمواد الزراعية والغذائية بصفة عامة، دوراً مهماً في عمليات الجني والمناولة والتداول والمعالجة والتصنيع وضبط الجودة وتطوير المنتجات الجديدة. وللثمار فإن غياب المعلومات العلمية لخواصها الميكانيكية الأساسية تؤثر على جودتها عند التصنيع (على سبيل المثال تشوهها وإصابة أنسجتها) إضافة إلى عدم التحكم بصورة علمية على عمليات جنيها ومناولتها ومعالجتها مما يؤثر على ثباتها وجودتها أثناء عمليات التخزين والتسويق. فعلى سبيل المثال، إذا زاد الجهد الميكانيكي الواقع عليها لمستويات تفوق جهد نقطة الخضوع الحيوية فإنها تتعرض للتشوه الدائم. ولضمان الحصول على ظروف الأمثلية لتصميم وتشغيل عديد من عمليات المناولة والمعالجة والتصنيع يتعين معرفة أو إيجاد خواصها الميكانيكية. فعلى سبيل المثال، في عملية تعبئة الثمار يتعين تحديد الحمل الأقصى المسموح به لتفادي التلف الميكانيكي للثمار. كذلك فإن قياس قوى الاختراق لقشرة الثمار قد تساعد في تحديد احتمالات اختراقها بواسطة الحشرات (Messina and Jones, 1990).

تعرف الخصائص الميكانيكية بأنها تلك الخصائص المتعلقة بسلوك المادة تحت تأثير قوة عليها. وهو يمثل الخصائص المستنبطة من منحني القوة ومقدار التشوه. الخصائص الميكانيكية للمواد الغذائية لها أهمية خاصة في التصنيع الغذائي وتحديدها يساعد على تقدير تحمل المنتج لمختلف العمليات التصنيعية والتداول بالإضافة إلى تقبل المستهلك لهذا المنتج عند المضغ. فيفضل المستهلك أن تكون المادة الغذائية ذات قوام مناسب للتناول. أما عند التداول و النقل التصنيعي فيفضل أن يكون المنتج ذو قوام "أقوى". كذلك تساعد الصلابة في تقليل الأضرار التي تحدث للمنتج عند الحصاد والتداول والتصنيع والتخزين. وتهدف اختبارات الخواص الميكانيكية (مثل الكبس) إلى الحصول على نتائج تجريبية يمكن الاستفادة منها في تصميم نظم وعمليات الحصاد والمناولة والتصنيع والتخزين.. والنتائج المتحصل عليها ستحدد وبصفة خاصة العلاقة بين القوى اللازمة لكل وحدة مساحة من سطح المنتج المعرض للكبس ومسافة الكبس (التشوه).

وتعتبر الخواص الميكانيكية أحد المعايير الهامة التي تعبر عن جودة المنتجات الغذائية ( Bourne, 2002). هذه المعايير تشمل المظهر والخواص الطبيعية (اللون، الشكل، المقاس، اللعان)، والنكهة (الطعم والرائحة)، والقيمة التغذوية (كربوهيدرات، دهون، بروتينات، فيتامينات، وألياف). بينما يشمل معيار الخواص الميكانيكية القوام والمتانة و سهولة البلع والمضغ. فعلى سبيل المثال تتفاوت أسعار قطع اللحم المعروضة في الأسواق المركزية في أمريكا من أقل من ثلاثة دولارات إلى عشرين دولاراً (١١ إلى ٧٥ ريالاً). يرجع هذا التفاوت بشكل كبير إلى جودة تلك اللحوم المعروضة وبالذات قوامها والمرتبط أساساً بمدى صلابتها وليونتها.

ومن الأمثلة على أهمية الخواص الميكانيكية للمنتجات الحيوية:

- تصميم آلة الحصاد لقطف الفواكه والخضار حسب الخواص الميكانيكية للثمار .
- تحديد القدرة اللازمة لعمليات القطع للسنابل والحش للنباتات.
- تحديد القدرة اللازمة لتكسير وطحن الحبوب.
- تحديد العبوات ووسائل النقل المناسبة للمنتجات الحيوية حسب تحملها لتلك العمليات.
- إيجاد أفضل طرق كبس الأعلاف حسب مقدار الانضغاطية لتلك البالات.
- تحديد جودة الثمار وقوامها وتأثرها بظروف التخزين من درجة حرارة ورطوبة نسبية ومقدار رص العبوات

كذلك فمعرفة الخواص الميكانيكية للمواد الهندسية ومقاومتها للقوى المؤثرة عليها يساعد كثيراً في تحديد عمليات التغليف والتعبئة. كذلك تساعد في تصميم أبعاد وشكل ومادة العبوات. كما أن قياس الخواص الميكانيكية للمنتجات الحيوية يساعد في التنبؤ بأي أضرار ميكانيكية قد تحدث للمنتج أثناء التداول والتصنيع والتخزين. وتختلف المنتجات الحيوية عن المواد الهندسية في أنها مواد حية ترتبط خواصها الميكانيكية بحيوية المنتج من تنفس وفقد/اكتساب للرطوبة وتأثر ذلك بمرحلة النضج والإصابة وظروف التخزين من درجة حرارة ورطوبة نسبية وفترة زمنية وغيرها.

الكيفية التي يتم فيها تطبيق الجهد على مادة إما أن يكون في حالة ساكنة (جهد أو إجهاد ثابت)، حركية (تغيير الجهد أو الإجهاد)، أو صدمة ( يطبق الجهد ثم يزاح في فترة زمنية قصيرة جداً). الصدمات التي تحدث خلال النقل الميكانيكي تعتبر مصدر للتلف الميكانيكي للأغذية. السلوك عند وجود جهد ساكن يؤثر على الضرر الميكانيكي في حالات التخزين الكمي (بالرص)، الصناديق المرصوصة، وغيرها. وجد أحد الباحثين أن الضرر الذي يحدث لفاكهة نتيجة للصدمات كان ثلاثة أضعاف الضرر الناتج من الحمل الساكن. اختبارات الصدمات تتطلب معدل تشوه عالي جداً في حدود ٩٠٠٠ سم/دقيقة وأعلى. عند اختبار الصدمة للتفاح، وجد أن هناك علاقة خطية بين تجرح الفاكهة ومستوى طاقة الصدمة الممتصة، وبالتالي تأثير ذلك على تصميم العبوات وأجهزة تناول ونقل المواد.

## ٢-٨-٢ تعريفات ومفاهيم هندسية أساسية:

### ١. الجهد الهندسي والحقيقي Stress (S):

يعبر التعريف الهندسي للجهد  $S_E$  عن القوة (F) لكل وحدة مساحة ( $A_0$ ) على المادة المعرضة للكبس:

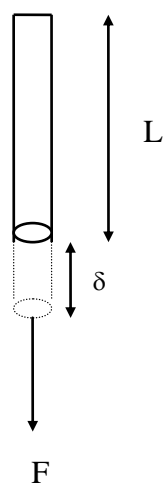
$$S_E = F(t)/A_0$$

بينما هناك تعريف للجهد الحقيقي  $S_T$  يأخذ في الاعتبار التغير الحقيقي لمساحة المقطع العرضي مع الزمن:

$$S_T = F(t)/A(t)$$

### ب. الإجهاد (التشوه) $(\delta)$ :

يعبر عن مقدار التشوه أو التغير في سعة أو شكل الجسم نتيجة للقوة الواقعة عليه. وهو بدون وحدات (يعبر عنه بنسبة) ويعبر عنه بالتغير في نسبة التشوه في الطول أو الحجم إلى ذلك للشكل الأصلي. وهناك ما يعبر عنه بالإجهاد الهندسي والذي يعبر عن التغير في الشكل عند أي زمن بالنسبة للشكل الأصلي (أي عند زمن صفر مثلاً). أما الإجهاد الحقيقي فيمثل التغير المستمر للشكل عندما يكون واقعاً تحت تأثير جهد. الإجهاد الأول يعتبر أسهل في الحسابات والأكثر استخداماً. بينما قد يكون هناك صعوبة في الحصول على قيم ثابتة للتعريف الأخير للإجهاد. فمثلاً يحدث الإجهاد (التشوه) الطولي الهندسي عند عمل قوة (جهد) شد للمادة حيث ينتج عنه تمدد للمادة بمقدار  $\delta$  فيكون التشوه الطولي  $e$ :



$$e_E = \delta/L$$

بعض المواد يكون إجهادها متناسب مع التشوه، وبالتالي:

$$S = Ee$$

حيث  $E$  = معامل المرونة. ويطلق عليه أيضاً معامل يونق (Young's Elasticity).

بينما يمكن تعريف الإجهاد الحقيقي  $e_T$  والذي يعبر بشكل أدق عن المواد الغذائية :

$$e_T = \ln ( L / (L-\delta) )$$

### ج. الإجهاد الحراري:

ويعبر عن التشوه نتيجة لتغير درجة الحرارة ويعبر عنه بالمعادلة التالية:

$$\delta_t = \alpha L ( T - T_0 )$$

حيث

$$T_0 = \text{درجة الحرارة الابتدائية.}$$

$$T = \text{درجة الحرارة}$$

$$\alpha = \text{ثابت يطلق عليه معامل التمدد الحراري.}$$

$$L = \text{الطول.}$$

### د. نسبة بويزن $\nu$ :Poisson's Ratio:

وهي النسبة بين التشوه الجانبي إلى التشوه المحوري لاختبار التشوه في اتجاه واحد. ويتراوح قيمته النظرية

ما بين صفر ( للمادة تامة الكبس) و ٠,٥ ( للمادة الغير منكبسة). وتساوي

$$\text{Poisson's ratio} = \Delta x/x / \Delta L/L \text{ حيث } L \text{ الطول الأصلي بينما } x \text{ عرض العينة.}$$

ويمكن تحديد الخواص الميكانيكية للمنتجات الحيوية بإحداث قوة مسلطة على المنتج ومنها يمكن رسم العلاقة بين القوة الضاغطة مع مقدار التشوه الحاصل في شكل منحني يمكن استنباط العديد من خواصه.

ويمكن تقسيم الخواص الميكانيكية إلى ثلاث مجاميع رئيسية وهي:

- (١) الخواص الميكانيكية الأساسية
- (٢) الخواص اللزجة المرنة
- (٣) خواص التحليل القطاعي للقوام.

تشتمل تجارب الخواص الميكانيكية الأساسية على إيجاد العديد من الخواص الميكانيكية المشتقة من الاختبارات الميكانيكية الأساسية للكبس والقص والاختراق مثل معامل المرونة ومعامل التشوه ومعامل القص ونقطة الخضوع الحيوي والنقطة القصوى ونقطة التصدع. بينما تهدف تجارب خواص اللزوجة المرنة إلى إيجاد علاقات تراخي الجهد والتزحف والاسترجاع ونمذجتها رياضياً. أما خواص التحليل القطاعي للقوام فتشمل صفات النقص والمتانة والتماسك والالتصاق والمرونة والتصمغ والمضغ.

هذه التقسيمات التي اقترحها الحمدان وحسن (١٤٢٢هـ) مبينة في الشكل التالي من مشروع الخواص الطبيعية والميكانيكية للتمور والذي يبين مخطط التجارب لذلك المشروع.

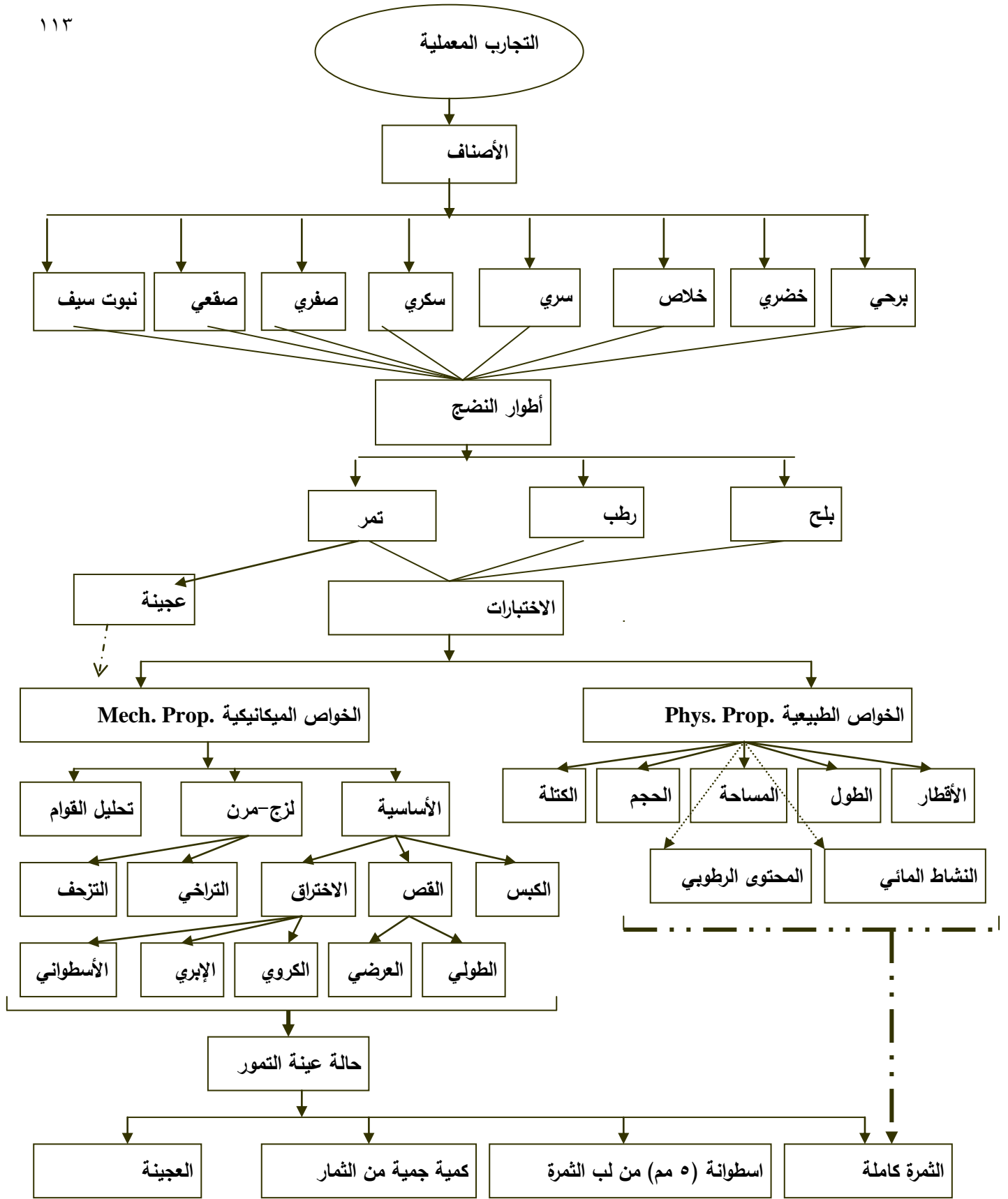
إيجاد الخواص الميكانيكية الأساسية وخواص اللزوجة المرنة وخواص التحليل القطاعي للقوام للتمور ينطوي على فوائد عديدة يمكن تحديد بعض أمثلتها فيما يلي:

- ١- وضع المواصفات القياسية وضبط الجودة للثمار استناداً على خواصها الميكانيكية مما سيقنن قطاع تسويقها محلياً وفي الأسواق العالمية.
- ٢- تصميم نظم وعمليات الجني والمناولة والمعالجة والتصنيع على أسس هندسية راسخة.
- ٣- تصميم نظم ميكانيكية لتعبئة الثمار آلياً، وكذلك نزع النوى من الثمار آلياً.
- ٤- تصميم واختيار النظم الملائمة لإنتاج معجون الفواكه (مثل التمر) على مستوى مستمر.
- ٥- تحديد المستويات القصوى لرص عبوات الثمار.
- ٦- تحديد الضغوط القصوى لرذاذ الماء أثناء عمليات الغسيل.
- ٧- تحديد الخواص الموضوعية لقوام الثمار في مراحل نضجها المختلفة.
- ٨- تحديد الخواص الموضوعية لقوام معاجين الثمار (مثل التمور) مما يساعد في تصميم نظم استخدامها على مستوى المخابز والصناعات الغذائية.
- ٩- تحديد مواصفات عبوات الثمار في البساتين بعد عمليات جنيها.
- ١٠- استخدام الخواص الميكانيكية كمعيار لمدى تأثير ظروف التخزين على جودة الثمار.

وكمثال على خطوات إجراء تجارب قياس الخواص الطبيعية والميكانيكية للتمور في أطوار نضجها المختلفة (بلح (خلال أو بسر) ورطب وتمر) فقد تم التالي:

- ١- قطف الثمار بأيدي مدربة حسب أطوار النضج المحددة ومن ثم الترتيب لنقلها مباشرة من المزرعة إلى معامل هندسة التصنيع الغذائي.
- ٢- استلام الثمار في المعمل حسب الجدول لتحديد لإجراء التجارب لكل صنف.
- ٣- فرز الثمار حسب طور النضج المحدد. ومن ثم استبعاد الثمار المعطوبة والمشوهة والشوائب.
- ٤- إجراء قياس الخواص الطبيعية للثمار (كتلة، حجم، كثافة، أبعاد هندسية (طول وأقطار)، محتوى رطوبي، نشاط مائي لمحصول ثلاث نخلات بعدد ٤٠ ثمرة لكل نخلة أي ١٢٠ ثمرة من كل صنف، أما المساحة السطحية للثمار فقد أقتصر على ١٠ حبات لكل نخلة (حيث تحتاج هذه التجارب إلى جهد مضني في عملية الاستشفاف والقياس للحصول على الدقة اللازمة). تم قياس هذه الخصائص لثلاث مراحل من النضج التي يبين شكل (٣-٦) صورها لصنفي السكري والخضري. أيضاً، تم تكرار قياس تلك الخواص للنوى من نفس الثمار.
- ٥- بالنسبة للتمور والمعدة للعجينة فقد تم:
  - أ- قياس المحتوى الرطوبي والنشاط الابتدائي لللب الثمار.
  - ب- التزديد بالماء على سطح الثمار للتنظيف وتعديل الرطوبة.
  - ت- قياس المحتوى الرطوبي والنشاط المائي.
  - ث- التجفيف عند رطوبة نسبية ودرجة حرارة الغرفة (متوسط ٢٣°م و ٤٦٪) لمدة ٤٨ ساعة. ومن ثم قياس المحتوى الرطوبي والنشاط المائي.
- ٦- قياس مساحات التلامس بين سطح الثمرة واسطوانة مكبس الجهاز وذلك لاختبارات التراخي والتزحف.
- ٧- قياس الخواص الميكانيكية المختلفة.

المخطط العام للتجارب التي تم عملها موضحة في شكل (٤٣) والذي يمثل جميع تجارب الخواص الطبيعية والميكانيكية للتمور.



شكل رقم (٤٣). مخطط عام لتجارب مشروع الخواص الطبيعية والميكانيكية للتمور.

## ٢-٨-٣ أنواع الخواص الميكانيكية

### ٢-٨-٣-١ الخواص الميكانيكية الأساسية:

إذا طبقت قوة خارجية على جسم فإن القوى الجزيئية للجسم تميل إلى مقاومة ما قد تسببه هذه القوة. وتتضغط هذه الجزيئات مع زيادة القوة حتى الوصول إلى التوازن بين القوة الخارجية ومقاومة المادة. عند هذه النقطة يطلق على هذه المرحلة حالة بدء التشوه Strain. عندما تزاح هذه القوة الخارجية بتدرج، فإن بعض الأجسام تبدأ في الرجوع-بشكل كلي أو جزئي- إلى شكلها الابتدائي. وهذا ما يطلق عليه خاصية المرونة للمادة Elasticity. وهذه الخاصية يمكن تمثيلها عند العلق المتوالي للمادة الغذائية ومدى قابليتها للعودة إلى حالتها الأصلية.

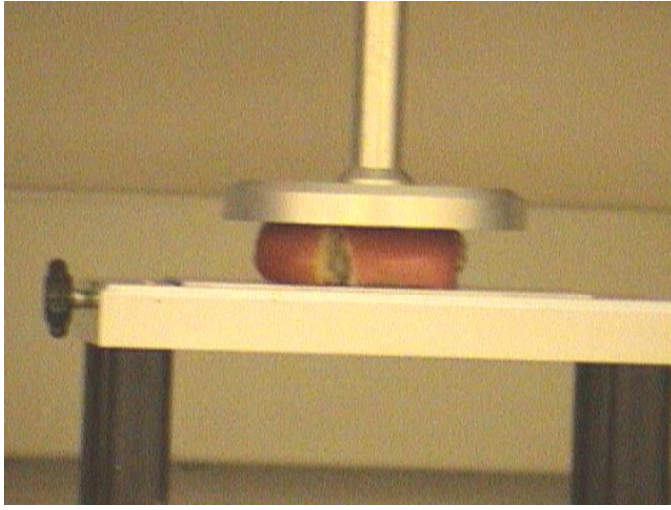
وهناك ثلاثة أنواع شائعة للاختبارات الأساسية:

(١) **الكبس Compression**: وهي موجهة على العينة. ويعتبر سلوك الأغذية نتيجة للكبس من أسهل وأهم

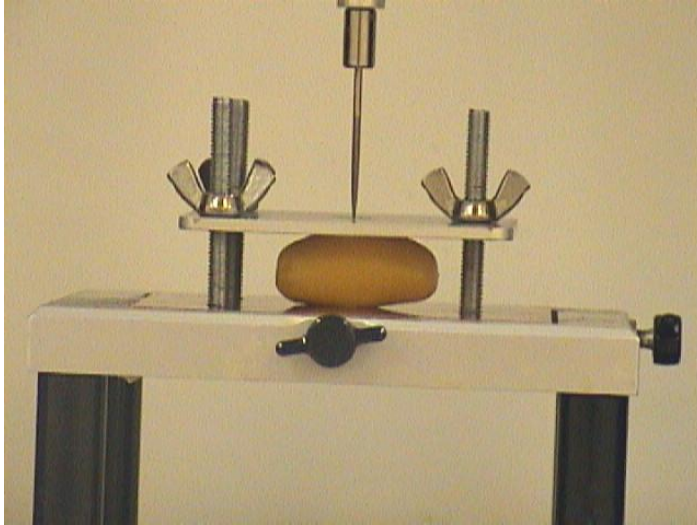
الاختبارات الميكانيكية. نظراً لزيادة انتشار أجهزة الاختبار الشاملة universal testing machine مثل جهاز Instron، والذي يعطي أدوات تعين على تطبيق، إحساس، وتسجيل مقاومة المادة للقوة، يتطلب الاختبار فقط لوحين مستويين متوازيين، أحدهما ثابت (الذي توضع عليه العينة) والآخر متحرك عند معدل معين لإحداث إجهاد (تشوه) على العينة المختبرة. الصورة في شكل (٤٤) توضح أداة كبس عينة بلح بواسطة قرص اسطواني وفي الشكل (٤٥) أداة الاختراق. يمكن استخلاص عدد من الخصائص الميكانيكية من هذا المنحنى. الجزء من الميل للخط المستقيم الابتدائي يمثل معامل المرونة elastic modulus. أيضاً يظهر في الشكل نقطتي استسلام. الأولى تمثل نقطة الاستسلام الحيوية bioyield-point والتي تعبر عن فشل بعض العناصر البنائية في المادة الحيوية المختبرة. نقطة الاستسلام الأخيرة تمثل نقطة الاستسلام أو التمزق rupture yield والتي تعبر عن الفشل الكلي للعينة ولبعض المنتجات يطلق عليها نقطة التصدع الظاهري.

(٢) **الشد Tensile**: وهي موجهة من طرفي العينة. وبشكل عام من الصعوبة عمل قياسات الشد بسبب طبيعة المنتجات الغذائية ولكن يمكن تطبيقها على المكرونة والعبوات مثل شريحة بلاستيكية. من المهم أن يحدث الانقطاع (الانهيار) بين وليس عند الأطراف الممسكة. لذلك يفضل استخدام مواد ذات أطراف مدببة.

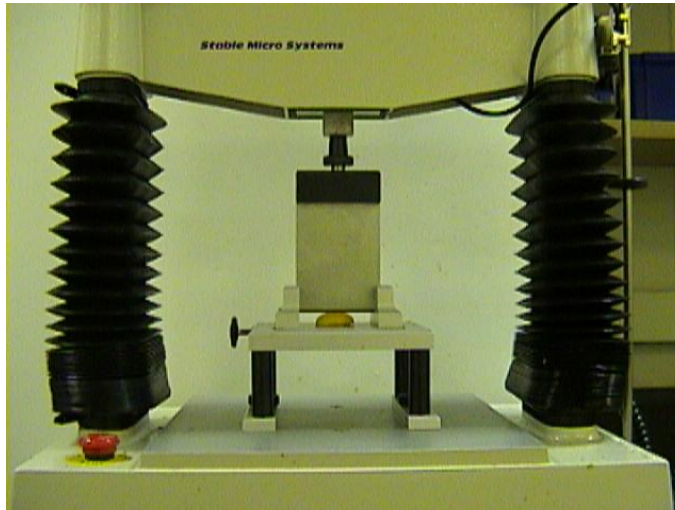
(٣) **القص Shear**: وهي موجهة مماسياً للمادة. وهذا الجهد أساساً كان للموائع. وهو نادر التطبيق على المواد الصلبة، ولذلك يستعاض عنه بالقص كسكين متعامدة على سطح العينة (شكل ٤٦). طورت اختبارات القص وما زالت خصيصاً لبحوث اللحوم. وكما هو معلوم فليس هناك قوى قص صافية للمواد الغذائية.



شكل (٤٤). اختبار الكبس على بلح ١ باستخدام الكابس القرصي بقطر ٧٥ مم.



شكل (٤٥). اختبار الاختراق لبلح البرحي باستخدام الإبرة (P/2N)



شكل (٤٦). اختبار القص لبلح الصفري باستخدام سكينه كرافت ( Craft knife HDP/BS).



يحدث الإجهاد أو التشوه نتيجة للجهود العمودية مثل الكبس والشد، وكذلك جهود القص، وقد تحصل هذه الإجهادات مجتمعة كما يحصل عند انثناء عمود من البلاستيك أو المعدن. في التالي تفصيل للخواص الميكانيكية التي يمكن استنباطها من منحنى القوة والتشوه.

### قياس الخواص الميكانيكية الأساسية

يمكن تحديد العديد من الخصائص الميكانيكية من علاقات (منحنى) القوة والمسافة عند كبس العينة. مثال على استنباط تلك الخصائص موضح في شكل (٤٧) حيث:

(١) معامل المرونة أو معامل يونج (Modulus of elasticity or Young's Modulus): يتم تقديره بحساب ميل الخط المستقيم في المقطع الأول لمنحنى القوة-المسافة و ذلك خلال المرحلة المرنة (ASAE, 2000) أي :

$$S = dF/dx$$

حيث:

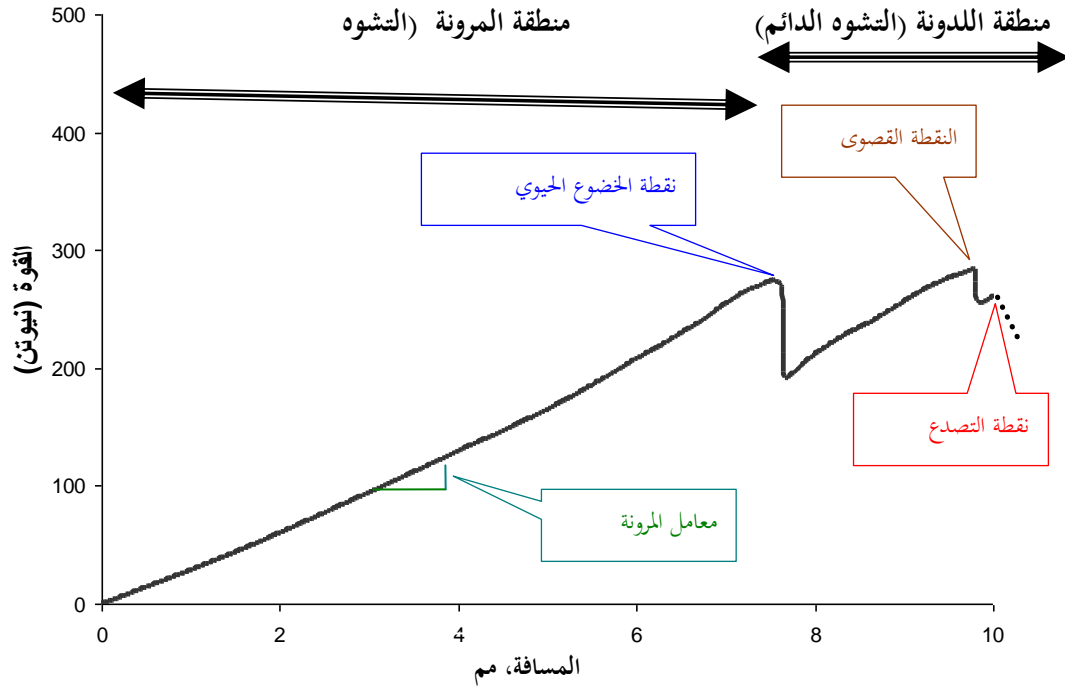
$$S = \text{معامل المرونة (نيوتن/م)}.$$

$$F = \text{قوة الكبس (نيوتن)}$$

$$x = \text{المسافة التي يقطعها الكباس خلال العينة (م)}.$$

عندما تكبس مادة مرنة، فإن علاقة الجهد والإجهاد تكون خطأً مستقيماً من البداية وميل هذا الخط يدعى "معامل يونج للمرونة Young's modulus of elasticity". هناك العديد من الأغذية التي لها نفس السلوك تحت جهود قص صغيرة، وذلك قبل الوصول لما يدعى "حدود المرونة Limit of elasticity". وبشكل عام فإن قيم معامل القص تبلغ ثلاث أضعاف معامل المرونة. ويطلق على هذا الميل معامل المرونة عند الكبس وعند القص يطلق عليه معامل القص Shear modulus بينما عند الاختراق يطلق عليه معامل الاختراق Penetration modulus.

(٢) نقطة الخضوع الحيوي (Biyield point): تم تعريف نقطة الخضوع (أو الاستسلام) حسب المواصفة القياسية (ASTM# E6-89) بأنها الجهد الهندسي المبدئي في اختبار الجهد والتشوه (الانفعال) لمادة، والتي تتعرض لخضوع محدود الذي يحدث عنده زيادة في التشوه ولكن بدون زيادة في الجهد. بينما تحددتها الجمعية الأمريكية للمهندسين الزراعيين (ASAE, 2000) بأنها النقطة التي تكون عندها الزيادة في المسافة مصاحبة لانخفاض أو عدم تغير في القوة. تم استخدام التعريف الأخير لوضوحه ومناسبته للسلوك الميكانيكي للمنتجات الزراعية. أما عندما لا يكون هناك ثبات أو انخفاض للقوة مع التشوه بل زيادة تدريجية حيث يوجد تقعر إلى أعلى في النصف الأول من المنحنى وتقع نحو الأسفل في النصف الثاني من المنحنى فتدعى هذه النقطة بنقطة الانقلاب (Inflection point) كبديل عن نقطة الخضوع الحيوي.



شكل (٤٧). رسم نموذجي يبين بعض الخصائص المستخلصة من منحنى القوة والمسافة.

(٣) النقطة القصوى (Maximum point): وتمثل أعلى قوة حصلت في منحنى القوة والتشوه بينما تمثل مسافتها مسافة النقطة القصوى.

(٤) نقطة التصدع (Rupture point): هي النقطة التي يحصل عندها بداية الانهيار الكامل للعينة حيث لا يحدث استعادة للقوة مع زيادة التشوه. وهو ما يعبر عنه ببداية التهتك (الانهيار) الكامل لأنسجة العينة. وعادة تتضح نقطة التصدع في اختبارات الشد (tension) حيث تمثل هذه النقطة انقطاع العينة المشدودة. أما في اختبارات الكبس (compression) فقد يكون تحديد هذه النقطة غير واضح تماماً كما هو للشد. فنجد أن هذه النقطة تعتمد على عدد من العوامل تشمل مكونات وتركيب المادة الغذائية وكذلك تجانس العينة المختبرة. فمثلاً في اختبارات ثمار الفواكه يجب الأخذ في الاعتبار وجود القشرة والنوى بالإضافة إلى لب الثمرة. وعند نقطة التصدع يتم قياس كل من قوة ومسافة التصدع. الحد الأقصى للجهد التي تستطيع مادة تحمله قبل الانهيار rupture يدعى "القوة Strength" وبالتالي هناك قوة الكبس، قوة الشد، قوة القص.

(٥) لقساوة: تعبر القساوة عن الشغل المبذول لعمل جهد محدد على العينة. هذا الجهد قد يتمثل في الكبس أو الاحتراق أو القص حسب نوع الاختبار المتبع. ويمثل هذا الشغل تكامل القوة للمسافة التي يقطعها الكباس خلال العينة:

$$W = F(x) dx$$

حيث:

$$F(x) = \text{القوة كدالة مع المسافة (نيوتن)}, dx = \text{تغير المسافة مع القوة (م)}.$$

يمكن التعبير عن القساوة عند أي نقطة على المنحنى مثل نقاط الخضوع الحيوي، الانقلاب، القصى، أو التصدع. في هذه الدراسة ولمعظم التجارب فقد تم اختيار نقطة التصدع عند تحديد قساوة العينة بسبب:

- أن مسافة التصدع بشكل عام موحدة بين مختلف الأصناف والتكرارات.

- أنها تمثل الشغل الإجمالي الذي تم عمله حتى نهاية الاختبار.

إلا أنه تم إضافة قيم القساوة لبعض النقاط الأخرى مثل النقطة القصى حسب أهمية ذلك.

### التشوه المؤقت والدائم:

عندما يتغير شكل جسم ما تحت تأثير قوة فإن هذا التغير يمر بعدة مراحل، المرحلة الأولى هي مرحلة المرنة. بزيادة الحمل تصل القوة إلى نقطة يستسلم عندها الجسم. بحيث يستمر التشكيل دون زيادة في القوة. تسمى هذه النقطة في المواد الهندسية بنقطة الاستسلام (Yield point). وتسمى نقطة الاستسلام العضوي (Bioyield point) في المواد الزراعية. تعني هذه النقطة في المواد الهندسية بداية التشكيل الدائم عند زيادة التحميل. وتعني في المواد الزراعية بداية تمزق الخلايا. وتعتبر نقطة الاستسلام خاصة ميكانيكية للمواد تؤخذ في الاعتبار عند التصميم.

من الناحية الريولوجية يمكن أن تتشوه المادة تحت تأثير أي قوى بثلاث طرق: مرنة elastic، لدنة plastic، و لزجة viscous. للجسم المرن المثالي، التشوه (أو الإجهاد) يحدث لحظياً عندما يكون هناك جهد عليه - يتناسب طردياً مع الجهد، ولكن يختفي لحظياً وبشكل كامل عند إزالة الجهد الواقع عليه. للجسم اللدن المثالي، التشوه (أو الإجهاد) لا يحدث حتى الوصول إلى قيمة معينة من الجهد (يدعى جهد الاستسلام yield stress). التشوه يكون دائماً ولا تعود المادة إلى حالتها الابتدائية عند إزالة الجهد الواقع عليها. أما التشوه للجسم اللزج المثالي فيحدث لحظياً مع وجود جهد، ولكن بالمقارنة مع الجسم المرن - يكون التناسب طردياً مع معدل الإجهاد ولا تعود المادة إلى حالتها الابتدائية عند إزالة الجهد الواقع عليها.

### أ. مدى المرونة (التشوه المؤقت): Elasticity

تعرف المرونة على أنها سعة المادة للتشكيل الذي يزول بزوال الحمل (القوة). تمثل المرحلة من التحميل والتشكيل بين نقطة الأصل مرحلة المرونة في المواد الهندسية والحيوية. في كلتا الحالتين تعتبر المرونة خطية (Linear elasticity). وذلك لتميزها عن المرونة غير الخطية (non - linear elasticity) التي تحدث في مواد كالمطاط. في الواقع لا توجد هذه المرحلة إلا في بعض المواد ولتغير صغير جداً في الشكل. في المواد الزراعية فلا توجد هذه المرحلة حيث أنه عند إزالة القوة المسببة في تغيير الشكل لا يعود الشكل إلى الأصل وإنما يترك جزءاً من التشكيل بشكل دائم يطلق على الجزء الذي لم يعود إلى طبيعته (Dp)

بالتشكيل اللدن (Plastic deformation) كما يسمى التغير في الاتجاه الأصلي (De) بالتشكيل المرن (Elastic deformation) كما تسمى النسبة بين التشكيل المرن والتشكيل الكلي بدرجة المرونة (Degree of elasticity):

$$\text{Degree of elasticity} = \frac{D_e}{D_e + D_p}$$

كما يُعرف التخلف الميكانيكي (Mechanical hysteresis) بأنه الطاقة الممتصة بالجسم في دورة تحميل وإزالة تحميل. وتحسب بالمساحة بين منحنى التحميل ومنحنى إزالة التحميل وتستخدم كمقياس لسعة التضاؤل (Damping capacity).

### ب. مدى اللدونة (التشوه الدائم) : Plasticity

تعرف بأنها سعة المادة في التشكيل المستديم. حيث أن التغير في الشكل في هذه المرحلة لا يزول بإزالة الحمل وتبدأ مرحلة اللدونة في المواد الهندسية والزراعية بعد نقطة الاستسلام وتستمر إلى أن يصل الحمل إلى الحد الذي يسبب انهيار المادة تماماً وتسمى هذه النقطة بنقطة الانهيار (Failure Point) وتختلف طبيعة الانهيار في المواد الزراعية عنها في المواد الهندسية.

تسمى هذه النقطة في المواد الزراعية بنقطة التمزق (Rupture point). وقد يحدث التمزق على شكل اختراق (Puncture) للغلاف أو القشرة وقد يحدث في صورة تصدع للمادة ككل أو تشرخ (Cracking). في تصميم الأجهزة والمباني وغيرها لا يسمح بالأحمال التي توصل المادة الهندسية إلى نقطة الاستسلام أو إلى مرحلة اللدونة. كما أن نقطة الاستسلام العضوي تعتبر بداية تهتك التركيب الدقيق للمادة الزراعية (Microstructure) في حين أن نقطة التمزق تعني وصول المادة إلى حالة التهتك الكلي (Macrostructure).

## ٢-٨-٣-٢ ثانياً: الخواص اللزجة المرنة

بسبب وجود عناصر لزجة في بناء معظم الأغذية، يتأثر شكل وموقع منحنيات قوة الكبس-التشوه بشكل كبير بالإجهاد الحاصل. وهذا يرجع إلى حقيقة أن المادة تتراخي (أو تتدفق) عندما تتعرض للكبس، مدى هذا التدفق (السريان) يعتمد على طبيعة هذا العنصر اللزج. كلما قلت لزوجة المادة (أي أقل احتكاك داخلي)، التراخي يكون أسرع وأكثر اكتمالاً، ومن ثم أكثر حساسية لمعدل الإجهاد. بسبب هذه الظاهرة، كلما زاد معدل التشوه تطلب ذلك قوة أعلى لكبس المادة. عادة، تعمل اختبارات الكبس للأغذية عند معدلات تشوه من ٢-٥٠ سم/دقيقة.

وكما عبر سابقاً فيمكن تعريف علم الريولوجي بسلوك المادة تحت تأثير الجهد والإجهاد والزمن. يرجع تأثير الزمن إلى معدل الإجهاد (أو الجهد)، وتأثير الزمن على السلوك عند جهد (أو إجهاد) ثابت، أو تأثير الزمن عند العودة إلى الحالة الابتدائية بعد إزالة الجهد.

## خواص التزحف و تراخي

الخاصيتين الريولوجيتين لهما علاقة بالزمن عند ثبات الجهد أو الإجهاد. فتعرف خاصية التزحف بأنها الزيادة في الإجهاد مع الزمن عندما يعمل جهد ثابت على جسم. نسبة الإجهاد عند أي زمن  $t$  للجهد الثابت يدعى "استجابة التزحف". وتعرف خاصية تراخي الجهد بأنها النقص في الجهد مع الزمن عندما يعمل إجهاد ثابت على جسم. ويسبب هذه الخاصية السريان الداخلي للمادة والتي تتأثر بلزوجة المادة. نسبة اللزوجة إلى معامل القص يدعى "زمن التراخي". وهي كالتالي:

### (أ) تراخي الجهد Stress Relaxation: (أ) اختبار التراخي:

يراعي عند تحديد عمق الكبس (الانفعال أو التشوه) أن يكون في حدود المنطقة المرنة (Elasticity zone). تم تعريفها بأنها النقص في الجهد مع الزمن عندما يعمل إجهاد ثابت على جسم. الشكل التالي يبين منحنى نموذجي لاختبار تراخي الجهد للمواد الزراعية. من المنحنيات يتبين اعتماد معدل التراخي والجهد المتبقي عند أي زمن على القوة الابتدائية والتشوه الحاصل والمعدل الذي بدأت به المادة بالتشوه. كلما زاد التشوه الابتدائي والقوة المستخدمة كلما زاد الجهد المتبقي و سرعة معدل التراخي. بينما بطء معدل التشوه الابتدائي (أو القوة المستخدمة) يبطيء التراخي للمادة. وهذا يرجع إلى حقيقة أن المادة قد بدأت بالتراخي خلال مرحلة تطبيق القوة الابتدائية. لهذا السبب، ينصح بأن يطبق الحمل الابتدائي بأسرع ما يمكن، مع الاحتياط لتجنب الأخطاء التي قد تنتج من سرعة الرسم. يعتبر قياس الزمن اللازم للقوة للتراخي عند نسبة معينة (٦٠% مثلاً) من القيمة الابتدائية طريقة عملية للتعبير عن تراخي الجهد. طريقة أخرى مفضلة ولكن تستلزم وقت أطول هي إتباع معادلة الجسم المرن-اللزج:

$$\tau(t) = \tau_{\text{initial}} e^{-t/\alpha}$$

حيث  $\tau(t)$  الجهد عند زمن  $t$  و  $\alpha$  هي "زمن التراخي" الذي يصف استجابة المادة. تحدد هذه الكمية برسم  $\tau(t) = \tau_{\text{initial}}$  مقابل الزمن  $t$ . ميل الجزء الخطي هو  $1/\alpha$ .

يفيد شكل منحنى جهد التراخي في تحديد النماذج الريولوجية، وكذلك التغيرات في بناء المادة. ولكن يجب ملاحظة أن السريان اللزج قد لا يكون الآلية الوحيدة المسؤولة عن التراخي. فقد يكون التناقص في القوة نتيجة انهيار بنائي للمادة.

### (ب) التزحف Creep: تم تعريفها بأنها الزيادة في الإجهاد مع الزمن عندما يعمل جهد ثابت على جسم.

نسبة الإجهاد عند أي زمن  $t$  للجهد الثابت تدعى "استجابة التزحف". بعكس اختبار جهد التراخي والذي يمكن أداءه بسهولة بواسطة جهاز إنسترون أو أجهزة أخرى مماثلة، يتطلب اختبار التزحف معدات خاصة في جهاز إنسترون للحفاظ على ثبات القوة (الحمل) وتسجيل التغير في التشوه (التزحف) مع الزمن. الشكل التالي يبين منحنى التزحف. هناك ثلاث مناطق رئيسية في هذا المنحنى: (١) منطقة مرنة لحظية حيث الروابط تتمدد بمرونة و يحصل استرداد كامل بعد زوال

الجهد. ٢) منطقة مرنة مشوهة (معاقة) حيث يحدث تكسر للروابط وإصلاحها. ٣) منطقة خطية لسريان نيوتوني حيث أن وحدة السريان تسبق الأخرى حيث أن الزمن لإصلاح الروابط أطول من مدة الإختبار. بالتماثل، تتكون ثلاث مناطق عند إزالة الجهد وحصول الاسترداد (١) الاسترداد اللحظي. ٢) الاسترداد المرن المشوه. ٣) تشوه غير مسترد.

### النموذج الريولوجي للخواص اللزجة المرنة:

يستخدم تراخي الجهد وخاصة اختبارات التزحف لتحديد العناصر الريولوجية الفعالة في المادة ولبناء نماذج تعبر عن السلوك الريولوجي. في أحد الدراسات للبوطة (الأيسكريم) تم استخدام اختبار التزحف لوصف نموذج مرن-لزج ذو ستة عناصر ومكون من نماذج ماكسل و نموذجين لفويت-كلفن موصلة على التوالي كما سوف يوضح نموذجة.

للتعبير عن سلوك خصائص المرونة، اللدونة، و اللزوجة الريولوجية هناك ثلاثة أنواع من النماذج: زنبرك spring، وحدة احتكاك friction element و قدر الدفع dashpot، بالترتيب. يمكن ترتيب هذه النماذج بالتسلسل أو بالتوازي بأي رقم وذلك بغرض تمثيل أن المادة الحقيقية تمثل تجمع من عدة أنواع سلوكية ريولوجية. إذن فالمواد الغذائية تمثل سلوك مجاميع من الصفات المرنة واللزجة، ولذلك يطلق على هذه المواد لزجة-مرنة Viscoelastic حيث أن علاقة الجهد-الإجهاد تعتمد على معدل الإجهاد وعلاقته بالزمن. إذا كانت علاقة الجهد-الإجهاد دالة في الزمن فقط فإن المادة يطلق عليها مواد لزجة-مرنة خطية. أما إذا كانت علاقة الجهد-الإجهاد دالة أيضاً في الجهد فإن المادة يطلق عليها مواد لزجة-مرنة غير خطية. للأسف فإن تطوير معظم النظريات الريولوجية كان للمواد اللزجة-المرنة الخطية بينما معظم المواد الغذائية تعتبر مواد لزجة-مرنة غير خطية. بالتالي يحسن التقريب لسلوك المواد الغذائية عند تحديد صفاتها الريولوجية. تجارب السلوك اللزج-المرن عبارة عن اختبارين هما تراخي الجهد (Stress Relaxation) والتزحف-الاسترجاع (Creep- Recovery) على العينة .

### النموذج الرياضية للخواص اللزجة المرنة:

إذا طبقت قوة خارجية على جسم فإن القوى الجزيئية للجسم تميل إلى مقاومة ما قد تسببه هذه القوة. وتتضغط هذه الجزيئات مع زيادة القوة حتى الوصول إلى التوازن بين القوة الخارجية ومقاومة المادة. عند هذه النقطة يطلق على هذه المرحلة حالة بدء التشوه أو الإنفعال. عندما تتراح هذه القوة الخارجية بتدرج، فإن بعض الأجسام تبدأ في الرجوع-بشكل كلي أو جزئي - إلى شكلها الابتدائي. وهذا ما يطلق عليه خاصية المرونة للمادة Elasticity. وهذه الخاصية يمكن تمثيلها عند العالج المتوالي للمادة الغذائية ومدى قابليتها للعودة إلى حالتها الأصلية.

(أ) تراخي الجهد (Stress Relaxation)

في اختبار تراخي الجهد يتم تعريض العينة بصورة مفاجئة لتشوه محدد ثم يتم قياس الجهد اللازم بدلالة الزمن للحفاظ على هذا التشوه ثابتاً. ويعتبر نموذج ماكسويل العام أحد أفضل النماذج الرياضية للتعبير عن تراخي الجهد للمنتجات الزراعية. يحتوي نموذج ماكسويل العام على عدد لانهائي من عناصر ماكسويل موصلة على التوازي مع بعضها البعض مع وجود زنبرك على التوالي معها ليمثل الجهد عند الاتزان. عنصر ماكسويل عبارة عن زنبرك (spring) ونبيلة توهين (dash pot) موصلتين على التوالي. ويوضح شكل (٤٨) تمثيلاً ميكانيكياً لنموذج ماكسويل العام في حالة احتوائه على ثلاثة من عناصر ماكسويل على التوازي وزنبرك واحد موصل معها على التوالي. يمثل المعامل ( $\eta_i$ ) لزوجة العنصر بينما يمثل ( $E_i$ ) معامل المرونة للعنصر.

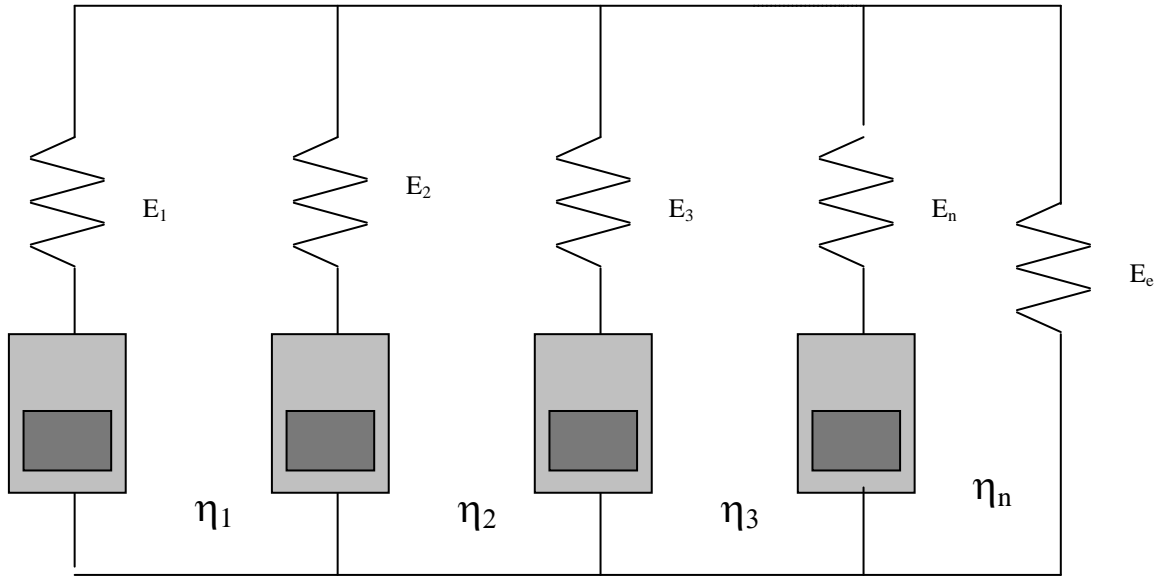
ويعرف تراخي الجهد بأنه النقص في الجهد مع الزمن عندما يعمل تشوه ثابت على جسم. من منحنيات جهد التراخي يتبين اعتماد معدل التراخي والجهد المتبقي عند أي زمن على القوة الابتدائية والتشوه الحاصل والمعدل الذي بدأت به المادة بالتشوه. كلما زاد التشوه الابتدائي والقوة المستخدمة كلما زاد الجهد المتبقي و سرعة معدل التراخي. بينما ببطء معدل التشوه الابتدائي (أو القوة المستخدمة) يبطئ التراخي للمادة. وهذا يرجع إلى حقيقة أن المادة قد بدأت بالتراخي خلال مرحلة تطبيق القوة الابتدائية. لهذا السبب، ينصح بأن يطبق الحمل الابتدائي بأسرع ما يمكن، مع الاحتياط لتجنب الأخطاء التي قد تنتج من سرعة الكبس. يعتبر قياس الزمن اللازم للقوة للتراخي عند نسبة معينة (٦٠٪ مثلاً) من القيمة الابتدائية طريقة عملية للتعبير عن تراخي الجهد. طريقة أخرى مفضلة ولكن تستلزم وقت أطول هي إتباع معادلة الجسم المرن-اللزج:

$$\tau(t) = \tau_{\text{initial}} e^{-t/\alpha}$$

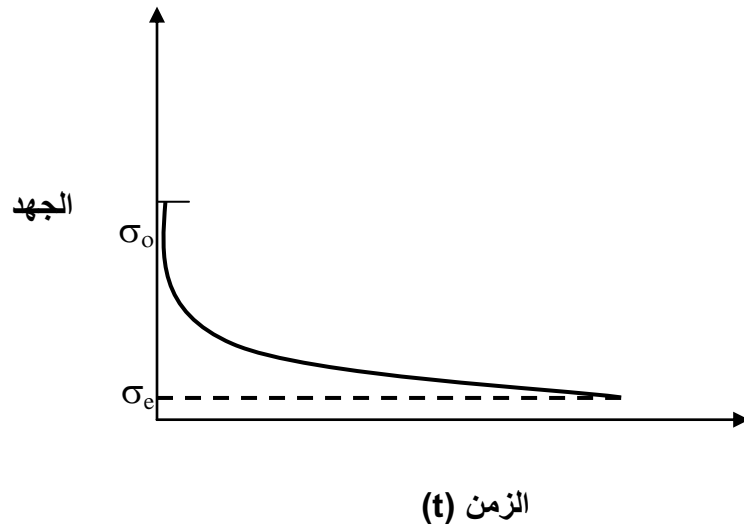
حيث  $\tau(t)$  الجهد عند زمن  $t$  و  $\alpha$  هي " زمن التراخي " الذي يصف استجابة المادة. تحدد هذه الكمية برسم  $\tau(t) = \tau_{\text{initial}}$  مقابل الزمن  $t$ . ميل الجزء الخطي هو  $-\alpha^{-1}$ .

يفيد شكل منحنى جهد التراخي في تحديد النماذج الريولوجية، وكذلك التغيرات في بناء المادة. وليكن يجب ملاحظة أن السريان اللزج قد لا يكون الآلية الوحيدة المسؤولة عن التراخي. فقد يكون التناقص في القوة نتيجة انهيار بنائي للمادة.

ويوضح الشكل (٤٩) منحنى تراخي التشوه الذي يمثل المواد الصلبة اللزجة المرنة.



شكل (٤٨). التمثيل الميكانيكي لنموذج ماكسويل العام.



شكل (٤٩). رد الفعل لتراخي الجهد لمادة صلبة لزجة-مرنة.

التعبير الرياضي لنموذج ماكسويل العام يمكن كتابته كما يلي:

$$(١) \quad \sigma(t) = \sum_{i=1}^n C_i \left( e^{-\left(\frac{t}{\tau_i}\right)} \right) + \sigma_e$$

حيث:

$\sigma$  الجهد عند أي زمن  $(t)$  ، [ك باسكال]



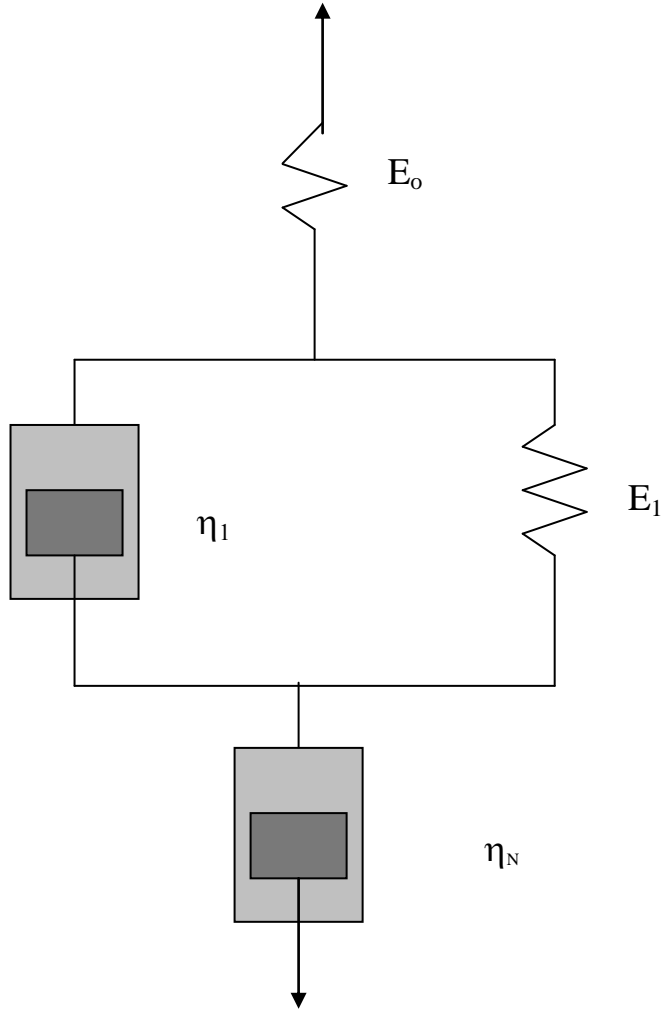
$\sigma_e$	الجهد عند الاتزان، [ك باسكال]
$C_i$	ثوابت تراخي الجهد [ك باسكال]، وتساوي $E_{di}$ ، حيث $\square \square$ الانفعال الابتدائي أو اللحظي [مم/مم] و $E_{di}$ معاملات الاضمحلال (Decay Moduli) بوحدات [ك باسكال]
$\tau_i$	زمن التراخي [ث]، ويعرف بالعلاقة $\tau_i = (\eta_i / E_i)$
$\eta_i$	لزوجة العنصر رقم $i$ ، [ك باسكال.ث]
$E_i$	معامل المرونة للعنصر رقم $i$ ، [ك باسكال]
$t$	الزمن [ث]

### (ب) التزحف و الاسترجاع (Creep and Recovery)

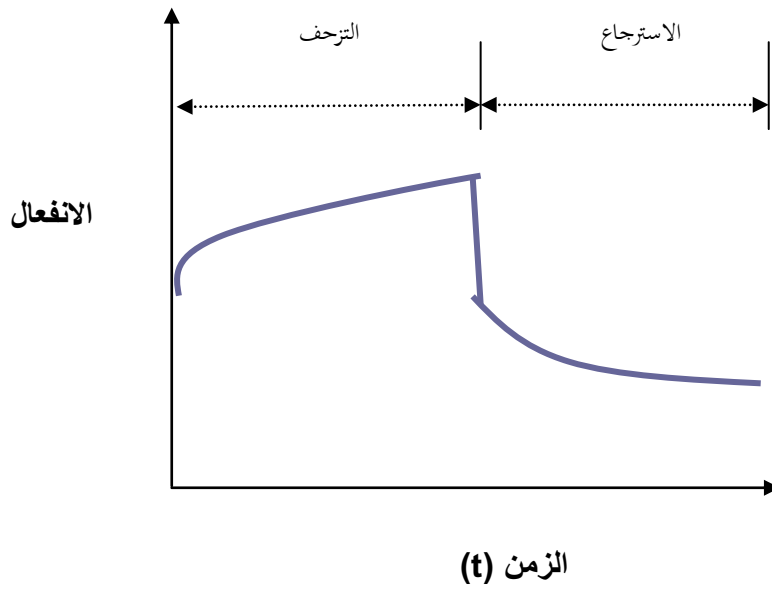
يُعرّف التزحف Creep بأنه الزيادة في التشوه مع الزمن عندما يعمل جهد ثابت على جسم. نسبة التشوه عند أي زمن (t) للجهد الثابت تدعى "استجابة التزحف". بعكس اختبار جهد التراخي والذي يمكن أداءه بسهولة بواسطة جهاز قياس القوام أو أجهزة أخرى مماثلة، يتطلب اختبار التزحف معدات خاصة في جهاز قياس القوام للحفاظ على ثبات القوة (الحمل) وتسجيل التغير في التشوه (التزحف) مع الزمن. هناك ثلاث مناطق رئيسية في هذا المنحنى: (١) منطقة مرنة لحظية حيث الروابط تتمدد بمرونة و يحصل استرداد كامل بعد زوال الجهد. (٢) منطقة مرنة مشوهة (معاقة) حيث يحدث تكسر للروابط وإصلاحها. (٣) منطقة خطية لسريان نيوتوني حيث أن وحدة السريان تسبق الأخرى حيث أن الزمن إصلاح الروابط أطول من مدة الاختبار. بالتمثيل، تتكون ثلاث مناطق عند إزالة الجهد وحصول الاسترداد (١) الاسترداد اللحظي. (٢) الاسترداد المرن المشوه. (٣) تشوه غير مسترد.

بسبب وجود عناصر لزجة في البناء الريولوجي لمعظم الأغذية، يتأثر شكل وموقع منحنيات قوة الكبس-التشوه بشكل كبير بالتشوه الحاصل. وهذا يرجع إلى حقيقة أن المادة تتراخي (أو تتدفق) عندما تتعرض للكبس، مدى هذا التدفق (السريان) يعتمد على طبيعة هذا العنصر اللزج. كلما قلت لزوجة المادة (أي أقل احتكاك داخلي)، التراخي يكون أسرع وأكثر اكتمالا، ومن ثم أكثر حساسية لمعدل التشوه. بسبب هذه الظاهرة، كلما زاد معدل التشوه تطلب ذلك قوة أعلى لكبس المادة.

في اختبارات التزحف يتم تسليط جهد لحظي (مفاجئ) على العينة وقياس الانفعال (التشوه) بدلالة الزمن. ويعتبر نموذج بيرجرز (Burgers Model) هو أكثر النماذج الميكانيكية استخداما للتعبير عن ظاهرة التزحف للمواد اللزجة المرنة. ونموذج بيرجرز هو النموذج الميكانيكي الناتج من وضع نموذجي ماكسويل (زنبرك ونبيلة توهين على التوالي) وكيلفن (زنبرك ونبيلة توهين على التوازي) الميكانيكيين على التوالي مما ينتج عنه ما يسمى بنموذج بيرجرز رباعي العناصر كما هو موضح في الشكل (٥٠). كما يوضح شكل (٥١) منحنى رد الفعل للتزحف والاسترجاع لمادة صلبة لزجة مرنة.



شكل (٥٠). التمثيل الميكانيكي لنموذج بيرجرز ذي العناصر الأربعة.



شكل (٥١). رد الفعل للتزحف والاسترجاع لمادة صلبة لزجة-مرنة.

المعادلة الرياضية التي تعبر عن نموذج بيرجرز ذي العناصر الأربعة يمكن كتابتها كما يلي:

$$(٨) \quad J = J_o + J_1 \left[ 1 - e^{\left( \frac{-t}{\tau_{ret}} \right)} \right] + \left( \frac{1}{\eta_N} \right) t$$

حيث:

J	المطاوعة (Compliance) عند أي زمن t ، [ك باسكال] <sup>-١</sup>
J <sub>0</sub>	المطاوعة اللحظية، [ك باسكال] <sup>-١</sup>
J <sub>1</sub>	المطاوعة المعاقاة، [ك باسكال] <sup>-١</sup>
$\tau_{ret}$	زمن التباطؤ (التعويق Retardation Time) المرتبط بعنصر كلفن.
$\eta_N$	اللزوجية النيوتونية، [ك باسكال.ث]
t	الزمن، [ث]

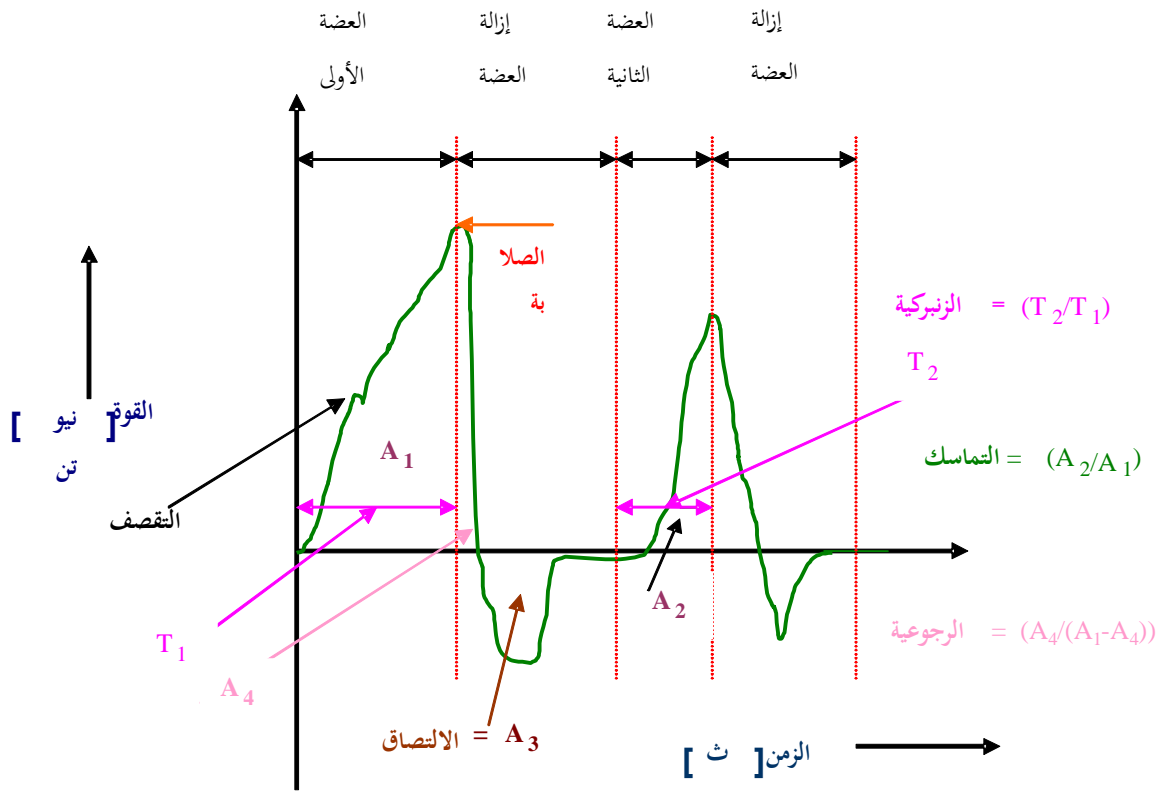
## ٢-٨-٣-٣ ثالثاً: التحليل القطاعي للقوام والتقييم الحسي

### (Texture Profile Analysis)

وجد أن هناك ثلاث مكونات رئيسة يعتمد عليها مدى القبول للمادة الغذائية بالنسبة للمستهلك وهي: القوام، الشكل الظاهري، النكهة (المذاق). لذا يتضح الأهمية القصوى لإيجاد طرق دقيقة لتحديد قوام المواد الغذائية يستفيد منها علماء الأغذية. هدف رئيس لكثير من دراسات القوام هو إيجاد اختبارات ميكانيكية للمواد الغذائية وإمكانية أن تكون بديلة عن التقييم الحسي البشري. منذ أوائل الثلاثينات الميلادية من هذا القرن بدأت عدد من المحاولات لقياس عدد من خواص القوام ميكانيكياً. مثلاً في عام ١٩٥٦ م في معهد MIT تم تصميم فكي إنسان صناعيين موصلة بجهاز لقياس الجهد والإجهاد للمواد الغذائية لمحاكاة جهد الإنسان لعلج و مضغ الطعام. وتتكون الأجهزة الحديثة لقياس القوام أساساً من سطح ثابت توضع عليه العينة ومن ثم يكون هناك عمود (زراع رأسية) متحركة يتحرك إلى أعلى و أسفل بواسطة عدد من التروس وعلى سرعات يمكن التحكم بها (٥-٥٠ سم ادقيقة). هذا الجهاز يعتمد على العناصر الريولوجية الرئيسية: قوة (أو جهد)، مسافة (تشوه أو إجهاد)، و زمن. وهناك حساس قوة لقياس الجهد الواقع على المادة الغذائية يقع عادة فوق أو تحت رأس الكباس. هذه القوى (٥٠-٥٠٠ نيوتن) مع مقدار التشوه أو الزمن يمكن تسجيلها على ورق رسم بياني أو في الأجهزة الحديثة يتم التسجيل رأساً إلى برنامج مخصص في الحاسب الآلي يقوم بكافة الحسابات والرسوم.

يتضمن اختبار التحليل القطاعي للقوام (TPA) كبساً لمرة واحدة لعينة المادة الغذائية في حركة ترددية تحاكي حركة الفك عند مضغ الغذاء. ويوضح شكل (٥٢) أدناه المنحنى القياسي للتحليل القطاعي للقوام مبيناً عليه الخواص الأساسية للتحليل القطاعي للقوام وهي الصلابة والتماسك والزنبركية والالتصاق والتقصيف بينما

الخواص الثانوية (المشتقة) هي المضعغ و التصمغ، إضافة إلى الخاصية الإضافية الرجوعية. يعتمد اختبار القوام الأساسي على دورتين للكبس. يقوم الكابس بعمل الجهد على العينة - عند سرعة معينة - وإحداث تشوه بها حتى مسافة ٧٥% ( أي حتى ٢٥% من القاعدة حيث أن ارتفاع العينة ١٠٠%- عادة ١ سم) ثم تزاح القوة برفع الكباس إلى وضعه الابتدائي. وتسمى هذه الدورة "العضة الأولى". الدورة "أو العضة الثانية" مشابهة للأولى حيث تقيس مدى مرونة المادة (التشوه المؤقت) وكذلك اللدونة (التشوه الدائم). من المنحنيين المتحصل عليهما من هذا الاختبار يمكن حساب العديد من خواص القوام وهي:



شكل (٥٢). المنحنى النموذجي للتحليل القطاعي للقوام.

وفيما يلي تعريف مفصل للخواص الأساسية و الثانوية (المشتقة) للتحليل القطاعي للقوام:

#### (أ) خواص التحليل القطاعي للقوام TPA:

١ التقصف (التهشم) (Brittleness[Fracturability]): التقصف (نيوتن) هو القوة عند أول تحطم للعينة في منحنى تغير القوة مع الزمن. وتمثل هذه الخاصية مدي سهولة تحطم أو تكسر العينة عند حمل كبس متزايد. وبصفة عامة كلما كان التشوه صغيراً عند حمل محدد فإن التماسك يكون

منخفضاً وبالتالي يزداد احتمال تحطم العينة. ومن المعلوم أن المنتجات المرنة لا يحدث بها أي تقصف.

٢ **الصلابة** (Hardness[Firmness]): الصلابة (نيوتن) هي القمة القصوى للقوة خلال عملية الكبس الأولى (العضة الأولى) وهي تمثل القوة اللازمة للحفاظ على تشوه محدد. ويعمل برنامج الحاسب الآلي (Texture Expert Exceed) المدمج مع جهاز قياس الخواص الميكانيكية (Texture Analyzer, Model TA.HDi , Stable Micro Systems, Surrey, England) على إيجاد قيمة الصلابة من منحنى تغير القوة مع الزمن وجدولتها آلياً.

٣ **التماسك** (Cohesiveness) : التماسك (لا وحدات له) هو النسبة بين مساحة القوة الموجبة خلال عملية الكبس الثانية (العضة الثانية) إلى مساحة القوة الموجبة خلال عملية الكبس الأولى (العضة الأولى). ويمثل التماسك قوة الارتباط الداخلية التي تشكل جسم العينة. ويختبر التماسك عادة بدلالة المعاملات الثانوية (المشتقة) وهي التقصف والمضغ والتصمغ.

٤ **الزنبركية (المرونة)** (Elasticity[Springiness]) : ترتبط الزنبركية (لا وحدات لها) بالمسافة (الارتفاع) التي تستعيدها العينة خلال الزمن المنقضي بين نهاية العضة الأولى وبداية العضة الثانية. وهي تمثل المعدل اللازم للعينة المشوهة للرجوع إلى حالتها الأولية بعد إزالة القوة المسببة للتشوه.

٥ **الالتصاق** (Adhesiveness) : يعرف الالتصاق (نيوتن.ث) بالمساحة السالبة للقوة خلال العضة الأولى ويمثل الشغل اللازم للتخلص من القوى الجاذبة بين سطح العينة والمواد الأخرى التي قد تلتصق العينة، أي القوة اللازمة لجذب القرص الأسطواني المستخدم للكبس بعيداً عن العينة. وللعينات التي تتسم بقيم التصاقها العالية وقيم تماسكها المنخفضة عند اختبارها، فإن جزءاً من العينة قد يلتصق بقرص الكبس في رحلة ارتفاعه من العضة الأولى.

٦ **المضغ** (Chewiness): يعرف المضغ (لا وحدات له) بأنه التصمغ×الزنبركية (كذلك يساوي الصلابة×التماسك×الزنبركية) وبالتالي يتأثر بتغير أي من هذه المعاملات. المضغ والطراوة والقساوة تقاس جميعها بدلالة الطاقة اللازمة لمضغ الأغذية الصلبة. وهذه الخواص من أكثر الخواص صعوبة في قياسها بدقة نظراً لأن عملية المضغ تتكون من عمليات كبس وقص وتنقيب وطحن وتمزيق وتقطيع مع تمييع بسوائل الفم عند درجة حرارة الجسم. ويجب ملاحظة أن نفس العينة لا تعطي مضغاً وتصمغاً في آن واحد إلا في حالة تحولها من مادة صلبة إلى مادة شبه صلبة أثناء عملية المضغ الحسي. وبداية فإن مثل هذا التحول لا يمكن إنجازه أثناء التقييم الآلي للتحليل القطاعي للقوام. وبالتالي فمن الخطأ وضع قيم تجريبية لكلي المضغ والتصمغ في نتائج التحليل القطاعي للقوام للمواد الصلبة أو شبه الصلبة. وبصفة عامة من المحبذ عرض قيم المضغ للمواد الصلبة وقيم التصمغ للمواد شبه الصلبة.

٧. **التصمغ (Gumminess):** يعرف التصمغ (لا وحدات له) بأنه الصلابة  $\times$  التماسك. وهو خاصية مرتبطة بالمواد الغذائية شبه الصلبة منخفضة الصلابة وعالية التماسك. وهي القيمة التي تمثل الطاقة اللازمة لتفكيك (تفتيت) العينة شبه الصلبة لحالة تسهل عملية ابتلاعها.

٨. **الرجوعية (لا وحدات لها) (Resilience):** ليست من الخواص الأصلية لتحليل القطاعي للقوام بيد أنه قد تم تطويرها بعد التأمل بعمق أكثر في عملية الاستعادة المرنة لبعض العينات الغذائية. وتعتبر هذه الخاصية مقياساً للكيفية التي تسترجع بها العينة حالتها من عملية التشوه بدلالة السرعة والقوى المؤثرة عليها. ويتم حسابها كنسبة للمساحتين وأولهما المساحة المحسوبة من النقطة التي يرجع فيها قرص الكبس في رحلة العودة من العضة الأولى إلى نقطة تقاطع القوة القصوى مع المحور السيني والمساحة الثانية وهي الناتجة عن العضة الأولى. تضمنت عملية الكبس عضتين (two bites)، حيث يتسنى من المنحنى الناتج عنهما الحصول على

### العلاقة بين التقييم الحسي والموضوعي لقوام المنتجات الحيوية

يعرف قاموس ويبستر قوام المادة بأنه نوعية البناء لمادة ما. طبعاً هذا التعريف قد لا يكون الأنسب لتعريف المواد الغذائية. زامر عرف قوام المواد الغذائية بأنها الخواص للمواد الغذائية التي يمكن حسها بالعين وبالجلد والحواس العضلية في الفم والتي تشمل الخشونة والملاسة وغيرها. هذه الخواص يمكن تحديدها ( سيزنياك و كلين ١٩٦٢ م) في المكونات مثل نسبة الرطوبة و نسبة الدهن، التماسك، السيولة، المرونة، الالتصاق، الهشاشة، العلق، والمضغ. يتم محاولة القياس لهذه الخواص لقوام المواد الغذائية بشكل رئيسي عن طريق تحديد الجهد اللازم ( من الفم) لفصل وبلع هذه المواد. ومن الصعوبة محاولة الربط الدقيق بين هذه الخواص وقوام المادة الغذائية. ولكن يمكن تحليل هذه الخواص المرتبطة بالقوام.

هناك حوالي ٣٥٠ مصطلح يصف جودة المادة الغذائية، حوالي ٢٥% منها يتعلق بقوام المادة مثل: الصلابة - النعومة - الهشاشة - النضج - القسوة - اللصق - التماسك - الخ. هذا بالإضافة إلى الخواص الريولوجية مثل اللدونة - الليونة. ويمكن وصف تلك الخصائص قبل أو أثناء التصنيع أو عند الاستهلاك. فمثلاً تفيد الصلابة في تحديد درجة النضج المناسبة للحصاد وبالتالي تحديد أنسب وقت للحصاد. وكذلك في قابلية المستهلك.

تكمن أهمية تعريف خواص القوام لعمل جسر بين مصطلحات التقييم الحسي المعروفة Sensory terms التي تصف القوام والمبادئ الريولوجية لتأثيرات الجهد والإجهاد والزمن. ولقد أنتق متخصصي التقييم الحسي و تقنيي الغذاء المهتمين بقوام المادة الغذائية على عدد من الخصائص الحسية التي يمكن قياسها بأجهزة تراعي خصوصية وصفات المواد الغذائية.

وتحدد صفات القوام لمادة ما بالخواص الطبيعية والكيميائية للمادة بالإضافة إلى التقييم الحسي الإنساني، حيث أن هناك قياسان رئيسان لتلك الخصائص:

(١) قياس نسبي (شخصي): ويسمى أيضاً تقييم حسي. وتقاس الخصائص بواسطة أشخاص عادة يكونون مدربين على حس معين مثل المضع وقساوة المادة في الفم. طبعاً هذا القياس غير ثابت سواء من شخص لآخر أو حتى عند تكرار التجربة لنفس الشخص!.

(٢) قياس موضوعي: ويطلق عليه تقييم جهازي- بواسطة أجهزة قياس معيارية. ويكون أكثر دقة من القياس النسبي ويتم التخلص من الانحياز الإرادي أو غير الإرادي. ويتم ذلك ب:

١- تحديد الخاصية التي يراد قياسها

٢- ترجمة القياس إلى أرقام

٣- تثبيت أي عوامل أخرى ماعدا التغيير في تلك الخاصية

مع أن القياس الثاني أكثر دقة وثقة وثباتاً إلى إنه يصبح مجرد أرقام لا قيمة لها عند قطاع المستهلكين إذا لم يعاير أو يقابل باختبارات حسية. إذن يترتب على ذلك أهمية "محاكاة" الجهاز أو الآلة لحواس الإنسان باختبارات وعناية فائقة من قبل المحكمين وباستخدام طرق إحصائية علمية. ومن ثم "ترجمة" تلك المواصفات الحسية إلى مواصفات يمكن قياسها بالأجهزة. ولقد طبقت هذه الطريقة لكثير من المواد الغذائية مثل الأجبان والعجائن.

في كثير من العمليات الهندسية يكون هناك تغير للوقام عند تحويل المادة الخام إلى المادة النهائية. ويلاحظ أن جميع المواد الغذائية تكون قابلة للتفاعل الكيماوي، الحيوي، وغير مستقرة طبيعياً. يطمح المهندسون الزراعيون إلى إمكانية توقع الخصائص للمواد الغذائية عند تعريضها لعمليات التصنيع الغذائي والتخزين. مثلاً عند تصنيع البروتين يجب أن نتعرف على المواد المذيبة ( هنا الماء والدهون). وبالتالي على خصائص الترابط الدقيقي (الميكروسكوبي) وتوازن الطاقة عند أسطح الجزيئات المكونة للمادة الغذائية. فإيجاد المسامية وتوزيع أحجام المسامات في المواد الغذائية يساعد في تحديد جودة المادة، تصميم عمليات التصنيع، والتغليف وتأثير ذلك على الخواص الميكانيكية والانضغاط. وهذا يبين أهمية دراسة التركيب الميكروسكوبي تساهم بشكل كبير في السلوك الميكانيكي الذي يتم دراسته بشكل مكثف في الأبحاث الحالية. مثلاً يستخدم السلوك الميكانيكي عند ضغط مادة لتقدير المسامية. القوة اللازمة للاختراق تحتاج إلى ٣٦١٣ نيوتن/م<sup>٢</sup> للتفاح بينما تحتاج إلى ٧١٩١١ نيوتن/م<sup>٢</sup> للبطاطس. ويعتقد أن هذا راجع بشكل كبير لوجود ٢٣% من الهواء ( حجم) في التفاح مقارنة ب ٢% للبطاطس.

## أجهزة قياس الخواص الميكانيكية والعوامل المؤثرة على النتائج:

في الأجهزة الحديثة لقياس القوام، أصبح هناك العديد من الأجهزة والمعدات - بخلاف اختبار الكبس - لعمل العديد من الاختبارات على قوام المواد الغذائية مثل إبرة الاختراق، جهود القص، جهود القطع، الشد، وغيرها. يمكن شراء العديد من هذه المعدات أو الأجهزة مستقلة عن الأخرى ومن ثم يمكن تركيبها على جهاز تحليل قوام الأغذية. تعتبر شركة Instron الرائدة في صنع هذه الأجهزة حتى الآن، إلى أن هناك عدد من الشركات الأخرى أصبحت تنافس هذه الشركة في تصنيع هذه الأجهزة مثل شركات Stable و Floyed وبتكلفة أقل. تتراوح أسعار هذه الأجهزة في الوقت الحالي ما بين ٤٥,٠٠٠ إلى ٢٠٠,٠٠٠ ريال حسب الشركة و قوة الجهاز ( ب Newton) وحساسيته والأجهزة المساعدة الأخرى المطلوبة لعمل اختبارات القوام للمواد الغذائية.

مواصفات العينات والاختبارات التي استخدمها الباحثون في تجارب الخواص الميكانيكية ليست بالضرورة متماثلة. وليس هناك اتفاق بين الباحثين على استخدام طرق قياسية موحدة لمعظم تلك التجارب. ذلك التفاوت يعتمد حسب:

- (١) نوع جهاز الاختبار مثل قوة خلية التحميل، الدقة، وسرعة عمود التحميل والرجوع.
- (٢) الأداة المستخدمة في التجارب: فعند استخدام قرص المكبس مثلاً فيتعين تحديد النوع، الشكل، الأبعاد وغيرها.
- (٣) العينة المختبرة مثل نوع المنتج، حجمه، شكله، أبعاده، مرحلة النضج، الجزء من الثمرة الذي تُجرى عليه التجربة والعمق من العينة.
- (٤) وهناك عوامل أخرى خاصة بالعرض من التجربة
- (٥) خبرة الباحث وتقديره.

في التجارب التي تجرى بالقسم تم استخدام جهاز قياس الخواص الميكانيكية ( TA-HDi Texture Analyzer) موديل HD3128 مصنع من قبل شركة (Stable Micro Systems, Surrey, England). ويعتبر هذا الجهاز من أحدث الأجهزة لقياس الخواص الميكانيكية للمواد الغذائية على مستوى العالم. ملحق بالجهاز العديد من المجسات التي تستخدم في كبس أو اختراق أو قص العينة. أيضاً الجهاز مزود بصندوق (Chamber) للتحكم في درجة حرارة الاختبار وعمل التجارب عند أي مدى (من -٦٠ إلى ٢٠٠ م°). يمكن التحكم في الجهاز عن طريق برنامج حاسب آلي (Texture Expert Exceed, version 2.05) مزود من قبل نفس الشركة. أيضاً يساعد هذا البرنامج في تحليل البيانات ورسم علاقات القوة بالمسافة أو الزمن واستنباط بعض الخصائص الميكانيكية منها.

== هنا انتهى جزء الخواص الميكانيكية للمنتجات الحيوية ==



-٣-

# الخواص الحرارية للمنتجات الحيوية

**Thermal Properties of  
Biological Products**

الخواص الحرارية ذات أهمية بالغة في مختلف عمليات الانتقال الحراري للمنتجات الحيوية. أهم هذه الخواص الحرارة النوعية ( $C_p$ ) ومعامل التوصيل الحراري ( $k$ ) ومعامل الانتشار الحراري ( $\alpha$ ) ومعامل انتقال الحرارة السطحي ( $h$ ). ومما لا شك فيه أن قيام الصناعات الغذائية يتطلب معرفة تامة وبصورة أساسية بالخواص الطبيعية والحرارية للمواد الغذائية حتى يمكن الحفاظ على خصائصه المرغوبة لدى المستهلك والتقليل من تأثيره بالعمليات التصنيعية التي تجرى عليه. إن العمليات التصنيعية التي تُجرى على الأغذية تتطلب معرفة جيدة بخصائص هذه الأغذية و ذلك لإنتاج أغذية بنوعية وصفات ثابتة. وتعتبر هذه الخواص عن عددٍ من المتغيرات التي توضح سلوك الغذاء أثناء العمليات المتكاملة في تصنيع الأغذية. وحيث أن كثيراً من المنتجات الزراعية ذات الأصل الحيوي (النباتي أو الحيواني) تتعرض لأنواع متعددة من العمليات الحرارية (مثل التسخين والتبريد والتجميد والتجفيف والتجفيد) قبل أن تصل إلى المستهلك فإن هذا بلا شك يدل دلالة واضحة على أهمية دراسة الخواص الحرارية لهذه المنتجات قبل أن تجرى عليها العمليات الحرارية المختلفة. هذه الخواص التي تحدد سلوكيات المنتج أثناء العمليات التصنيعية تعتبر قيم ومؤشرات هامة ورئيسة للباحثين والمصممين و لعديد من الأغراض مثل التنبؤ بمعدل التجفيف أو توزيع درجات الحرارة داخل مخاليط الأغذية. كذلك تحديد ظروف التسخين والتبريد و تحديد التصميم الأمثل لمعدات انتقال الحرارة وأجهزة التجفيف والتعقيم وفي تصميم المعاملات الحرارية الملائمة بالإضافة إلى تحديد أزمان و درجات الحرارة فيها. إذن فإن معرفة الخواص الحرارية للمواد الغذائية (مثل الحرارة النوعية ومعامل التوصيل الحراري ومعامل الانتشار الحراري) ذات أهمية بالغة لكونها تشكل عنصراً هندسياً هاماً كنتائج أساسية تعتمد عليها أساليب تصميم الأجهزة والمنشآت وعمليات التصنيع والمعالجة والتحكم.

ومن أهم المعوقات التي تواجه تصميم العمليات الحرارية للمنتجات الغذائية محدودية توافر المعلومات ذات العلاقة بخواصها الحرارية. وبالرغم من إمكانية الحصول على حجم كبير من المعلومات (أساساً نتائج تجريبية) إلا أن حجم نتائج الخواص الحرارية المتطلبة لوصف جميع المنتجات ومكوناتها ومواصفات المنتج وظروف تخزينه ستصبح في الغالب لا نهائية. لذلك يمكن التعبير عن هذه البيانات من خلال التنبؤ بالخواص الحرارية للمكونات في المنتج في صورة معادلات متكاملة.

### ٣-٢ آليات انتقال الحرارة

يُعرّف انتقال الحرارة على أنه حركة الطاقة من المنطقة ذات درجة الحرارة العالية إلى المنطقة ذات درجة الحرارة المنخفضة. ويعتبر الفرق في درجة الحرارة هو العامل المحرك لانتقال الحرارة. وهناك ثلاثة آليات بواسطتها يمكن أن يحدث هذا الانتقال وهي التوصيل ( $Conduction$ ) والحمل ( $Convection$ ) والإشعاع ( $Radiation$ ).

## (أ) انتقال الحرارة بالتوصيل

تنتقل الحرارة عن طريق التوصيل من جسم إلى آخر بواسطة تبادل الطاقة الحركية بين الجزيئات دون إزاحة فعلية لهذه الجزيئات (Heldman and Singh, 1981). وغالباً ما يصف هذا الأسلوب انتقال الحرارة في المنتجات الغذائية الصلبة أثناء العمليات التصنيعية المختلفة.

ويتناسب معدل انتقال الحرارة (q) بالتوصيل مع تدرج الحرارة  $\frac{dT}{dx}$  مضروباً في المساحة التي تنتقل خلالها الحرارة (A)، وتبعاً لذلك فإنه يمكن التعبير عن معدل انتقال الحرارة بالتوصيل في اتجاه واحد، لطبقة واحدة، غير مستديرة (ثابتة المساحة) بواسطة:

$$(1) \quad q = -kA \frac{dT}{dx}$$

حيث:

( T ) درجة الحرارة بوحدة كلفن،

( x ) المسافة بوحدة المتر، والمعامل

( k ) ثابت التناسب ويسمى معامل التوصيل الحراري ووحداته هي واط/متر كلفنز

وتعرف المعادلة رقم (1) بقانون فوريير (Fourier's law) للتوصيل الحراري الذي يعتبر تعميماً

لمعلومات تجريبية وقد اقترحه العالم الفرنسي فوريير عام ١٨٢٢م.

وتؤثر الخواص الأساسية للمادة الصلبة والشكل الهندسي لجسم المادة على كمية التوصيل الحراري،

كما تعتمد المعادلة المستخدمة لحساب كمية التوصيل الحراري على نوعية المحاور المستخدمة في وصف

النظام سواء كانت كارتيزية أم أسطوانية أم كروية.

## (ب) انتقال الحرارة بالحمل

يعتبر انتقال الحرارة بالحمل أكثر تعقيداً من التوصيل الحراري نظراً للكيفية التي يحدث بها الحمل والتي تضم كلاً من التوصيل وحركة المائع. ويحدث انتقال الحرارة بالحمل نتيجة لتبادل الطاقة الحرارية عند تلامس مائع وجسم صلب لهما درجتا حرارة مختلفتان. فإذا افترضنا جداراً ساخناً بشكل رأسي يتلامس مع مائع بارد، فإننا نلاحظ أن المائع الملامس للجدار يسخن بالتوصيل مع مرور الزمن مسبباً انخفاضاً في كثافته، وهنا تنشأ قوة طفو بسبب الفرق في كثافة المائع تعمل على حركة المائع الأخف إلى أعلى وإحلال مائع بارد مكانه، وهكذا تتكرر هذه العملية. وحيث أن حركة المائع تحدث بقوى طبيعية يُسمى هذا النوع من الحمل بالحمل الطبيعي أو الحمل الحر (Natural or Free Convection). ومن أمثلة هذا النوع تلك التي تنشأ من ارتفاع الهواء الساخن من المدفئة المنزلية. أما إذا تم تحريك المائع بمصدر خارجي كالمضخات أو

المراوح فيسمى هذا النوع من انتقال الحرارة بالحمل القسري أو المدفوع (Forced Convection)، وصيغة حساب معدلات انتقال الحرارة بالحمل هي:

$$(٢) \quad q_c = h A (T_s - T_\infty)$$

حيث

$q_c$  = معدل الحرارة المنقولة من السطح إلى المائع المحيط، واط

$A$  = مساحة السطح الملامس للمائع، متر<sup>٢</sup>

$T_s$  = درجة حرارة السطح، كلفن

$T_\infty$  = درجة حرارة المائع البعيد عن السطح غير المتأثر به، كلفن

$h$  = معامل انتقال الحرارة بالحمل أو معامل انتقال الحرارة السطحي، واط/متر<sup>٢</sup> كلفن.

### (ج) انتقال الحرارة بالإشعاع

على عكس انتقال الحرارة بالحمل والتوصيل، لا يتطلب الإشعاع الحراري وجود أي وسط مادي لكي تتبادل الأسطح الحرارة بالإشعاع. وتنتقل الحرارة بالإشعاع على شكل موجات كهرومغناطيسية تتحرك بسرعة الضوء. وتعتمد كمية الطاقة التي يشعها جسم ما على شكل حرارة على درجة حرارة السطح المطلقة وعلى طبيعة هذا السطح، ويمكن التعبير عن معدل انتقال الحرارة بالإشعاع بالمعادلة التالية:

$$(٣) \quad q_r = \sigma A T^4$$

حيث:

$q_r$  = معدل انتقال الحرارة بالإشعاع، واط

$A$  = مساحة السطح، متر<sup>٢</sup>

$\sigma$  = ثابت ستيفان بولتزمان Stefan Boltzmann Constant =  $5,67 \times 10^{-8}$  واط متر<sup>-٢</sup> كلفن<sup>-٤</sup>

### ٣-٣ الخواص الحرارية للمنتجات الحيوية

#### Thermal properties of Biological materials

٣-٣-١ الحرارة النوعية

٣-٣-١-٢ خلفية علمية

الحرارة النوعية هي كمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة لوحدة الكتلة من المنتج لإنجاز تغيير في درجة الحرارة دون حدوث أي تغيير في طور المنتج.

$$C_p = \frac{Q}{m \Delta T} = \frac{Q}{\rho V \Delta T}$$

حيث ( $C_p$ ) الحرارة النوعية للمنتج بوحدة جول كجم<sup>-1</sup>م<sup>-3</sup> (J kg<sup>-1</sup> °C<sup>-1</sup>)، كمية الحرارة المكتسبة أو المفقودة بواسطة المنتج بوحدة جول (Joule)، كتلة المنتج بوحدة كجم (kg)، كثافة المنتج بوحدة كجم متر<sup>-3</sup> (kg m<sup>-3</sup>)، حجم المادة الغذائية بوحدة متر<sup>3</sup> (m<sup>3</sup>)، و ( $\Delta T$ ) متوسط فرق درجة الحرارة بوحدة م° (°C).

والحرارة النوعية دالة لدرجة الحرارة ويمكن توضيح ذلك بالتعبير الرياضي التالي:

$$C_p(T) = \frac{1}{m} \left( \frac{dQ}{dT} \right)$$

$$dQ = m \int_{T_1}^{T_2} C_p(T) dT$$

في حالات درجة الحرارة (٢٠م° إلى ١٠٠م°)، فإن الحرارة النوعية ( $C_p$ ) للمواد الغذائية تظل ثابتة ولا تتغير كثيراً مع درجة الحرارة. أما في الحالات التي تتطلب فيها العمليات الحرارية درجة حرارة عالية، فإنه يجب الأخذ في الاعتبار تغير الحرارة النوعية ( $C_p$ ) مع درجة الحرارة. ويمكن استخدام متوسط الحرارة النوعية باستخدام المعادلة التالية:

$$(C_p)_{avg} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} C_p dT}{T_2 - T_1}$$

وقد تم استعراض قيم الحرارة النوعية المتوسطة لكثير من المواد الغذائية الصلبة والسائلة في العديد من المراجع العلمية.

عندما تكون الحرارة النوعية معطاة، بالتالي:

$$Q = m (C_p)_{avg} (T_2 - T_1)$$

وتعتبر هذه المعادلة صحيحة في حدود درجات الحرارة الشائعة في نظم التصنيع الغذائي المختلفة. تتأثر الحرارة النوعية لأي منتج بعدة عوامل منها : مكونات المنتج ، المحتوى الرطوبي، درجة الحرارة، والضغط. فكلما زاد المحتوى الرطوبي للمنتج تزداد حرارته النوعية. وبصفة عامة، في معظم تطبيقات التصنيع الغذائي، تستخدم الحرارة النوعية عند ضغط ثابت حيث يتم المحافظة على الضغط ثابتاً خلال عمليات التصنيع الغذائي المختلفة. بالنسبة لعمليات التصنيع التي يحدث خلالها تغير في طور المنتج، ومثال ذلك تحول السائل إلى صلب أثناء عملية التجميد، فإنه يفضل أن تستخدم الحرارة النوعية الظاهرية.

### ٣-٣-١-٢ طرق قياس الحرارة النوعية

#### ١. طريقة المخاليط

في هذه الطريقة يتم وضع عينة معلوم كتلتها ودرجة حرارتها داخل مسعر حراري ذو حرارة نوعية معلومة ويحتوي ماءً معلوم وزنه ودرجة حرارته ويتم قياس درجة الحرارة لكل منها قبل وبعد الخلط. شكل (٥٣) يوضح رسم تخطيطي للمسعر. ويمكن تقدير الحرارة النوعية للعينة (المقدار الوحيد المجهول في المعادلة) في هذه الطريقة من معادلة ميزان الحرارة بين الحرارة المكتسبة أو المفقودة من الماء والمسعر وتلك المفقودة أو المكتسبة بواسطة العينة:

$$C_{pc} W_c (T_{c,i} - T_e) + C_{ps} W_s (T_{s,i} - T_e) = C_{pw} W_w (T_e - T_{w,i})$$

أو

$$C_{ps} = \frac{C_{pw} W_w (T_e - T_{w,i}) - C_{pc} W_c (T_{c,i} - T_e)}{W_s (T_{s,i} - T_e)}$$

حيث

$C_{pc}$	الحرارة النوعية لوعاء العينة في المسعر	ك.جول/كجم كلفن
$C_{ps}$	الحرارة النوعية للعينة	ك.جول/كجم كلفن
$C_{pw}$	الحرارة النوعية للماء	ك.جول/كجم كلفن
$W_c$	كتلة وعاء العينة	كجم
$W_s$	كتلة العينة	كجم
$W_w$	كتلة الماء المضاف	كجم
$T_{c,i}$	درجة الحرارة الابتدائية لوعاء العينة	°م
$T_{w,i}$	درجة الحرارة الابتدائية للماء	°م
$T_e$	درجة حرارة التوازن	°م

مثال على تجربة المخاليط لقياس الحرارة النوعية للحبوب :

تم استخدام المسعر ذو الغلاف المفرغ لإيجاد الحرارة النوعية لعينة من الذرة الشامية محتواها الرطوبي ١٠%. تم تسخين وعاء العينة الذي يحتوي على الذرة الشامية إلى درجة حرارة ١٦٤ °ف. وبعد ذلك تم صب ماء عند درجة حرارة ٧٠ °ف في داخل الوعاء. ثم تم قفل غطاء المسعر والانتظار حتى يصل النظام إلى نقطة التوازن. احسب الحرارة النوعية لعينة الذرة الشامية.

**الحل:**

لحساب الحرارة النوعية لعينة الذرة الشامية نستطيع معادلة ميزان الحرارة أدناه :-

$$m_c C_{p_c} [T_{c,i} - T_e] + m_s C_{p_s} [T_{s,i} - T_e] = m_w C_{p_w} [T_e - T_{w,i}] \quad (٥-٣)$$

وبإعادة تنظيم المعادلة أعلاه نحصل على الآتي:

$$C_{p_s} = \frac{m_w C_{p_w} [T_e - T_{w,i}] - m_c C_{p_c} [T_{c,i} - T_e]}{m_s [T_{s,i} - T_e]}$$

حيث:

$$C_{p_c} = \text{الحرارة النوعية لوعاء العينة في المسعر} = ٠,٢٢٦ \text{ (و.ح.أ./رطل.ف.)}$$

$$C_{p_s} = \text{الحرارة النوعية لعينة الذرة الشامية (و.ح.أ./رطل.ف.)}$$

$$C_{p_w} = \text{الحرارة النوعية للماء} = ١ \text{ (و.ح.أ./رطل.ف.)}$$

$$m_c = \text{كتلة وعاء العينة} = ٠,١٢ \text{ (رطل)}$$

$$m_s = \text{كتلة عينة الذرة الشامية} = ٠,١٩٨ \text{ (رطل)}$$

$$m_w = \text{كتلة الماء المضاف} = ٠,٥٦١ \text{ (رطل)}$$

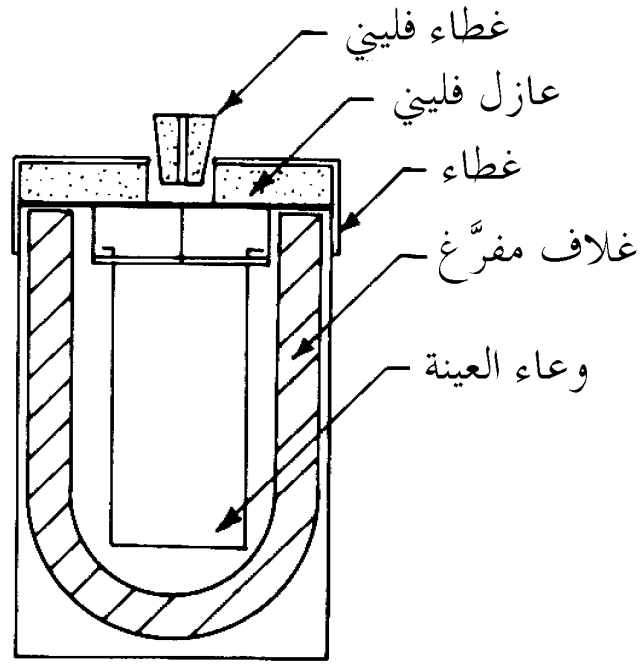
$$T_{c,i} = \text{درجة الحرارة الابتدائية لوعاء العينة} = ١٦٤ \text{ °ف.}$$

$$T_e = \text{درجة حرارة التوازن} = ٨٦ \text{ °ف.}$$

$$T_{w,i} = \text{درجة الحرارة الابتدائية للماء} = ٧٠ \text{ °ف.}$$

وبالتعويض في المعادلة (٦-٣) أعلاه نحصل على الحرارة النوعية لعينة الذرة الشامية ( $C_{p_s}$ )

$$C_{p_s} = ٠,٤٤ \text{ (و.ح.أ./رطل.ف.)}$$



شكل (٥٣): رسم توضيحي للمسعر ذو الغلاف المفرغ.

ويمكن الحصول على الماء المكافئ للنظام في هذه الحالة عن طريق اختبارات المعايير (ASTM

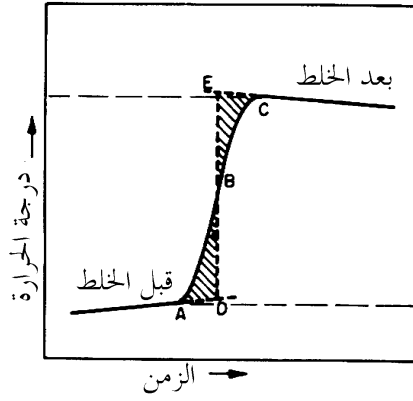
.Designation: C351-54T, 1954)

### مصادر الخطأ في طريقة المخاليط

إن من أهم مصادر الخطأ في هذه الطريقة هي فقد الحرارة من المسعر وفي حال وجود طاقة مضافة بواسطة النشاط الحيوي للمادة الغذائية. لتصحيح هذه الأخطاء أهمية كبيرة عند قياس الحرارة النوعية للمواد ذات السعات الحرارية المنخفضة بالنسبة لوحدة الحجم، وأحياناً عندما تكون السعة الحرارية لوعاء العينة كبيرة إلى حد تساويها مع السعة الحرارية للعينة.

وقد اقترح ستيت وكينيدي (Stitt and Kennedy, 1945) طريقة بيانية لتصحيح هذه الأخطاء (فقد الحرارة) بالاعتماد على منحنى درجات الحرارة مع الزمن للتجربة، وبهذه الطريقة يتم أخذ فرق درجات الحرارة بين حالتها التوازن مساوياً للخط الرأسى (DE) في الشكل (٥٤)، حيث تكون المساحة (ABD) تساوي المساحة (BCE) والتي يمكن تقريبهما برسم خطين متوازيين لمحور الزمن ويقطعان المنحنى في A و C .

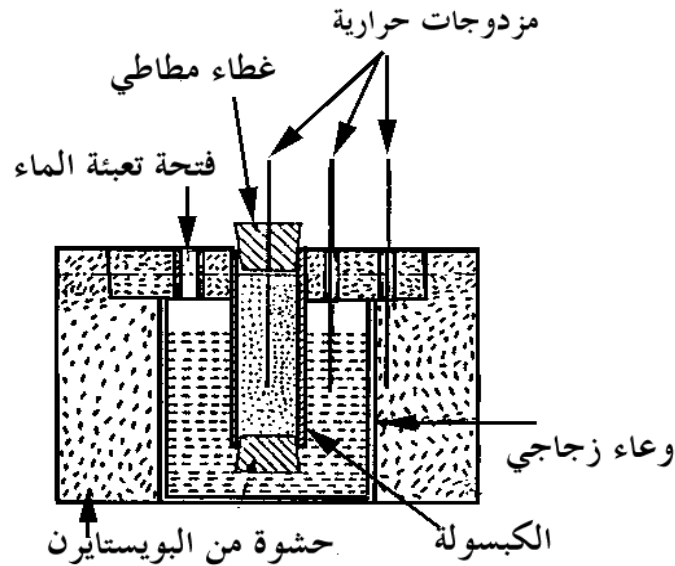




شكل (٥٤): طريقة بيانية لتصحيح الأخطاء في طريقة المخاليط.

في طريقة المخاليط يكون هناك اتصال مباشر بين المنتج الغذائي المراد تقدير الحرارة النوعية له وبين وسط التبادل الحراري، لذا فإنه ليس من السهل تقدير الحرارة النوعية للمواد الغذائية الماصة للرطوبة بهذه الطريقة لأنها تؤدي إلى تعقيد تقييم الحرارة في المحلول الخاص بالمواد الكيميائية الذائبة في المادة الغذائية. وللتغلب على مشكلة طفو العينة فوق سطح الماء داخل المسعر فلا بد أن تكون كثافة وسط التسخين أقل من كثافة العينة، وقد اقترح محسنين (١٩٨٠) حلاً لذلك وذلك عن طريق استخدام محاليل تقل كثافتها عن الماء مثل التولوين (كثافته ٦٨٠ كجم متر<sup>-٣</sup>) والهكسين N-hexane (كثافته ٥١٥ كجم متر<sup>-٣</sup>). ولقد تم تطوير طريقة استخدم فيها Pealzner كبسولة اسطوانية من النحاس بارتفاع ٢,٤٥ سم وبقطر ١,٩ سم وسمك الجدار ٢ مم، وتحتوي الكبسولة على غطاء حلزوني بوجه لمنع تسرب الماء. وفيها توضع العينة في الكبسولة ثم تغمر في الماء داخل المسعر، حيث يحد ذلك من الحاجة تقدير حرارة المحلول، إلا أن هذه التجربة تتطلب إعداداً طويلاً للعينة.

وقد طور Gupta, (1990)، مسعراً كما في الشكل (٥٥) الذي يوضح المخطط التفصيلي له. في هذا الجهاز صنعت كبسولة الاختبار من أنبوب نحاسي قطره الداخلي ٣٠ مم، وسمك جداره ٢ مم، وارتفاعه ١٠٠ مم، وأغلق طرفاه بسدادات مطاطية تحتوى السدادة العلوية على ثقب قطره ٣ مم لإدخال المزبوجة الحرارية لتسجيل درجة حرارة العينة. ويمكن تقدير الحرارة النوعية للمسعر من المعادلة:



شكل (٥٥): مخطط تفصيلي لمسعر بكبسولة (Gupta, 1990).

$$C_{CA} = \frac{C_{cap} \cdot W_{cap} \cdot (T_{wc} - T_{cao} + T_R) - C_w \cdot W_w \cdot (T_{ow} - T_{wc} - T_R)}{W_{CA} \cdot (T_{oc} - T_{wc} - T_R)}$$

حيث:

كيلوجول/كجم كلفن	$C_{CA}$	الحرارة النوعية للمسعر
كيلوجول/كجم كلفن	$C_w$	الحرارة النوعية للماء
كجم	$W_w$	كتلة الماء
كجم	$W_{CA}$	كتلة المسعر
درجة مئوية	$T_{wc}$	درجة الحرارة عند التوازن للماء في المسعر
درجة مئوية	$T_{ow}$	درجة حرارة الماء الابتدائية
درجة مئوية	$T_{oc}$	درجة الحرارة الابتدائية للمسعر
كيلو جول / كجم كلفن	$C_{cap}$	الحرارة النوعية للكبسولة
كجم	$W_{cap}$	كتلة الكبسولة
درجة مئوية	$T_{cao}$	درجة حرارة الكبسولة الابتدائية
$T_R = \frac{T_2 - T_1}{t_2 - t_1} t$	$T_R$	هي $(dT/dt) t$ ويمكن قياسها بالطريقة التالية :

ويمكن حساب الحرارة النوعية للعينة من المعادلة التالية:

$$C_{sa} = \frac{C_w \cdot W_w (T_{ow} - T_{ws} - T_R) + C_{CA} \cdot W_{CA} \cdot (T_{oc} - T_{ws} - T_R) - C_{cap} \cdot W_{cap} \cdot (T_{ws} - T_{cao} + T_R)}{W_{sa} \cdot (T_{ws} - T_{os} + T_R)}$$

حيث:

$C_{sa}$	الحرارة النوعية للعينة
$T_{os}$	درجة حرارة العينة الابتدائية
$T_{ws}$	درجة حرارة العينة عند التوازن

أشار Gupta, (1990) إلى أن هذه الطريقة يمكن استخدامها لقياس الحرارة النوعية أعلى من ١٠٠م درجة مئوية باستخدام زيوت نباتية أو معدنية كوسيط للانتقال الحراري بدلاً عن الماء.

## ٢ . طريقة اللوح الواقية

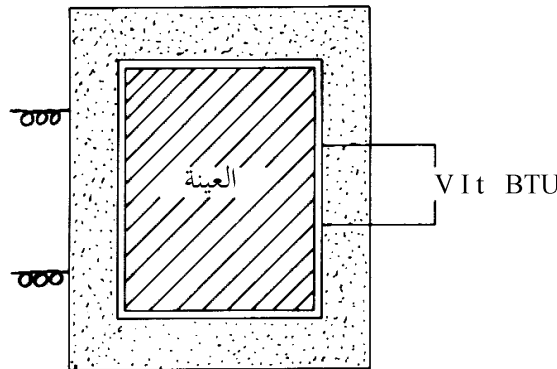
في هذه الطريقة تحاط العينة بألواح تسخن كهربائياً كما هو موضح في شكل (٥٦). ويتم المحافظة على درجة حرارة الألواح الواقية بحيث تكون مساوية لدرجة حرارة العينة والتي يتم تسخينها كذلك كهربائياً ، وعليه لا يكون هناك فقد للحرارة. وفي هذه الحالة، فإن الطاقة الكهربائية المضافة إلى العينة عند زمن (t) تساوي الحرارة المكتسبة بواسطة العينة. ويمكن حساب الحرارة النوعية للعينة من التعبير الرياضي التالي:

$$Q = C_p M \Delta T = V I t$$

أو

$$C = \frac{V I t}{M \Delta T}$$

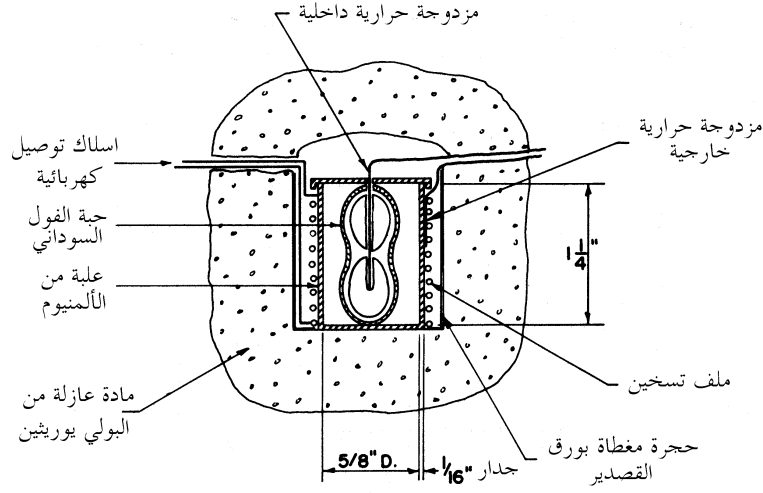
حيث V و I هما على التوالي متوسطي قراءات الجهد والتيار الكهربائيين خلال زمن قدره t ساعة.



شكل (٥٦). رسم توضيحي لطريقة الألواح الواقية لتقدير الحرارة النوعية

اقترح رايت و بورتفيلد (Wright and Porterfield, 1970) مسعراً لقياس الحرارة النوعية لحبة الفول السوداني. ويتكون الجهاز من وعاء صغير من الألمونيوم ملفوف عليه سلك مقاومة حراري ومحاط بمادة

عازلة، شكل (٥٧). وقد وضعت مزدوجة حرارية لقياس درجة حرارة حبة الفول السوداني ومزدوجة حرارية أخرى لقياس درجة حرارة سلك المقاومة الحراري. ويتم تسجيل بيانات درجة الحرارة مع الزمن اللازم لتسخين و تبريد المسعر مع وبدون عينة. حيث يتم إمداد السلك بطاقة كهربائية ثابتة ومن ثم تحسب الحرارة النوعية من معادلة اتزان الطاقة بين الحرارة المضافة من السلك و المكتسبة بواسطة العينة.

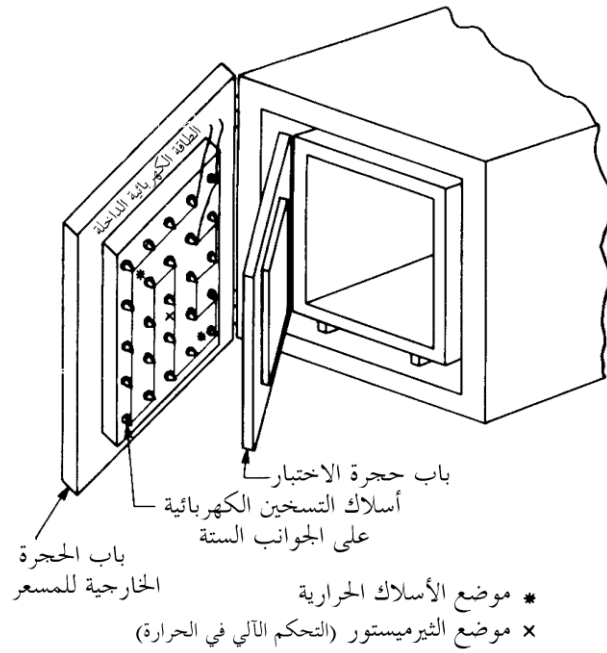


شكل (٥٧). مسعر حراري لقياس الحرارة النوعية لحبة الفول السوداني.

### ٣. طريقة المسعر الأديباتي الزراعي

يوضح الرسم التوضيحي في شكل (٥٨)، المسعر الأديباتي الزراعي المصمم بحيث لا يكون هناك انتقال للحرارة أو لبخار الماء خلال جدران حجرة الاختبار. الظروف الأديباتية يمكن الحصول عليها بواسطة وضع حجرة الاختبار داخل حجرة أخرى.

يتم إضافة كمية معينة من الحرارة بواسطة كوابل تسخين مدفونة في كتلة المادة في وعاء يوضع داخل حجرة الاختبار. ويتم حساب الحرارة النوعية من معادلة ميزان الطاقة. الطاقة الحرارية تؤدي إلى رفع درجة حرارة المادة، درجة حرارة الوعاء الحاوي للمادة، درجة حرارة جدران حجرة الاختبار، ودرجة حرارة الهواء، ودرجة حرارة المسخن، ودرجة حرارة توصيلات الأسلاك الحرارية وضابط الحرارة، وأي أجهزة إضافية في حجرة الاختبار.



شكل (٥٨). المسعر الأديباتي الزراعي

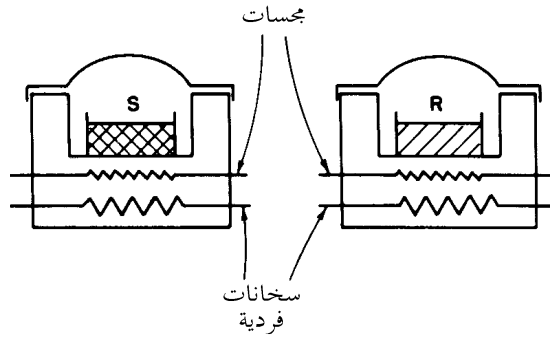
#### ٤. طريقة المسح التفاضلي المسعري DSC

تعتمد هذه الطريقة على قياس السلوك الحراري لعينة صغيرة جداً من منتج من خلال عمليات حرارية (تبريد ثم تسخين) مقارنةً بعينة قياسية. يعطي جهاز التسجيل في النظام رسماً حرارياً يبين أي اكتساب أو فقد للطاقة أثناء عملية المسح بمعدل تسخين محدد وفي حدود درجات حرارة معينة مختارة. وتتناسب المساحة داخل الرسم طردياً مع الطاقة الحرارية الممتصة أو المطرودة بواسطة العينة خلال عملية التسخين أو التبريد. شكل (٥٩) يبين جهاز المسح التفاضلي المسعري حديث في معمل هندسة التصنيع الغذائي.

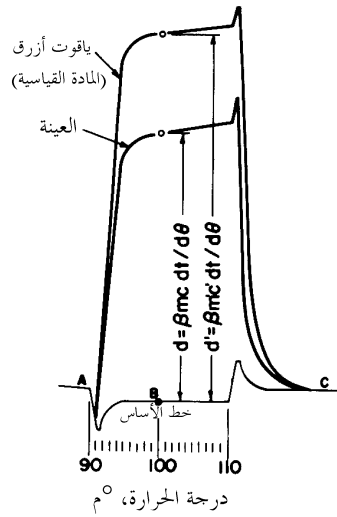


شكل (٥٩). جهاز حديث لقياس السلوك الحراري للمنتجات الحيوية.

يتكون النظام من خليتين أحدهما للعينة المراد قياس حرارتها النوعية (S) و الأخرى للعينة القياسية (R)، ومبرمج لدرجة الحرارة وما يرتبط به من نظام للتسخين أو للتبريد، شكل (٦٠)، ومسجل يحتوى على ورق رسم حراري أو إلى الحاسب الآلي مباشرة لتسجيل درجات الحرارة، شكل (٦١).



شكل (٦٠): رسم توضيحي لمسعر المسح التفاضلي .



شكل (٦١): سجل بيان الحرارة في طريقة مسعر المسح التفاضلي.

ولتقدير الحرارة النوعية للعينة، ترفع درجة حرارتها في خلية مسعر المسح التفاضلي بمعدل تسخين ثابت، حيث يتم حساب معدل تدفق الحرارة إلى العينة وبالتالي يمكن تقدير الحرارة النوعية للعينة من المعادلة التالية:

$$(١٢) \quad C_p = \frac{dQ/dt}{M_s (dT/dt)}$$

حيث

$dQ/dt$  معدل تدفق الحرارة بوحدات جول ثانية<sup>-١</sup> (Joule s<sup>-1</sup>) ،

$dT/dt$  معدل التسخين بوحدات كلفن ثانية<sup>-١</sup> (°K s<sup>-1</sup>) ،

$M_s$  كتلة العينة بوحد الكيلوجرام (kg).

الخط الأساسي أو القاعدي للجهاز - والذي يمثل المسح بدون عينة - يمكن تقديره بعينة قياسية لضبط دقة النتائج. ومن العوامل التي يمكن أن تؤثر على القيم المحسوبة للحرارة النوعية بطريقة المسح التفاضلي المسعري للمواد الحيوية هي حجم العينة، معدل تسخين العينة، وإحكام غلق العينة. يعتمد تقدير الحرارة النوعية بهذه الطريقة على افتراض أن درجة الحرارة متجانسة داخل العينة والوعاء الحاوي لها أثناء الاختبار. وقد أشار تانج وآخرون إلى أن انخفاض معامل الانتشار الحراري للمواد البيولوجية يؤدي إلى بطئ انتقال الحرارة داخل العينة وبالتالي إمكانية حدوث خطأ في القيم المحسوبة للحرارة النوعية.

ارتفاع درجة الحرارة أثناء التجربة في طريقة المسح التفاضلي المسعري يؤدي إلى رفع ضغط البخار في العينة وكنتيجة لذلك تتسرب الرطوبة من المواد الحيوية على هيئة بخار ماء. وامتصاص الحرارة الكامنة أثناء هذه العملية يؤدي إلى خطأ في القياس، لذا فإنه لا بد أن يتم إحكام غلق العبوة ومنع تسربها لإعطاء نتائج جيدة.

ومن مميزات هذا الجهاز (شكل ٥٩) الحصول على السلوك الحراري لمدى واسع جداً من درجة الحرارة (-١٠٠° إلى ٣٠٠°م)، تحديد السلوك الحراري متضمناً الحرارة الكامنة والمحسوسة، وكذلك تحديد نقاط التجمد الابتدائية والحالة الزجاجية. إلا أنه يعيب هذا الجهاز تكلفته العالية (مئات الآلاف من الريالات)، العينة صغيرة جداً وقد لا تكون ممثلة، ها بالإضافة إلى الحاجة لفنيين ذو مستوى تقني عالي لتشغيله والاستفادة من نتائجه.

#### المعادلات التجريبية لحساب الحرارة النوعية

طور سيبل (1982) Siebel، المعادلة التالية لتقدير الحرارة النوعية للأغذية مرتفعة المحتوى الرطوبي وفوق درجة الصفر مئوية:

$$(١٣) \quad C_p = 0.837 + 3.349 X_w$$

كما اقترح ديكسون (Dickerson, 1968) معادلة مشابه للأغذية مرتفعة المحتوى الرطوبي، وقد قام تشوي و اوكوس (1986) Choi and Okos، باقتراح نموذج للأغذية اعتماداً على مكونات الغذاء:

$$(١٤) \quad C_p = \sum_i C_{p_i} X_i^w$$

X<sub>i</sub><sup>w</sup> كسر الكتلة للمكون الغذائي i.

والجدول التالي (٩) المعد من قبل (1986) Choi and Okos، يعرض المعادلات التي يمكن منها تقدير الخواص الحرارية للمكونات الأساسية للأغذية.

جدول (٩) معادلات التنبؤ بالخواص الحرارية للمكونات الأساسية الأغذية السائلة والمعد من قبل Choi and Okos ,(1986)

a. Major food components

Thermal property	Major component	Group model temperature function	Standard error	Standard % error
k(W/m <sup>2</sup> ·°C)	Protein	$k = 1.788\ 1 \times 10^{-1} + 1.195\ 8 \times 10^{-3}T - 2.717\ 8 \times 10^{-6}T^2$	0.012	5.91
	Fat	$k = 1.807\ 1 \times 10^{-1} - 2.760\ 4 \times 10^{-3}T - 1.774\ 9 \times 10^{-7}T^2$	0.0032	1.95
	Carbohydrate	$k = 2.014\ 1 \times 10^{-1} + 1.387\ 4 \times 10^{-3}T - 4.331\ 2 \times 10^{-6}T^2$	0.0134	5.42
	Fiber	$k = 1.833\ 1 \times 10^{-1} + 1.249\ 7 \times 10^{-3}T - 3.168\ 3 \times 10^{-6}T^2$	0.0127	5.55
	Ash	$k = 3.296\ 2 \times 10^{-1} + 1.401\ 1 \times 10^{-3}T - 2.906\ 9 \times 10^{-6}T^2$	0.0083	2.15
α (m <sup>2</sup> /s)	Protein	$\alpha = 6.871\ 4 \times 10^{-2} + 4.757\ 8 \times 10^{-4}T - 1.464\ 6 \times 10^{-6}T^2$	0.0038	4.50
	Fat	$\alpha = 9.877\ 7 \times 10^{-2} - 1.256\ 9 \times 10^{-4}T - 3.828\ 6 \times 10^{-8}T^2$	0.0020	2.15
	Carbohydrate	$\alpha = 8.084\ 2 \times 10^{-2} + 5.305\ 2 \times 10^{-4}T - 2.321\ 8 \times 10^{-6}T^2$	0.0058	5.84
	Fiber	$\alpha = 7.397\ 6 \times 10^{-2} + 5.190\ 2 \times 10^{-4}T - 2.220\ 2 \times 10^{-6}T^2$	0.0026	3.14
	Ash	$\alpha = 1.246\ 1 \times 10^{-1} + 3.732\ 1 \times 10^{-4}T - 1.224\ 4 \times 10^{-6}T^2$	0.0022	1.61
ρ (kg m <sup>3</sup> )	Protein	$\rho = 1.329\ 9 \times 10^3 - 5.184\ 0 \times 10^{-1}T$	39.9501	3.07
	Fat	$\rho = 9.255\ 9 \times 10^2 - 4.175\ 7 \times 10^{-1}T$	4.2554	0.47
	Carbohydrate	$\rho = 1.599\ 1 \times 10^3 - 3.104\ 6 \times 10^{-1}T$	93.1249	5.98
	Fiber	$\rho = 1.311\ 5 \times 10^3 - 3.658\ 9 \times 10^{-1}T$	8.2687	0.64
	Ash	$\rho = 2.423\ 8 \times 10^3 - 2.806\ 3 \times 10^{-1}T$	2.2315	0.09
C <sub>p</sub> (kJ·kg <sup>-1</sup> ·°C)	Protein	$C_p = 2.008\ 2 + 1.208\ 9 \times 10^{-3}T - 1.312\ 9 \times 10^{-6}T^2$	0.1147	5.57
	Fat	$C_p = 1.984\ 2 + 1.473\ 3 \times 10^{-3}T - 4.800\ 8 \times 10^{-6}T^2$	0.0236	1.16
	Carbohydrate	$C_p = 1.548\ 8 + 1.962\ 5 \times 10^{-3}T - 5.939\ 9 \times 10^{-6}T^2$	0.0986	5.96
	Fiber	$C_p = 1.845\ 9 + 1.830\ 6 \times 10^{-3}T - 4.650\ 9 \times 10^{-6}T^2$	0.0293	1.66
	Ash	$C_p = 1.092\ 6 + 1.889\ 6 \times 10^{-3}T - 3.681\ 7 \times 10^{-6}T^2$	0.0296	2.47

b. Water and ice as a function of temperature

	Temperature functions <sup>a</sup>	Standard error	Standard % error
Water	$k_w = 5.710\ 9 \times 10^{-1} + 1.762\ 5 \times 10^{-3}T - 6.703\ 6 \times 10^{-6}T^2$	0.0028	0.45
	$\alpha_w = 1.316\ 8 \times 10^{-1} + 6.247\ 7 \times 10^{-4}T - 2.402\ 2 \times 10^{-6}T^2$	$0.0022 \times 10^{-6}$	1.44
	$\rho_w = 9.971\ 8 \times 10^2 + 3.143\ 9 \times 10^{-3}T - 3.757\ 4 \times 10^{-3}T^2$	2.1044	0.22
	$C_{pw1} = 4.081\ 7 - 5.306\ 2 \times 10^{-3}T + 9.951\ 6 \times 10^{-6}T^2$	0.0988	2.15
	$C_{pw2} = 4.176\ 2 - 9.086\ 4 \times 10^{-5}T + 5.473\ 1 \times 10^{-9}T^2$	0.0159	0.38
Ice	$k_i = 2.219\ 6 - 6.248\ 9 \times 10^{-3}T - 1.015\ 4 \times 10^{-4}T^2$	0.0079	0.79
	$\alpha_i = 1.175\ 6 - 6.083\ 3 \times 10^{-3}T + 9.503\ 7 \times 10^{-5}T^2$	$0.0044 \times 10^{-6}$	0.33
	$\rho_i = 9.168\ 9 \times 10^2 - 1.307\ 1 \times 10^{-1}T$	0.5382	0.06
	$C_{pi} = 2.062\ 3 + 6.076\ 9 \times 10^{-3}T$	0.0014	0.07

<sup>a</sup>C<sub>pw1</sub> = for the temperature range -40 to 0°C.

C<sub>pw2</sub> = for the temperature range 0 to 150°C.

Source: Choi and Okos (1986).



## ٣-٣-٢ معامل التوصيل الحراري

## ٣-٣-٢-١ خلفية علمية:

معامل التوصيل الحراري (الموصلية الحرارية) Thermal Conductivity هو أحد الخصائص الحرارية الأساسية للمواد. ويدخل ضمن معادلات حساب معدل انتقال الحرارة وكذلك لحساب توزيع درجات الحرارة لجسم بدلالة البعد والزمن. معامل التوصيل الحراري "k" لمنهج يعطي قيمة لمعدل انتقال الحرارة الموصلة من خلال وحدة سمك للمادة عند وجود فرق في درجة الحرارة. في نظام الوحدات العالمي يعبر عن k (J / s m °C = w / m °C) من معادلة فوريير:

$$(١٥) \quad q = k A dT / dx$$

حيث q معدل انتقال الحرارة ( J / s = w ) ، ( بافتراض: انتقال مستقر ، k ثابتة ، اتجاه واحد، شكل لוחي ) ، dx سمك المادة ( متر ) ، A مساحة المقطع (متر مربع) ، dT فرق درجة الحرارة °م.

بشكل عام تتراوح قيم k ( w / m °C ) للمواد:

المادة	k
المعادن	٥٠ - ٤٠٠
الهواء	٠,٠٢٥١ ( عند ٢٠ °م )
المواد العازلة	٠,٠٣٥ - ٠,١٧٣
الماء (سائل)	٠,٥٩٧ ( عند ٢٠ °م )
الماء (صلب)	٢,٢٢ ( عند ٠ °م )
المواد الغذائية	٠,٠٣٧ - ٠,٦٨٩ (حسب المكونات والتركيب البنائي)

ويلاحظ أن قيم معامل التوصيل الحراري لمعظم المواد الغذائية ذات المحتوى الرطوبي العالي يقارب قيمها للماء. بالإضافة إلى إمكانية الحصول على تلك القيم من جداول ، يمكن أيضاً التعبير عنها من معادلات تجريبية أو في برامج حاسوبية متخصصة.

ويعتبر معامل التوصيل الحراري خاصية مهمة عند دراسة العمليات الحرارية المختلفة مثل التسخين والتبريد والتجميد للمواد الغذائية. وقد أوضح ميخيف (Mikheyev, 1968) أن معامل التوصيل الحراري يختلف باختلاف المادة ويعتمد في ذلك على تركيب هذه المادة وكثافتها ومحتواها الرطوبي والضغط ودرجة الحرارة. ومن هذا تتضح أهمية توافر بيانات دقيقة عن معامل التوصيل الحراري للمواد الغذائية الخام والمنتجات الغذائية المصنعة.

## ٣-٢-٢ طرق قياس معامل التوصيل الحراري

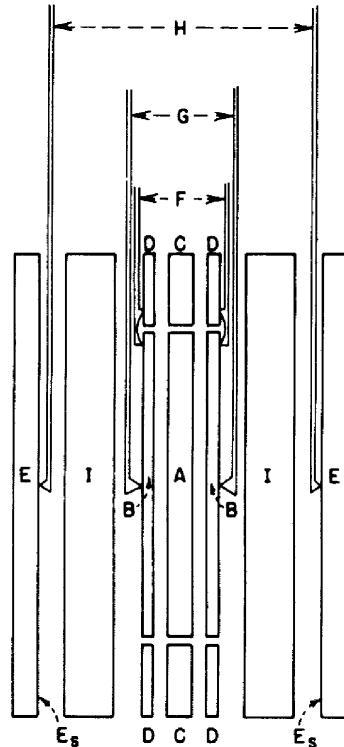
يمكن تقسيم طرق قياس معامل التوصيل الحراري إلى جزئين رئيسيين هما طرق القياس عند انتقال الحرارة في الحالة المستقرة ( الزمن ثابت ) وطرق القياس عند الحالة غير المستقرة. لكل قسم عدد من الطرق العملية، هنا استعراض لأهمها.

## أ. طرق القياس عند الحالة المستقرة

## ١- طريقة اللوح الساخن المحمي

وصفت هذه الطريقة بالتفصيل بواسطة ( ASTM Standard, C-177,1970 )، ويشيع استخدامها للمواد ضعيفة التوصيل للحرارة، ويبين الشكل (٦٢) رسمًا توضيحيًا لنموذج من اللوح الساخن المحمي. في هذه الطريقة يتصل كل من مصدر الحرارة والعينة وخازن الحرارة مع بعضها البعض ومع وافي حراري يسخن كهربائياً. ويتم المحافظة على درجة حرارة الألواح الواقية بحيث تكون مساوية لدرجة حرارة الأسطح المجاورة وذلك لمنع تسرب الحرارة من المصدر أو العينة أو المحيط المكتنف للخازن. ويمكن حساب معامل التوصيل الحراري عن طريق قياس كمية الحرارة الداخلة (من التسخين الكهربائي) اللازمة للحفاظ على حالة مستقرة لتوزيع درجة الحرارة عبر العينة تحت الاختبار. وعليه يمكن حساب معامل التوصيل الحراري من المعادلة التالية:

$$k = \frac{q}{2A} \frac{dx}{\Delta T} \quad (٢٣)$$



- A - تسخين مركزي
- B - ألواح سطحية مركزية
- C - مسخن وقائي
- D - ألواح سطحية واقية
- E - وحدات التبريد
- Es - ألواح وحدة التبريد السطحية
- F - مزدوجات حرارية تفاضلية
- G - مزدوجات حرارية سطحية لوحدة التسخين
- H - مزدوجات حرارية سطحية لوحدة التبريد
- I - العينات الاختبارية

شكل (٦٢). رسم توضيحي لنموذج من اللوح الساخن المحمي

حيث  $q$  هي كمية الحرارة الداخلة المقاسة ( $q = I^2R$ )،  $dx$  سماكة العينة،  $A$  مساحة العينة، و  $\Delta T$  فرق درجة الحرارة بين سطحي العينة عمودياً على اتجاه انتقال الحرارة. ويتم قياس معامل التوصيل الحراري بعد وصول العينة إلى حالة الانتقال الحراري المستقر والذي يتطلب الوصول إليها عدداً من الساعات. واستخدمت هذه الطريقة لقياس معامل التوصيل الحراري للمواد المجففة أو المجمدة.

## ٢- طريقة القياس عند انتقال الحرارة المستقر بالاتجاه القطري

تستخدم هذه الطريقة لقياس الموصلية للمواد الحرة غير المدمجة مثل البودرة والحبوب. ويمكن تقسيم هذه الطريقة إلى ما يلي:

### ٢-١ أسطوانة من غير نهايات محمية

وفي هذه الطريقة توضع العينة داخل اسطوانة يفترض أن تكون لانهاية الطول وعليه يمكن إهمال تأثيرات النهايات. يوفر المصدر الحراري على طول مركز العينة كمية الحرارة اللازم نقلها من خلال العينة حيث يتم حساب معامل التوصيل الحراري كما يلي:

$$(٢٥) \quad k = \frac{q \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi L(T_1 - T_2)}$$

حيث  $q$  هو الطاقة المستخدمة بواسطة المسخن الكهربائي المركزي،  $L$  طول الاسطوانة، و  $T_1$  و  $T_2$  درجتا الحرارة للعينة عند القطرين  $r_1$  و  $r_2$  على الترتيب.

### ٢-٢ أسطوانة ذات نهايات محمية

في هذه الطريقة تقلل سخانات المثبتة على النهايتين الطرفيتين للاسطوانة من الأخطاء الناتجة عن انتقال الحرارة في الاتجاه الغير قطري وهي تستخدم لقياس معامل التوصيل الحراري لعوازل الأنابيب حيث يتم حسابه باستخدام المعادلة رقم (٢٥).

### ٢-٣ الكرة ذات المصدر الحراري المركزي

وفي هذه الحالة تحيط العينة تماماً بالمصدر الكهربائي الحراري حيث يؤدي ذلك إلى التخلص من الفواقد الناتجة عن النهايات الطرفية. وبافتراض الوصول إلى الحالة المستقرة وتساوي فرق درجتا الحرارة لسطح المسخن الحراري على مسافة  $r_1$  والسطح الخارجي للعينة على مسافة  $r_2$  يمكن حساب معامل التوصيل الحراري من المعادلة التالية:

$$(٢٦) \quad k = \frac{q(1/r_1 - 1/r_2)}{4\pi(T_1 - T_2)}$$

## ٢-٤ طريقة الاسطوانة متحدة المركز المقارنة

تستخدم هذه الطريقة مسخن مركزي يحيط به عينة أسطوانية الشكل يحيط بها أسطوانة قياسية. بافتراض انتقال الحرارة في الاتجاه القطري وقياس درجات الحرارة  $T_1$  و  $T_2$  عند القطرين  $r_1$  و  $r_2$  للعينة و  $T_3$  و  $T_4$  عند القطرين  $r_3$  و  $r_4$  للمادة القياسية. يمكن إيجاد معامل التوصيل الحراري من المعادلة:

$$(٢٧) \quad k = \frac{k_s (T_3 - T_4) \ln (r_2/r_1)}{(T_1 - T_2) \ln (r_4/r_3)}$$

حيث  $k_s$  هي معامل التوصيل الحراري (المعلوم) لمادة الاسطوانة القياسية.

## ب. طرق القياس عند الحالة غير المستقرة

الاختلاف الأساسي بين الحالة المستقرة والحالة الانتقالية هو أن درجة الحرارة الانتقالية تتغير مع الزمن، لذلك تعتمد حلول معادلات التوصيل الحراري في الحالة غير المستقرة على الظروف الابتدائية والحدية. من وجهة النظر التجريبية تكمن الصعوبة الأكبر في الوصول إلى الظروف الحدية المفترضة. ونظراً لأن أغلب حلول المسائل الانتقالية (العابرة) يتضمن تقريب الحد الأول، فمن الضروري التأكد من إمكانية إهمال الحد الثاني. وبشكل عام تعتبر طرق قياس معامل التوصيل الحراري عند انتقال الحرارة غير المستقر أقل تعقيداً من تلك عند الحالة المستقرة. كما تتميز طرق القياس الانتقالية بقصر الزمن اللازم لإجراء التجربة وبالتالي التقليل من فقد المكونات الحيوية للمادة خاصةً المحتوى الرطوبي مما يجعل هذه الطرق أكثر ملائمة في حالة قياس معامل التوصيل الحراري للمنتجات الغذائية.

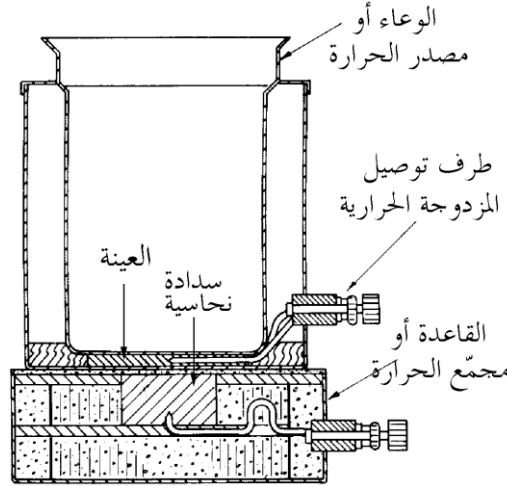
## ١. طريقة فيتش

تعتبر هذه الطريقة الأكثر استخداماً لقياس معامل التوصيل الحراري للمواد ضعيفة التوصيل الحراري، وقد قام بتطويرها العالم فيتش Fitch عام ١٩٣٥م. الشكل (٦٣) يوضح رسماً تخطيطياً لجهاز فيتش التجاري. الجهاز يتكون من مصدر حراري على شكل وعاء مملوء بسائل عند درجة حرارة ثابتة ومادة ماصة للحرارة على شكل كتلة نحاسية معزولة عدا جانب واحد منها. ويتم وضع العينة بين هذين الجزئين (مصدر و ماص الحرارة). درجة حرارة المادة النحاسية تتغير مع الزمن حسب معدل سريان الحرارة خلال العينة. وبما أن معامل التوصيل الحراري للنحاس عالي فإن المادة النحاسية في هذه الحالة تعمل كمجمع للحرارة. وبأخذ قراءات الزمن مع درجة الحرارة للمادة النحاسية يمكن حساب معامل التوصيل الحراري للعينة باستخدام المعادلة التالية:

$$k = 2.303 \frac{M C_p L}{A} \frac{\log\left(\frac{I_1}{I_2}\right)}{t}$$

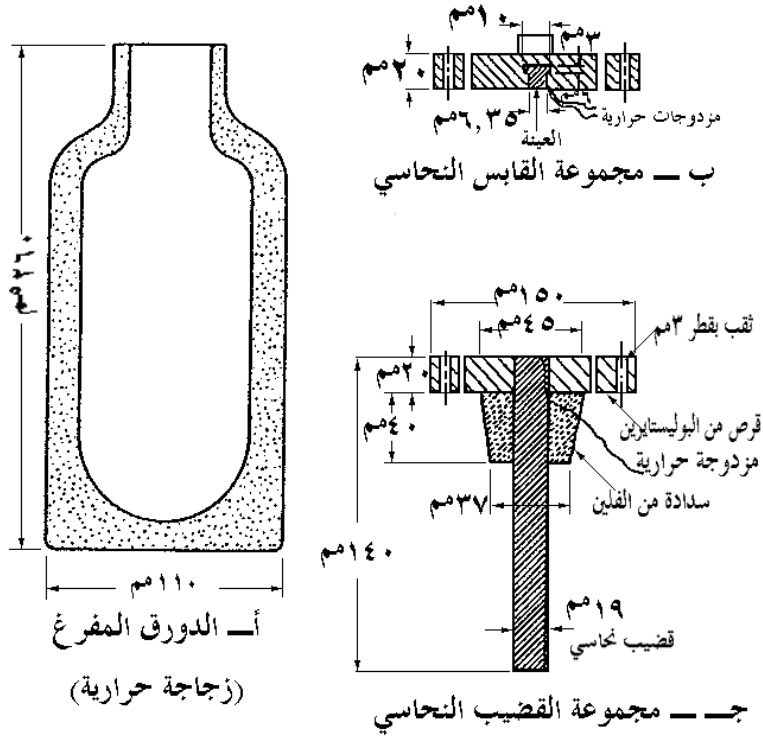
حيث  $M$  و  $C_p$  هما الكتلة والحرارة النوعية لمُجمع الحرارة،  $I_1$  و  $I_2$  فرقا درجة الحرارة عند بداية ونهاية التجربة،  $t$  الزمن، و  $A$  و  $L$  مساحة وسماكة العينة المختبرة على الترتيب. ويرسم قراءات درجات الحرارة على المحور الصادي اللوغاريتمي والزمن على المحور السيني، يمكن حساب معامل التوصيل الحراري من ميل الخط المستقيم من المنحنى الناتج والذي يساوي  $kA / 2.3 MC_p L$ .

وطور بينت وآخرون (Bennett et al., 1962)، جهاز فيتش معدل لقياس معامل التوصيل الحراري لمكونات الفواكه والخضراوات. كما طور زوريتز وآخرون (Zuritz et al., 1989)، جهاز فيتش المعدل كما هو موضح في الشكل (٦٤) لقياس معامل التوصيل الحراري للأغذية صغيرة الحجم مثل حبات فول الصويا وشرائح صغيرة من العينة. ويتكون هذا الجهاز من دورق مفرغ ثابت درجة الحرارة بسدادة مصممة بشكل خاص وقابس نحاس معزول، سدادة الفلين على شكل مخروطي (مستدقة الطرف السفلي) ذات فتحة في المركز قطرها ١٩ مم يمر عبرها القضيب النحاسي وتعمل هذه السدادة على إحكام غلق الدورق.



شكل (٦٣): رسم تخطيطي يوضح جهاز فيتش **Fitch** التجاري

ويتم لصق قرص من البولي ستايرين على أعلى سدادة الفلين، وتركيب أسلاك المزدوجة الحرارية في القضيب النحاسي عند حوالي ٢ مم من الطرف الظاهري لقياس درجة حرارة المصدر. في هذه الطريقة يتم حشر العينة بين القابس النحاسي و القضيب النحاسي، وعندما تكون درجة حرارة السائل داخل الدورق أعلى من درجة حرارة العينة فإن القابس النحاسي يعمل كمصدر للحرارة والقضيب النحاسي يعمل كماص للحرارة والعكس صحيح .



شكل (٦٤) : رسم توضيحي لجهاز فيتس معدل ، زوريتز وآخرون

قام رحمان (Rahman, 1991) بتحسين إضافي لجهاز Zuritz et al., (1989). لقياس معامل التوصيل الحراري للأغذية المجمدة. الميزة الأساسية لهذا التحسين عن بقية الأجهزة المعتمدة على طريقة فيتس هو في إهمال الفوائد من حواف الجهاز ، كذلك فإن حشر العينة بين القضيب النحاسي والقرص في الأجهزة المعتمدة على طريقة فيتس يسمح باتساع العينة بالاتجاه القطري وتقليص سماكة العينة وزيادة مساحة انتقال الحرارة وتسرب الماء من العينة .

## ٢. طريقة المصدر الحراري الخطي

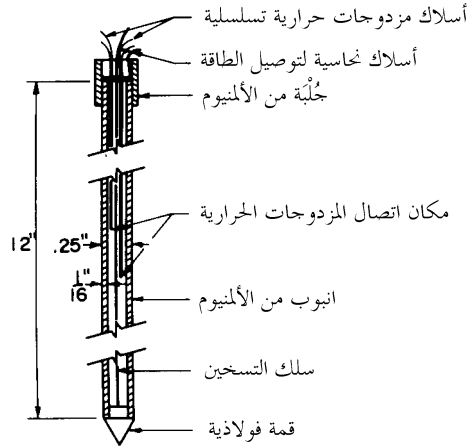
تعد هذه الطريقة إحدى طرق الانتقال الحراري الأكثر استخداماً لإيجاد معامل التوصيل الحراري للمواد الغذائية نظراً لبساطتها، انخفاض تكاليفها، سرعة القياس بواسطتها، وصغر حجم العينة المختبرة. تتلخص هذه الطريقة في غمر المصدر الحراري (سلك ساخن) في كتلة المادة الغذائية المراد قياس معامل التوصيل الحراري لها. يتم قياس الزيادة في درجة الحرارة عند مسافة معينة من المصدر الحراري بعد فترة قصيرة من الزمن. يتناسب معدل الزيادة في درجة الحرارة مع معامل التوصيل الحراري للعينة، ويمكن حساب معامل التوصيل الحراري من المعادلة التالية:

$$k = \frac{q}{4\pi(T_2 - T_1)} \ln \frac{t_2}{t_1}$$

حيث q هي كمية الحرارة الداخلة لكل وحدة طول من السلك الساخن وتساوي  $3.414 I^2 R$ .

### ٣. طريقة مجس الموصلية الحرارية

تعتبر طريقة مجس الموصلية الحرارية تعديل لطريقة المصدر الحراري الخطي. ويوضح الشكل (٦٥) تفاصيل مجس الموصلية الحرارية الذي طوره الباحثان هوبر وليبير.



شكل (٦٥): رسم توضيحي يوضح مجس الموصلية الحرارية

والمجس عبارة عن اسطوانة دائرية ذات معامل توصيل عالي إما أن تكون مصممة مثل الإبرة أو مجوفة بجدار سميك حتى يمكن إهمال تأثير انتقال الحرارة القطري. يُزود المجس بسلك تسخين معزول يمكن قياس درجة الحرارة عند منتصفه. لقياس معامل التوصيل الحراري، يتم غمر المجس في المادة المراد اختبارها. تعتمد نظرية قياس معامل التوصيل الحراري في هذا الجهاز على الإمداد الحراري الثابت من المصدر الكهربائي من خلال مادة متجانسة لانتهائية عند درجات حرارة ابتدائية ثابتة. في هذه الحالة، درجة الحرارة عند أي نقطة في المادة تعتمد على عدة عوامل منها معامل الزمن والتوصيل الحراري. عند تغير درجة الحرارة عند نقطة قريبة من مصدر السلك الساخن بين الزمن  $t_1$  و  $t_2$ ، يمكن حساب معامل التوصيل الحراري من المعادلة أعلاه. وتجدر الإشارة هنا أنه لا بد من الأخذ في الاعتبار عدد من معاملات التصحيح وتشمل تصحيحاً للزمن، وانتقال الحرارة في الاتجاه القطري، ولحجم العينة المستخدمة.

### ٣-٣-٣ المعادلات المعبرة عن معامل التوصيل الحراري كدالة للمكونات ودرجة الحرارة

#### أ. تأثير المحتوى الرطوبي

إذا تم الأخذ في الاعتبار الفقد الرطوبي التي تحدث عادة عند وجود اختلافات في درجة الحرارة في وسط منفذ للرطوبة حيث تتبخر الرطوبة في منطقة الحرارة الدافئة وتتكاثف في منطقة درجة الحرارة الباردة، فإن حدوث مثل هذه الظاهرة يؤثر سلباً على قياسات معامل التوصيل الحراري. لذلك فإنه من الضروري أخذ قراءات لحظية للموصلية الحرارية متضمنة تأثير الفقد الرطوبي.

استخدام طرق قياس معامل التوصيل الحراري التي تتطلب وقتاً طويلاً للحصول على ظروف القياس المطلوبة . مثل طرق القياس عند الحالة المستقرة . قد لا يكون مناسباً مع المواد الغذائية في ظل وجود الفقد الرطوبي وذلك لتأثيرها المباشر على القراءات. وبناءً على ذلك فإنه من الأهمية بمكان تقليص كمية الرطوبة المنتقلة إلى أدنى مستوى لها إذا كان ضرورياً استخدام إحدى هذه الطرق.

عبر Sweat (١٩٧٤) عن تلك المعادلات لتقدير معامل التوصيل الحراري بدلالة المحتوى الرطوبي للمادة كالتالي:

**الخضروات والفاكهة: ( المحتوى الرطوبي (MC%) أعلى من ٦٠%):**

$$k = 0.148 + 0.00493 MC$$

**اللحوم: ( درجات الحرارة من صفر إلى ٦٠°م ومحتوى رطوبي ٦٠-٨٠% -على أساس رطب):**

$$k = 0.08 + 0.0052 MC$$

**مثال:** استنتج معامل التوصيل الحراري لقطعة من اللحم، إذا كان محتواها الرطوبي ٦٠,١ %.

**الحل:**

المعادلة المناسبة للحم هي:  $k = 0.08 + 0.0052 MC$

$$k = 0.08 + 0.0052 (60.1) = 0.393 \text{ w/m}^\circ\text{C}$$

إذن:

**ب. معامل التوصيل الحراري كدالة لتركيب المادة ، الكثافة ودرجة الحرارة:**

يختلف معامل التوصيل الحراري حسب تركيب المادة من العناصر الغذائية ، وفي بعض الأحوال حسب اتجاهات لهذه العناصر داخل المادة. للمادة المحتوية على عدد من العناصر - كما هي أغلب المواد الغذائية يتم حساب معامل التوصيل الحراري لكل عنصر من المادة الغذائية وحسب نسبته داخل المادة ، بالإضافة إلى إعتبار درجة الحرارة للمادة.

المعادلة التالية تنتبأ بمعامل التوصيل الحراري في حدود  $\pm 15\%$  من القيم التجريبية.

$$k = 0.25 x_c + 0.155 x_p + 0.16 x_f + 0.135 x_a + 0.58 x_w$$

وتعبر المعادلة عن نسب الكربوهيدرات ، البروتين ، الدهن ، الرماد ، والماء في المادة- على الترتيب. وهذه المعادلة ليست دقيقة للمواد ذات كثافة منخفضة أو الأغذية المحتوية على فراغات داخلية مثل التفاح.



كما استنتج حوباني و طلبه (١٩٩٥) ، معادلات لحساب معامل التوصيل الحراري لثلاثة أصناف من الشعير بدلالة المحتوى الرطوبي على أساس رطب لهذه الأصناف :

$$\begin{aligned} (١٨) \quad & K_{\text{Justo}} = 221.6 + 2.1 M \% \quad r=0.986 \\ (١٩) \quad & K_{\text{Sahrawy}} = 169 + 2.54 M \% \quad r=0.963 \\ (٢٠) \quad & K_{\text{CR279}} = 170.6 + 3.78 M \% \quad r=0.998 \end{aligned}$$

حيث MC = المحتوى الرطوبي للشعير ( % على أساس رطب )

أقترح ( Choi and Okos، 1987 ) المعادلات التالية لعلاقة معامل التوصيل الحراري بكل من مكونات المادة و درجة الحرارة:

$$k = \sum ( k_i X_{vi} )$$

$$\begin{aligned} k_w &= 0.57109 + 0.0017625 T - 6.7306 \times 10^{-6} T^2 \\ k_{ic} &= 2.1296 - 0.0062489 T + 1.0154 \times 10^{-4} T^2 \\ k_p &= 0.1788 + 0.0011958 T - 2.7178 \times 10^{-6} T^2 \\ k_f &= 0.1807 - 0.0027604 T - 1.7749 \times 10^{-7} T^2 \\ k_c &= 0.2014 + 0.0013874 T + 4.3312 \times 10^{-6} T^2 \\ k_{fi} &= 0.1833 + 0.0012497 T - 3.1683 \times 10^{-6} T^2 \\ k_a &= 0.3296 + 0.001401 T - 2.9069 \times 10^{-6} T^2 \end{aligned}$$

حيث معامل التوصيل الحراري (  $w/m^\circ C$  ) تحسب لكل عنصر من الماء النقي (  $k_w$  ) ، الثلج (  $k_{ic}$  ) ، البروتين (  $k_p$  ) ، الكربوهيدرات (  $k_c$  ) ، الألياف (  $k_{fi}$  ) ، والرماد (  $k_a$  ) كدالة لدرجة الحرارة  $^\circ C$ .  
بينما النسبة الحجمية  $X_{vi}$  لكل عنصر يحدد من النسبة الكتلية  $X_i$  ، كثافة كل عنصر  $\rho_i$  والكثافة الكلية  $\rho$  كالتالي:

$$X_{vi} = X_i \rho / \rho_i$$

$$\rho = 1 / \sum [X_i / \rho_i]$$

وتحسب كثافة كل عنصر ( كجم/متر<sup>٣</sup> ) من المعادلات التالية:

$$\begin{aligned} \rho_w &= 997.18 + 0.0031439 T - 0.0037574 T^2 \\ \rho_{ic} &= 916.89 - 0.13071 T \\ \rho_p &= 1329.9 - 0.51814 T \\ \rho_f &= 925.59 - 0.41757 T \\ \rho_c &= 1599.1 - 0.31046 T \\ \rho_{fi} &= 1311.5 - 0.36589 T \\ \rho_a &= 2423.8 - 0.28063 T \end{aligned}$$

مثال:

أحسب معامل التوصيل الحراري لقطعة لحم من البقر تحتوي على ٧,٨% دهن ، ١,٥% رماد ، ١٩% بروتين ، و ٧١,٧% ماء عند ١٩° م.

الحل:

$$X_{ic} = X_c = X_{fi} = 0.0$$

عند  $T = 19^\circ\text{C}$  وباستخدام معادلات معامل التوصيل الحراري لكل عنصر، تكون النتائج ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ ) كما يلي:

$$k_w = 0.602 \quad k_p = 0.200 \quad k_f = 0.128 \quad k_a = 0.355$$

بتعويض درجة الحرارة  $T$  لمعادلات الكثافة السابقة ( $\text{kg/m}^3$ ) لكل عنصر ينتج:

$$\rho_w = 966 \quad \rho_p = 1320 \quad \rho_f = 917 \quad \rho_a = 2418$$

الآن يمكن حساب النسبة الحجمية  $X_{vi}$  لكل عنصر لتعطي:

$$X_{vw} = 0.753 \quad X_{vp} = 0.150 \quad X_{vf} = 0.09 \quad X_{va} = 0.006$$

وأخيراً:

$$k = 0.602(0.753) + 0.200(0.150) + 0.09(0.128) + 0.006(0.355) = 0.497 \text{ W/m K}$$

### ج. تأثير درجة الحرارة

بصفة عامة وفي حالة المواد الحية، يكون تأثير البناء الخلوي، الكثافة، والمحتوى الرطوبي على معامل التوصيل الحراري أكبر من تأثير درجة الحرارة. ويُعزى ذلك إلى اعتدال درجات الحرارة التي تتعرض لها هذه المواد أثناء العمليات الحرارية. وفي حالة المواد الحية أيضاً، فإن العلاقة بين معامل التوصيل الحراري ودرجة الحرارة هي علاقة غير خطية، ويمكن إيجاد متوسط معامل التوصيل الحراري من التعبير الرياضي التالي:

$$(٢١) \quad k = \frac{1}{T_2 - T_1} \int_{T_1}^{T_2} k_T dT$$

حيث تمثل  $k_T$  العلاقة غير الخطية للموصلية الحرارية مع درجة الحرارة.

## ٣-٣-٣ معامل الانتشار الحراري

## ٣-٣-٣-١ خلفية علمية:

ويعبر هذا المعامل عن معدل انتشار الحرارة بالتوصيل عبر المادة، ويمكن حسابها بدلالة الخواص الحرارية الأخرى، حيث يتم حساب معامل الانتشار الحراري  $\alpha$  من معرفة قيم معامل التوصيل الحراري و الحرارة النوعية والكثافة باستخدام المعادلة التالية:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$$

حيث  $\alpha$  معامل الانتشار الحراري (متر<sup>٢</sup> ثانية<sup>-١</sup>)،  $\rho$  الكثافة (كجم.متر<sup>-٣</sup>)،  $C_p$  الحرارة النوعية (جول كجم<sup>-١</sup> كلفن<sup>-١</sup>)،  $k$  معامل التوصيل الحراري (واط متر<sup>-١</sup> كلفن<sup>-١</sup>).

ويعتبر معامل الانتشار الحراري مهماً في معادلات انتقال الحرارة والمرتبكة بحساب توزيع درجات الحرارة داخل الأجسام وهو يعبر عن "سرعة" انتشار الحرارة في الجسم.

## ٣-٣-٣-٢ طرق قياس معامل الانتشار الحراري

فيما يلي وصف لبعض الطرق الأكثر شيوعاً لقياس معامل الانتشار الحراري.

## ١. طريقة مجس الموصلية الحرارية

يمكن استخدام مجس الموصلية الحرارية للتقدير المباشر للانتشارية الحرارية عن طريق وضع مزدوجة حرارية إضافية عند مسافة معلومة من مركز الاسطوانة ( $r$ ) بحيث تكون  $0.16 < \beta < 3.1$  .. والعلاقة بين الزمن ودرجة الحرارة كما يلي:

$$(٣١) \quad T = \frac{q'}{2\pi k} \int_{\beta}^{\infty} \frac{\exp(-\beta^2)}{\beta} d\beta$$

حيث  $\beta$  معامل لا بعدي يساوي  $\frac{r}{2\sqrt{\alpha.t}}$  . وقد أعطى نيكس وآخرون (Nix et al., 1967) المتتالية التالية لتقدير التكامل أعلاه كما يلي:

$$(٣٢) \quad T = \frac{q'}{2\pi k} \left[ -\frac{0.58}{2} - \ln\beta + \frac{\beta^2}{2.1!} - \frac{\beta^4}{4.2!} + \dots \right]$$

وقد وُجد أن الحدود الأولى من المعادلة (٣٢) تحتاج إلى تقدير لتأكيد التقارب. قيم  $\beta$  يمكن حسابها بطريقة المحاولة والخطأ من المعادلة (٣٢)، في حين يمكن حساب قيم معامل الانتشار الحراري من قيم  $\beta$  من

المعادلة  $\frac{r}{2\sqrt{\alpha.t}}$ . وتتميز هذه الطريقة بقصر مدة التجربة (حوالي ٥ دقائق) وتتطلب ارتفاعاً بسيطاً في درجة حرارة العينة. ودقتها ٥% إذا كانت  $0.2 < \beta < 0.5$ .

## ٢. طريقة ديكسون

وصف العالم ديكسون (Dickerson, 1965) جهازاً لقياس معامل الانتشار الحراري يعتمد على الانتقال الحراري العابر (الغير مستقر) ويتطلب ذلك فقط بيانات الزمن ودرجات الحرارة. الجهاز يتألف من حمام مائي مجهز بمقلّب، واسطوانة معدنية حاوية للعينة (شكل ٦٦). يتم لحم مزدوجة حرارية (Thermocouple) على السطح الخارجي للاسطوانة لقياس درجة حرارة سطح العينة، ومزدوجة حرارية أخرى على شكل مجس يتم إدخالها إلى مركز العينة. وللإسطوانة غطاءين من مادة التيفلون حتى يمكن وضعها بعد إحكام غلقها على العينة في الحمام المائي ويتم تسجيل الزمن ودرجات الحرارة حتى الوصول إلى معدل ارتفاع درجة حرارة ثابت لكل من المزدوجة الحرارية الداخلية والخارجية. ومعادلة الانتقال الحراري الأساسية يمكن كتابتها كما يلي:

$$(٣٣) \quad \frac{A}{\alpha} = \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \cdot \frac{\partial T}{\partial r}$$

حيث A معدل ارتفاع الحرارة الثابت عند جميع النقاط على الاسطوانة (درجة مئوية/ثانية) أي ميل الخط المستقيم في شكل (٦٧). المعادلة (٣٣) يمكن حلها عندما لا يكون هناك تغير في انحدار درجة الحرارة مع الزمن كالتالي:

$$(٣٤) \quad T = \frac{Ar^2}{4\alpha} + C_1 \ln(r) + C_2$$

وعند توافر الشروط الحدية المطلوبة فإنه يمكن حل المعادلة السابقة وتعويض الثوابت كالتالي :

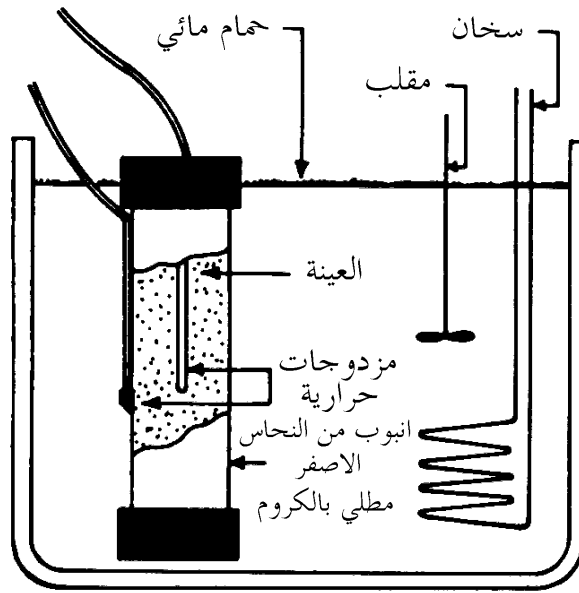
$$(٣٥) \quad (T_R - T) = \frac{A}{4\alpha} (R^2 - r^2)$$

وعند  $r = 0$  ، فإنه يمكن التعبير عن معامل الانتشار الحراري كما يلي :

$$(٣٦) \quad \alpha = \frac{A.R^2}{4(T_R - T_c)}$$

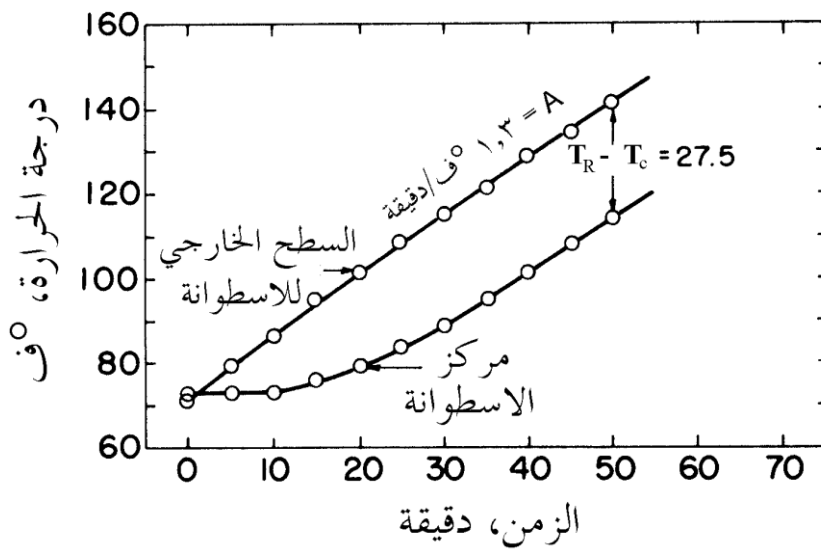
حيث:

A	المعدل الثابت لارتفاع درجة الحرارة في الحمام المائي.
R	نصف قطر الاسطوانة الداخلي
$(T_c, T_R)$	درجة حرارة السطح الخارجي للاسطوانة ودرجة حرارة المركز
م <sup>٢</sup>	
متر	
م <sup>٢</sup> /دقيقة	



شكل (٦٦). رسم توضيحي لجهاز قياس معامل الانتشار الحراري

ويوضح شكل (٦٧) رسماً لدرجة حرارة العينة مقابل الزمن. وقد أوضح ديكرسون أنه يمكن الوصول إلى ٩٥% أو أكثر من فرق درجات الحرارة الأقصى ( $T_R - T_c$ ) أو بداية الحالة المستقرة عندما تكون  $(\alpha/R^2) > 0.55$  حيث تستخدم وحدات البوصة أو الدقيقة بدلاً من القدم والساعة، وبالتالي يمكن تقدير القطر المناسب للأسطوانة من هذه المتباينة. وقد بين أولسن وشولتز (Olson and Schultz, 1942) أن نموذج التمثيل الرياضي للأسطوانة لانتهائية يمكن استخدامه إذا كانت نسبة طول الاسطوانة إلى قطرها أكبر من ٤، أي أن طول الاسطوانة الحاوية للعينة يجب أن يكون أكبر أربع مرات من قطرها.



شكل (٦٧): رسم يبين العلاقة بين الزمن ودرجة الحرارة باستخدام جهاز ديكرسون لقياس معامل الانتشار الحراري (Dickerson, 1965).

## ٣. طريقة سينج

في اسطوانة محددة ذات درجة حرارة ابتدائية متجانسة ومعرضة لبيئة محيطية ذات درجة حرارة ثابتة ومهملة المقاومة السطحية للحمل، فإن حل معادلة التوصيل الحراري تكون كالتالي:

$$(٣٧) \quad \frac{T_m - T}{T_m - T_o} = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2(-1)^{m+1}}{\beta_m} \cos(\beta_m 2z/L) \frac{2J_o(\beta_n r/R)}{\beta_n J_1(\beta_n)} \exp\left[-\left(\frac{\beta_n^2}{R^2} + \frac{4\beta_m^2}{L^2}\right)\alpha t\right]$$

حيث:

	النوع الأول لدوال بيسل من الرتبة صفر وواحد على التوالي.	$J_1$ و $J_o$
متر	نصف قطر وطول الاسطوانة على التوالي	$L$ و $R$
°م	درجة الحرارة الابتدائية والمحيطية على التوالي	$T_m$ و $T_o$
	جذر دالة الجتا وجذر دالة بيسل على التوالي	$\beta_n$ و $\beta_m$
	المحور المار بالمركز على طول الاسطوانة	$z$

عند الزمن الطويل فإن تقريب الحد الأول من حل المتتالية السابقة يمكن قبوله . في حالة الاسطوانة المحددة فإن الحل الموضح (٢٥) يمكن تبسيطه بالاحتفاظ بالحدود مع  $m=n=1$  و  $\beta_n=\pi/2$  و  $\beta_m=2.4048$  و  $J_1(2.4048)=0.5191$  . في مركز الاسطوانة المحددة ،  $z = 0$  و  $r = 0$  ، و  $J_o(0)=1.0$  . وبالتالي فإن التقريب عند الزمن الطويل كالتالي :

$$(٣٨) \quad \frac{T_m - T}{T_m - T_o} = 2.0396 \exp\left[-\left(\frac{(2.4048)^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{L^2}\right)\alpha t\right]$$

برسم منحنى اختراق الحرارة التجريبي شبه لوغاريتمي نحصل على:

$$(٣٩) \quad t = f \log\left(j \frac{T_m - T_o}{T_m - T}\right)$$

حيث

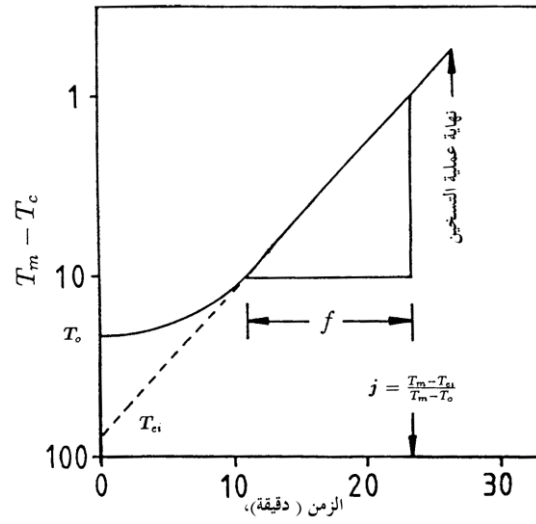
$$j = \frac{T_m - T_{ei}}{T_m - T_o}$$

حيث  $T_{ei}$  درجة الحرارة الابتدائية المقدره بمد منحنى التسخين على استقامته

وبجمع المعادلتين السابقتين (٣٨) و (٣٩) نحصل على :

$$(٤٠) \quad \alpha = \frac{2.303}{\left[ \frac{(2.4048)^2}{R^2} + \frac{\pi^2}{L^2} \right] f}$$

تسمح المعادلة (٤٠) بتقدير معامل الانتشار الحراري إذا تم الحصول على معامل معدل التسخين  $f$  من تجربة فعلية لاختراق الحرارة ، شكل (٦٨).



شكل (٦٨) : منحنى اختراق الحرارة لتجربة فعلية يوضح  $f$  و  $j$ .

٣-٣-٤ معامل انتقال الحرارة السطحي (بالحمل)  $h$ 

## ٣-٣-٤-١ خلفية علمية

في معظم الحسابات الحرارية لعمليات التصنيع الغذائي هناك حاجة لقياس الانتقال الحراري من مائع إلى سطح صلب كما هو الحال في انتقال الحرارة بالحمل من جدار العبوة الغذائية إلى المحلول الغذائي ومن ثم إلى حبات الخضار أو اللحوم داخلها. كذلك الحال عند تبريد المنتجات الزراعية من السطح الداخلي لمخزن التبريد إلى الهواء إلى سطح المنتج الغذائي فهناك حاجة لقياس معامل الحمل الحراري لحساب الطاقة الكلية للتبريد أو التجميد. وكلما زادت سرعة المائع وقلت لزوجته كلما زاد من قيمة معامل الحمل الحراري. يعتبر معامل انتقال الحرارة السطحي مهماً عندما تكون المقاومة الحرارية السطحية لمنتج (أو لعلبة) كبيرة نسبة إلى المقاومة الحرارية الداخلية للمنتج.

## ٣-٣-٤-٢ طريقة القياس : Lumped capacitance Method

عندما يتم غمر جسم معدني (ذو موصلية حرارية عالية) عند درجة حرارة ابتدائية  $T_i$  في سائل ساخن ( $T_{\infty}$ ) فإن الجسم سوف يكتسب طاقة حرارية مع الزمن حتى تصل درجة حرارته إلى مرحلة الإتزان (أي يساوي درجة حرارة السائل). وعليه، فإن توازن الطاقة لهذا الجسم في فترة زمنية  $\Delta t$  هو:

الحرارة المخزنة = الحرارة المضافة

$$(٤١) \quad m.C_p. \Delta T = h.A.(T_e - T) \Delta t$$

حيث:

$V$  = حجم الجسم

$\rho =$  كثافة الجسم  $m = V. \rho$

$C_p =$  الحرارة النوعية للجسم

$\Delta T =$  التغير في درجة الحرارة

$h =$  معامل انتقال الحرارة السطحي بالحمل

$A =$  مساحة السطح للجسم

$T_e =$  درجة حرارة البيئة

$T =$  درجة حرارة الجسم

$\Delta t =$  الفترة الزمنية



رقم بيوت (Biot Number) هو نسبة مقاومة التوصيل في المادة الصلبة الى مقاومة الحمل في المائع. وهو معرف ب  $Bi = h.L/k$  ، حيث  $L$  هي خاصية الطول و  $k$  معامل التوصيل الحراري للمادة الصلبة. ويعتبر  $L$  للكرة والاسطوانة هو نصف القطر وللسطح المستوي سمكها، أو نصف السمك إذا كان انتقال الحرارة يحدث من كلا جانبي السطح. خاصية الطول  $L$  لأجسام غير منتظمة الشكل معرف بحجم الجسم مقسوم على مساحة سطحه. متى كان  $Bi \ll 1$  ، فإن مقاومة التوصيل ستتجه إلى الصفر، و متى كان  $Bi \gg 1$  ، فإن مقاومة الحمل ستساوي الصفر أو  $h$  كبيرة جداً. متى اقتربت  $Bi$  من الصفر، فإن المادة الصلبة عملياً تكون عند درجة حرارة ثابتة و يكون اختلاف درجة الحرارة الأكبر في المائع. كلما اقترب  $Bi$  من اللانهاية ، يعتبر المائع تقريباً عند درجة حرارة ثابتة ، و تحدث فروق درجة الحرارة أساساً خلال المادة الصلبة. لذا فالجسم الموصل جيداً للحرارة يعتبر عند درجة حرارة متجانسة و ثابتة ،  $T$  ، لكامل الجسم عند أي زمن.

إذن ، متى ما كان جسم يملك مقاومة حرارية (موصلية) داخلية مهملة ، فإن التغير الحراري داخل الجسم أصغر بكثير من التي تحدث في المائع المحيط. متى كان  $Bi$  أقل بكثير من ٢ ، فإن تغير الطاقة المخزنة في المادة الصلبة تكون مساوية لمعدل انتقال الحرارة من السطح بطريقة الحمل. إذا كان رقم بيوت أقل من ١٠ ، فإن الخطأ في بيانات درجة الحرارة أقل من ٥% عندما يتم حسابه بالطريقة المبينة أعلاه. وكلما صغر رقم بيوت ، فإن الدقة تزيد.

تم تطوير عدد من العلاقات لحساب  $h$  بمعرفة ارقام رينولدز (  $Re$  ) و براندل (  $Pr$  ) (للتفصيل ، انظر أي كتاب انتقال حراري مثل كريث و بلاك ، ١٩٨٠). وهكذا ، إذا علم حجم الجسم، المساحة والحرارة النوعية، فإنه يمكن استخدام تجربة التبريد أو التسخين عند درجة حرارة بيئية ثابتة  $T_e$  لتقدير  $h$ . عند وضع اسطوانة ألمنيوم ( مشابهة لأبعاد منتج غذائي ) ذات معامل توصيل حراري عالي، و عند وضعها في حمام مائي ساخن و بحيث أن قيمة رقم بيوت منخفضة ، فيمكن أن نفترض أن كامل الإسطوانة تكون عند درجة حرارة متجانسة عند أي لحظة.

بإعادة ترتيب المعادلة ٤١ :

$$(٤٢) \quad \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{h.A.}{V.\rho.C_p}(T_e - T)$$

إذن ، الرسم البياني ل  $\Delta T / \Delta t$  مقابل  $(T_e - T)$  يكون خطاً مستقيماً بميل  $h.A. / (V.\rho.C_p)$  ، إذا كانت الخصائص الحرارية  $h$  و  $C_p$  ثابتة. أيضاً ، بإعادة ترتيب المعادلة ٤٢ مرة أخرى يعطي:

$$(٤٣) \quad \frac{\Delta T}{T_e - T} = \frac{h.A.}{V.\rho.C_p} \Delta t$$

أو عند تغير متناهي الصغر للزمن ، يمكن أن تكتب هذه المعادلة:

$$(٤٤) \quad \frac{dT}{T_e - T} = \frac{h.A.}{V.\rho.C_p} dt$$

و بمكاملة المعادلة ٤٤ يمكن الحصول على:

$$(٤٥) \quad \ln \left( \frac{T_e - T}{T_e - T_0} \right) = \frac{-h.A}{V.\rho.C_p} .t$$

حيث  $T_0$  درجة الحرارة الابتدائية للأسطوانة ، و  $(T_e - T)/(T_e - T_0)$  هي نسبة درجة الحرارة (TR) .

بإعادة كتابة معادلة ٤٥ يمكن الحصول على المعادلة النهائية:

$$(٤٦) \quad \log (TR) = \frac{-h.A}{2.3 V.\rho.C_p} .t$$

إذن ، الرسم البياني ل (TR) مقابل t يكون خطأً مستقيماً بميل  $= -h.A./ (2.3V.\rho.C_p)$  ومنه يمكن حساب h عند ظروف التجربة المحددة. ويمكن عمل العديد من التجارب لقياس h عند ظروف مختلفة من سرعة المائع، درجة حرارته، لزوجته، خواص سطح العينة، شكل العينة، وغيرها. ومن ثم يمكن إدراجها في معادلات ( بدون وحدات) لها الصيغة التالية

$$Nu = f (Re, Pr)$$

حيث:

Nu رقم نسولت

Re رقم رينولدز

Pr رقم براندلت.

== تم بحمد الله الانتهاء من مذكرة ٣٤١ هنزر ==

تمنياً لكم الاستفادة العلمية والمعرفية من المقرر  
مع تحقيق الدرجات المعتمدة على جهودكم طوال الفصل الدراسي..