T.C.

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GIDA FİZİĞİNDE MADDELERİN TERMAL ÖZELLİKLERİ

Danışman: Yard. Doç. Dr. Hülya KES

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANA BİLİM DALI

Selda SÜMAN

EDİRNE - 2012

TRAKYA ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GIDA FİZİĞİNDE MADDELERİN TERMAL ÖZELLİKLERİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

FİZİK ANA BİLİM DALI

Selda SÜMAN

Bu tez 13.02.2012 tarihinde Aşağıdaki Jüri Tarafından Kabul Edilmiştir.

Prof. Dr. Serap ŞENTÜRK DALGIÇ	Prof. Dr. Ayten SAĞIROĞLU	Yrd. Doç.Dr. Hülya KES (Danışman)
.....	.....	.....

Yüksek Lisans Tezi
Gıda Fiziğinde Maddelerin Termal Özellikleri
Trakya Üniversitesi
Fizik Anabilim Dalı

ÖZET

Gıdaların temel fiziksel özelliklerinin bilinmesi gıda bilimi ve gıda mühendisliği açısından oldukça önemlidir. Bu tezde ilk olarak gıdaların fiziksel özelliklerinden en temel kavramlar olan kütle ve yoğunluk kavramları ele alınmıştır. Maddelerin ayırt edici bir özelliği olan yoğunluğun sıcaklık ve basınçla değişimi incelenmiştir. Yoğunluk ölçüm teknikleri sınıflandırılmış ve bunların bazı gıda maddeleri için örnekleri sunulmuştur.

Madde ile enerji arasındaki etkileşmelerin söz konusu olduğu her türlü mühendislik uygulaması termodinamik konusu ile bir şekilde ilgilidir. Gıdaların işlenmesi sırasında enerji ve madde alışverişleri yoğun olarak kullanılmaktadır. Gıda hammaddelerinin besin değerini kaybetmeden standartlara uygun olarak verimli bir şekilde işlenmesi, korunması ve depolanması için her adımda termodinamik parametrelerin belirlenmesi de çok büyük önem taşır. Bu parametrelerin doğru olarak hesaplanması ve belirlenmesi gerekmektedir. Bu çalışmada gıdaların sıcaklık, ısı ve entalpi, termodinamiğin birinci kanunu, ısı sığası, faz değişimleri, ısı iletimi gibi termal özellikleri incelenmiş ve termal özelliklerin ölçüm teknikleri ele alınmıştır. Besinlerin kalori değerlerinin hesaplanmasına da yer verilmiştir. Ayrıca ele alınan fiziksel kavramların literatürdeki bazı sonuçları verilmiş ve bunların gıda bilimi için önemleri vurgulanmıştır.

Yılı: 2012
Sayfa sayısı: 122
Anahtar Kelimeler: Kütle-yoğunluk, Termodinamik özellikler, Gıda fiziğinde termal özellikler

Master Thesis
Thermal Properties of Matters in Food Physics
Trakya University Institute of Natural Science
Department of Physics

SUMMARY

It is very important to know the fundamental properties of food for food science and food engineering. In this thesis, mass and density concepts which are most basical concepts among physical properties of foods are considered. Temperature and pressure effects on density are also investigated. Density measurement techniques are classified and examples for these techniques are presented for some food materials.

Every engineering application in which an interaction between matter and energy occurs, are related with thermodynamics in a way. During food processing, the interchange between energy and matter is heavily used. In order to process, save and store the raw materials of food without losing nutritional values of them, it is important to define thermodynamic parameters in every step. These parameters must be calculated and defined correctly. In this study, it has been studied some properties of food such as temperature, heat, enthalpy, first law of thermodynamics, heat capacity, phase transition, heat transition and considered the measurement techniques of thermal properties. Also, results for the physical properties considered in here are presented and the importance of these to food science are emphasized.

Year: 2012
Number of Pages: 122
Keywords: Mass-density, Termodynamical Properties, Thermal Properties in Food Physics

TEŞEKKÜRLER

Bu çalışmayı gerçekleştirebilmem için bana imkan sağlayıp, tez yöneticiliğimi üstlenen, çalışmamın her aşamasında yol gösteren ve yardımlarını esirgemeyen, elimdeki tüm imkanları sınırsız olarak sunan değerli hocam Yard. Doç. Dr. Hülya Kes' e teşekkürlerimi sunmayı zevkli bir görev sayarım.

Sayın Prof. Dr. Serap Şentürk Dalgıç' a ve çalışmam sırasında yardımlarıyla katkıda bulunan bölümümün tüm elemanlarına da teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan ve desteğini esirgemeyen aileme de teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET…….....i

SUMMARY……....ii

TEŞEKKÜR…….....iii

İÇİNDEKİLER…….....iv

ŞEKİLLERİN LİSTESİ…….....vi

TABLOLARIN LİSTESİ…….....x

1 GİRİŞ……...1

2 KÜTLE VE YOĞUNLUK……..3

2.1 Kütle…….....3

2.2 Atmosferdeki Kaldırma Kuvvet ve Tartı……5

2.3 Yoğunluk…….....10

2.3.1 Yoğunluğun Sıcaklıkla Değişimi…….....10

2.3.2 Yoğunluğun Basınçla Değişimi…….....13

2.3.3 Özgül Ağırlık (bağıl yoğunluk)……..18

2.4 Yoğunluk Ölçüm Teknikleri…….20

2.4.1 Piknometre…….....20

2.4.2 Hidrostatik denge (kaldırma kuvveti).……23

2.4.3 Mohr-WestphalDengesi……..28

2.4.4 Hidrometre…….....31

2.4.5 Daldırma tekniği…….33

2.4.6 Yüzen parçacık tekniği.…….....35

2.4.7 Yoğunluk sütun gradiyent……...37

2.4.8 Resanator frekans teknikleri……..38

2.4.9 Bulk yoğunluğu……..43

3 TERMAL ÖZELLİKLER…….....45

3.1 Sıcaklık……..48

Sayfa

3.2 Isı ve Entalpi…….50
3.3 Termodinamiğin Temel ilkeleri……53
3.3.1Termodinamik Kanunları…….53
3.4 Isı Sığası…….....57
3.4.1 İdeal gazlar ve ideal katılar…….59
3.4.2 Gerçek katıların ısı sığası…….....63
3.5 Faz Değişimlerinin Sınıflandırılması…….....65
3.6 Gıdalarda Isı İletimi…….....70
3.6.1 Isı radrasyonu……..70
3.6.2 Isı İletimi…….....73
3.6.2a Tek Boyutta Kararlı-Durumda Yassı Bir Plakada Isı İletiminin Geçişi…….....74
3.6.2b Üç Boyutlu Durumda Isı İletimi…….....76
3.6.2c Tek boyutta Çoklu Katmanlarda Kararlı Durum Isı İletimi……77
3.6.2d Bir Boyutta Tek Katmanlı Silindirik Yüzeyde Kararlı Isı İletimi…….....80
3.6.2e Çok Katmanlı Silindirik Duvarda Bir Boyutlu Kararlı Isı İletimi…….....85
3.6.3 Konveksiyon Isı Transferi…….....87
3.7 Termal Özelliklerin Ölçümü……89
3.7.1 Kararlı Durum Teknikleri……...89
3.7.2 Yarı Kararlı Durum Teknikleri……...92
3.7.3 Kararlı Olmayan Durum Teknikleri……93
3.8 Besinlerin Kalori Değerleri…….....96
3.8.1 İnsan Vücudunun Kalori(Enerji) İhtiyacı…….....96
3.8.2 Gıdaların Kalori Değeri…….....99
3.8.3 Kalori Değerlerinin Hesaplanması…….... 101
4 SONUÇLAR VE TARTIŞMA…….....103
KAYNAKLAR……111
ÖZGEÇMİŞ……113

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. Ağırlıksız iken (Şekil I), 1 kg kütlenin Atmosferdeki ağırlığı (Şekil II) ve vakumdaki ağırlığı (Şekil III)……...7

Şekil 2.2. Normal (N) ve anormal (H_2O) ısıl genleme (şematik)**…….**13

Şekil 2.3. Anormal su (H_2O) normal bir davranış (N) sıcaklık bağımlılığı ile yoğunluğunun karşılaştırılması……14

Şekil 2.4. Piknometre tasarımları: (a) Reischauer, (b) Bingöl, (c) Gay-Lussac, (d) Sprengel, (e) Lipkin, (f) Hubbard ……..**.....**22

Şekil 2.5. Piknometre örnekleri…….**.....**23

Şekil 2.6. Hidrostatik denge tasarımı: 1.denge, 2.platform, 3.küçük beher, 4. büyük beher, 5.destek aparatı, 6.tava, 7.termometre …….26

Şekil 2.7. Patatesin d bağıl yoğunluğuna karşılık nişasta içeriği (5050 gr patates için)…….30

Şekil 2.8. Mohr-Westphal denge:1.kiriş, 2.ağırlıklar, 3.cisim kaldırma kuvveti, 4.sıvı örneği……..29

Şekil 2.9. Hidrometre: 1.ölçek, 2.gövde(termometre olan ve olmayan), 3.salma…….**.....**32

Şekil 2.10. Sıvı yüzeyin de hidrometre skalasının okunuşu örneği……..32

Şekil 2.11. Yoğunluk ölçümü için Daldırma tekniği:1.derinlik işareti,2:.Sıvı örneği 3. kaldırma kuvveti……**....**34

Şekil 2.12. Yüzer teknik: Örnek P sıvı F içinde askıdadır……36

Şekil 2.13. Yoğunluk Gradyant sütun: 1. hız ölçer, 2.su ceketi, 3.yükselen sepeti, 4.destek……...36

Şekil 2.14. Piknometre ile katı granül bir toz malzemenin yoğunluk ölçümü……..41

Şekil 2.15. Bulk yoğunluğunu ölçmek için aygıt 1.dönen kam, 2.konut, 3.toz örnek 4.silindir 5.taşma ……**...**43

Sayfa

Şekil 3.1.Bir gıdanın yüzeyi üzerinden ısı transferi……45
Şekil 3.2. Ehrenfest faz geçişleri sınıflandırılması…….....67
Şekil 3.3 Alternatif EHRENFEST faz geçişleri sınıflandırılması…….....69
Şekil 3.4. Katı yassı bir plakada sıcaklık geçişi……74
Şekil 3.5. Çok katmanlı yassı duvarda sıcaklık geçişi……..77
Şekil 3.6. Tek katmanlı silindirik duvarda sıcaklık profili……...80
Şekil 3.7. (I) kalın duvarlı tüp. (III) ince duvarlı tüp. (II) I ve III arasındaki sınır durumu…….83
Şekil 3.8. Çok katmanlı silindirik duvar……...85
Şekil 3.9. Konveksiyon ısı transferi. Duvar yüzeyi yakınında hız ve sıcaklık profilleri oluşur.1.sıcak duvar 2.sınır katmanı……87
Şekil 3.10. Korumalı sıcak plaka yöntemi ile Termal iletkenliğin ölçülmesi: P örnek C soğutulmuş plaka, H ısıtıcı, I termal izolasyon……90
Şekil 3.11. Referans malzemeye bağlı olarak termal iletkenliğin ölçülmesi için iki plaka tekniği: Pörnek malzeme, R referans malzeme……91
Şekil 3.12. Akışkan örnek malzemelerin termal iletkenliğinin ölçülmesi için Eşmerkezli silindir metodu……91
Şekil 3.13. Termal iletkenliğin ölçüldüğü Fitch cihazı: 1 yalıtım malzemesi, 2. T_s sıcaklığında sıvı, 3 ve 5 bakır blok, 4 örnek malzeme…….…….92
Şekil 3.14.Termal iletkenliği ölçmek için ısı prob sensörü: H ısıtılan element, U_H ısı kaynağının gücü için elektriksel potansiyel, U_{TH} sıcaklık ölçmek için kullanılan ısıl çiftin gerilim potansiyeli…….94
Şekil 3.15. Termal difüzyon ölçüm tekniği: P örnek malzeme, T örneğin içinde bulunduğu kontrollü sıcaklığı…….95

TABLOLARIN LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1. 1 kg lık bir kütlenin farklı yerlerdeki değerleri……..4
Tablo 2.2. Örnek meteorolojik enstitüler……5
Tablo 2.3. Atmosferik kaldırma kuvveti düzeltme faktörlerine örnekler……...8
Tablo 2.4. Yoğunluk ölçüm teknikleri……..20
Tablo 2.5. Yüzen tekniği için örnek sıvılar……...35
Tablo 2.6. Yoğunluk gradiyenti sütun için uygun sıvılar ……..37
Tablo 2.7. Hausner oranı toz akışkanlık karakterizasyonu……...44
Tablo 3.1.Gıda mühendisliğinde önemli termal işlem operasyonları……..47
Tablo 3.2. Bazı sıcaklıklar için sabit noktalar ve bağıl ölçekler……...49
Tablo 3.3. Bazı sabit noktaların gıda süreçlerinin sıcaklık aralığında ITS-90 uluslararası sıcaklık ölçeği ……49
Tablo 3.4. Enerjinin çeşitli formları……..50
Tablo 3.5. İzobarik süreçteki bir sistemde ısı iletimi dQ……..53
Tablo 3.6. Isı sığası terimleri……58
Tablo 3.7. Atomların ve moleküllerin basit, ideal bir sistem için serbestlik dereceleri…….60
Tablo 3.8. Seçilen sistemlerin belirli bir ısı kapasitesinde teorik ve deneysel değerleri……..63
Tablo 3.9. Çeşitli gıda bileşenlerinin özgül ısı sığasını gösteren liste……..63
Tablo 3.10. Isı iletimi mekanizmaları……..70
Tablo 3.11. Oda sıcaklığında bazı metaryallerin yayılma değerleri……72
Tablo 3.12. Şekil 3.4 için ısı akışı ve sıcaklık gradiyenti sonuçları……..75
Tablo 3.13. İnsan vücudunun $\dot{E}$ güç ihtiyacı……97
Tablo 3.14. Ortalama güç için *f* faktörleri……99

Sayfa

Tablo 3.15. ATWARTER faktörleri: Fizyolojik kalori değerleri……...100
Tablo 3.16.Fizyolojik ve fiziksel yanmanın karşılaştırılması……101
Tablo 4.1a.Katı materyallerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri……104
Tablo 4.1b. Sıvıların materyallerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri……...105
Tablo 4.1c. Sıvıların materyallerin bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri……106
Tablo 4.2. Bazı besinlerin ortalama su içerikleri…….....107
Tablo 4.3. Hava ve suyun bazı fiziksel ve kimyasal özellikleri……..108
Tablo 4.4. Bazı gıdalar için termal değerler……109

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Gıda üretim, işçiliği ve paketlenmesi, hazırlanması ve kullanımında bilim ve mühendislik yöntemleri kullanılmaktadır.

Gıda teknolojisi öncelikle fizik, kimya, biyoloji ve mikrobiyoloji bilimi üzerine kurulmuştur.

Maddeleri birbirinden ayırt etmek için her maddenin değişen özelliklerinden yararlanılır. Bu özelliklere ayırt edici özellikler denir. Yoğunluk da maddeler için ayırt edici özelliklerden birisidir.

Viskozite, gıda üretiminin çeşitli basamaklarında sıvı ürünlerin çok karakteristik ve önem taşıyan bir özelliğidir. Çeşitli sıvıların viskozitesi ısıtma, soğutma, konsantre hale getirme gibi işlemlerde değişiklik gösterir.

Gıdaların yoğunluğu ile ilgili bilgiler ayırma tekniklerinin kullanıldığı işlemler için büyük önem taşır. Yoğunluktaki farklılık boyut küçültme ve karıştırma işlemlerinde de önemlidir. Bu nedenlerle yoğunluk ve viskozitenin periyodik aralıklarla ölçülmesi gerekir. Günümüzde gıda üretimi yapan işletmelerde yoğunluk ve kıvam ölçümleri modern araç-gereçlerle yapılmaktadır.

Gıdaların termal özellikleri ile fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik kararlılığı arasında önemli bir ilişki vardır. Gıdaların termal özellikleri, kendi yapılarından dolayı birbirinden farklı ve her gıda için karakteristiktir.

Gıda endüstrisinin gıda güvenliğini arttırması ve devamlı büyüyen global bir markette rekabetçi olabilmesi için gıda firmalarının, maksimum ürün kalitesi ve güvenliğini garanti edebilmeleri ve tüketici halk tarafından talep edilen geliştirilmiş ve yeni kalite yaklaşımları geliştirmeleri için kendi proseslerini tasarlayabilmeleri ve

kontrol edebilmeleri çok önemlidir. Bu sonuçların başarılabilmesi için fizik kuralları hakkında temel bilgiye sahip olmak gerekmektedir.

Bu alanda yapılacak çalışmaların en başında temel fizik kavramlarını anlamak gelmektedir. Bu amaçla bu tezde en temel fizik kavramlarından olan kütle ve yoğunluk ele alınarak, Gıda Fiziğinde maddelerin termal özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan temel termodinamik yasaları incelenmiş, bu yasaların Gıda Fiziğindeki uygulamaları sunulmuştur.

Bu amaç doğrultusunda ilk olarak Bölüm 2 de katı, sıvı ve gazlar için yoğunluk kavramı ele alınarak, yoğunluk ölçüm tekniklerinin neler olduğu incelenmiştir.

Bölüm 3'de ise maddelerin termal özellikleri ele alınmış ve gıda fiziği ile ilişkisi gözden geçirilmiştir. Besinlerin raf ömrünü uzatmak için besin imal işlemlerinin çoğu enzimatik ve mikrobik aktivitelerinin önlenmesine duyarlı sıcaklık gerektirmektedir. Bu sıcaklık işlemleri de besin ürünlerinin termal özelliklerine bağlıdır. Bu nedenle termal özellikler ile ilgili belli başlı kavramların tanımları yapılmış ve termodinamik kanunları incelenmiştir. Termal özelliklerin ölçülmesi ve besinlerin kalori değerleri yine bu bölümün içinde yer almaktadır.

Bu tezin ikinci ve üçüncü bölümünde L.O. Figura ve A.A. Teixeira' nın 2007' de yayınlamış oldukları "Food Physics" kitabı ana kaynak olarak kullanılmıştır.

Son bölüm sonuç ve tartışma kısmına ayrılmıştır. Bu tezde ele alınan fiziksel kavramların literatürde var olan bir takım sonuçları sunulmuş ve bunların gıda bilimi için önemi vurgulanmıştır.

BÖLÜM 2

KÜTLE VE YOĞUNLUK

2.1 Kütle

Kütle bir cismin eylemsizliğinin ölçüsüdür. Dünya'nın yerçekimsel etkisi bir cismin ağırlığına neden olur. Bu kuvvet Matematiksel olarak denklem (2.1) ile gösterildiği gibi, cismin kütlesi ve Dünya'nın yerçekimi ivmesi çarpımı olarak ifade edilebilir.

$$G = m \cdot g \tag{2.1}$$

Bu denklemde G ağırlık (N), m kütle (kg), g yerçekimi ivmesi ($\mathrm{m.s^{-2}}$) olarak ifade edilir.

Dünya konuma bağlı yoğunluk farkından dolayı, kusursuz bir küre şeklinde değildir. Dünya gezegeninin yoğunluğu konuma göre değişir. Gezegenin dönüşü göz önüne alındığında cismin ekvatorda teğetsel hız ve merkezkaç kuvveti, ekvatordan uzak kuzey ya da güney bölgelere oranla daha fazla olur. Zürih'teki (İsviçre) Dünya'nın yerçekimi ivmesi değeri hesaplamaları için bir standart olarak kullanılan ve g = 9.80665 ($\mathrm{m\,s^{-2}}$) olan değere standart yerçekimi ivmesi denir. Ancak yerel yerçekimi ivmesi karşılığı yeryüzündeki başka bir yerde alınır ve İsviçre Zürih'te bulunan ayarla düzeltilmezse bulunan ağırlıkta bir hata olabilir. 1 kg kütleye sahip bir cisim için Tablo

2.1’de bu kavram gösterilmektedir. Ticari kütle standartları, dünya çapında ulusal standartlarda bu amaca yönelik kuruluşların yardımıyla üretilmektedir.

Tablo 2.1: 1 kg lık bir kütlenin farklı yerlerdeki değerleri.

Şehir	**Yerçekimi ivmesi (ms^{-2})**	**Kütle (g)**
Zürih, İsviçre	9.80665	1000.0g
Bogota, Kolombiya	9.77390	996.0g
Reykjavik, İzlanda	9.82265	1001.6g

Bu kuruluşların, farklı ülkelerden gelen standartların kontrol ve eşitliğinin sağlanması için sorumluluğu alması esastır. Örneğin, Avrupa genelinde kullanılan 1 kg kütle standartlarında ulusal bir platin iridyum porto tip kopyası, Fransa'da Paris yakınlarında Sevr BIPM (Bureau International des poids ve Mesures) tutulur. Tablo 2. 2 'de dünyanın diğer bölgelerinde de benzer ulusal standartlardan sorumlu kuruluşlar / enstitüler belirtilmiştir.

Tablo 2.2: Örnek metroloji enstitüleri

Kuruluş Kısaltmaları	**Kuruluşların Orjinal Adı-Ülke**	**Mail Adresleri**
ISO	International Organization for Standardization	www.iso.org
NIST	National Institute of Standarts and Technology (USA)	www.nist.gov
PTB	Physikalisch-Technishe-Bundesanstalt(Almanya)	www.ptb.de
AIST	National Institute of Advanced Industrial and Tecnology(Japonya)	www.aist.go.jp
NPL	National Physical Laboratory(UK)	www.npl.co.uk
IEN	Istituto Elettrotecnio Nazionale Galileo Ferraris(İtalya)	www.ien.it
NRC	National Reserach Council(Kanada)	http://inms-ienm.nrc-cnrc.gc.ca
METAS	Bundestamt für Metrologie und Akkreditierung (İsviçre)	www.metas.ch
CSIRO	Division of Telecommunication & Industrial Physics(Avusturalya)	www.csiro.au
NML	National Metrology Laboratory(Güney Afrika)	www.csir.co.za
NMi	Nederlands Meetinstituut(Hollanda)	www.nmi.nl

2.2 Atmosferdeki Kaldırma Kuvveti ve Tartı

Terazi, bir cismin ağırlığını ölçen bir alettir. Ancak terazi genellikle bir kuvvet işareti (örneğin Newton) yerine, kütle işaretini (örneğin kilogram) gösterir.

Terazi kalibrasyonunun prensibine bağlı olarak bir kütle standardı, terazinin tipine bağlı; elektrik gerilimi, mesafe veya açıyı okuyabilecek bir deformasyona sahip olan bir teraziye yerleştirilir. Farklı kütle standartları ile bilgi okunmasına karşılık bir kütle elde edilir. Bu yolla terazi üzerinde skala oluşturulur. Skala ile terazi, ölçüm kütlesi için bir alet olarak düşünülebilinir. Bir kalibrasyon da her çeşit ölçü aleti için,

uygun standart materyallere ve prosedürlere ihtiyaç duyulur. Herhangi bir laboratuarda bir aletin kalibrasyonunu yapmak mümkündür. Ancak, Dünyanın birçok yerinde ticarette kullanılmak üzere terazilerin kalibrasyonu veya ağırlıklarının kontrol edilmesi ulusal yasalara bağlı resmi standartlar ile resmi kurumlar tarafından sıklıkla yapılmak zorundadır.

$$\frac{G}{g} = m \tag{2.2}$$

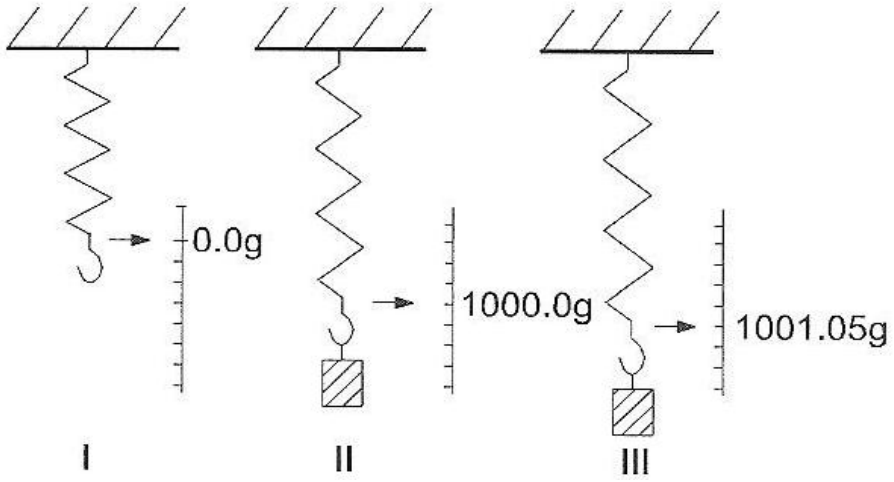
Orta çağlardan beri bir cismin ağırlığı, referans verilen bir ağırlığın çeşididir. Bu nedenle ağırlık; verilen bir kütle standardı ile basit olarak karşılaştırılır. Bu özellik dikkate alınırsa ağırlık, verilen bir cismin ağırlığıyla bir standart kütlenin ağırlığının birbirine bölünmesiyle bulunur ve sonuç boyutsuz bir sayıdır. Temel doğal sabitler ile bir kütleyi ifade edememenin bir sonucu olarak bugüne kadar olan elektronik ve mekanik terazilerin hepsinin prensibi bu şekildedir.

$$\frac{G_K}{G_B} = \frac{m_K.g}{m_R.g} = n \tag{2.3}$$

Bu denklemde G_K cismin ağırlığı (N), m_K cismin kütlesi (kg), G_B standart kütlenin ağırlığı (N), n oran, m_R standart kütlenin kütlesi (kg), g yerçekimi ivmesi ($\mathrm{g.m^{-2}}$) olarak gösterilmektedir.

Birçok ağırlık ölçümü, akışkan gaz yoğunluğuna sahip atmosferik ağırlık ile çevrili terazi ve cisim ile yapılır. Yalnızca Dünya yüzeyinde atmosferik havadan daha büyük yoğunluklu materyallerden oluşmuş cisimler dengeye ulaştığında bir kuvvet oluşturabilir. Örneğin Helyum gazı (havadan daha az yoğunluklu) ile doldurulmuş kauçuk bir balon kütlesi, terazide hareketsiz kalmayacak, atmosferin yoğunluğu ile dengede olduğu yüksekliğe doğru artacaktır. Dünyanın atmosferinin yoğunluğundan kaynaklanan yükselmesine sebep olan bu kuvvet kaldırma kuvveti olarak bilinir. Bu

atmosferik kaldırma kuvveti, vakumda olduğunda ağırlık ölçümlerinin biraz daha küçük atmosferik hava ile çevrelendiğinde bir cismin dengede kalmasına neden olur.



Şekil 2.1. 1 kg kütle ağırlıksız iken (Şekil I), 1 kg kütlenin atmosferdeki ağırlığı (Şekil II) ve 1 kg kütlenin vakumdaki ağırlığı (Şekil III).

$$m_K = m_K^* . K \tag{2.4}$$

$$K = 1 + \rho_L . \frac{\frac{1}{\rho_K} - \frac{1}{\rho_R}}{1 - \frac{\rho_L}{\rho_K}} \tag{2.5}$$

$$K \approx 1 + \rho_L . \left(\frac{1}{\rho_K} - \frac{1}{\rho_R} \right) \tag{2.6}$$

Burada m_K^* görüntülenebilir cisim kütlesi (kg), m_K gerçek cismin kütlesi (kg), ρ_L havanın yoğunluğu (kg.m^{-3}), ρ_K cismin yoğunluğu (kg.m^{-3}), ρ_R standart kütle yoğunluğu (kg.m^{-3}), K Atmosferik kaldırma kuvveti düzeltme faktörü şeklinde ifade edilir.

Tablo 2.3: Atmosferik kaldırma kuvveti düzeltme faktörlerine örnekler.

Gıda maddesi	$\frac{\rho}{\mathbf{kg.m^{-3}}}$	**K**	**m*/g**	**m$_K$**	**Fark**
Kakao yağı	915	1.00116	1000.00	1001.16	0.12%
Su	1000	1.00105	1000.00	1001.05	0.11%
Şeker	1590	1.00091	1000.00	1001.91	0.09%

Havanın yoğunluğu, CO_2'un konsantrasyonu, nem oranı, sıcaklık ve basıncına bağlıdır. Pratik amaçlar için, normal oda sıcaklığı ve deniz seviyesinde (standart koşullarda) atmosferik havanın yoğunluğu için bir yaklaşım (2.7) eşitliği ile verilir.

$$\rho_L = 3.4849 \cdot 10^{-3} \frac{p/\mathrm{Pa}}{T/K} \cdot \left(1 - 0.3780 \frac{p^*}{p}\right) \qquad (2.7)$$

Denklemde, p hava basıncı (Pa), T sıcaklık (K), p^* su buharı kısmi basıncı (Pa) şeklinde ifade edilir.

Örnek 2.1. Tahmini hava yoğunluğu

hava basıncı	$p = 10^5$ Pa
hava sıcaklığı	$20^\circ C$ ile $T = 293.15\,K$
hava nemi	$\varphi = \%50\ r.h.$
su buharı	$p^* = \varphi.p_s = 0.5 \cdot 23.27$ Pa $= 11.7$ Pa

Verilen değerler için hava yoğunluğu hesaplanırsa;

$$\rho_L = 3.4849 \cdot 10^{-3} \frac{10^5}{293.15} \cdot \left(1 - 0.3780 \cdot \frac{11.7}{10^5}\right) = 1.1887$$

$$\rho_L = 1.189\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

olarak bulunur.

Su yoğunluğu, havanın yoğunluğundan 1000 kat daha fazladır (1000 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Bu nedenle, birçok yiyecek tarımsal ve biyolojik materyallerin yoğunluk aralıkları, yaklaşık olarak $1200 \pm 300\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ civarında olan suyun yoğunluğu ile aynı mertebedir. Nişasta, selüloz, karbonhidrat ve proteinlerden meydana gelen kuru fasulye, tarımsal tahıl ve tohum gibi kuru materyaller $1400 \pm 200\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ aralığında iken yüksek su içeriğine sahip materyallerin yoğunlukları suyun yoğunluğuna daha yakındır. Bu yoğunluk aralığı havanın yoğunluğundan 1000 kez daha büyük olduğundan dolayı atmosferik kaldırma kuvveti için düzeltme faktörü yaklaşık % 0.1 olarak tahmin edilebilir.

Tablo 2.3' de $\rho_R = 8000\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ terazi kalibrasyonu için kullanılan kütle standardı yoğunluğunu ve $\rho_L = 1.2\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ hava yoğunluğu ile hesaplanan bazı örnekleri göstermektedir. Bu kütle standartları çok yoğun metallerden (pirinç, paslanmaz çelik, krom vb.) yapıldığından kalibrasyonda tutulan kütle standardının yoğunluğu birçok yiyecek materyalin yoğunluğundan çok daha büyüktür. Birçok yiyecek teknolojisi uygulamalarında atmosferik kaldırma kuvvetinin sistematik hatası çoğu zaman ihmal edilir. Çoğu zaman bu hata; kesin olmama ve ağırlık doğruluğundaki belirsizlik gibi diğer faktörler tarafından gölgelendiğinden daha büyük olabilir. Fakat kalibrasyonda

kullanılan kütle standardının üretimi ve çok pahalı materyallerin ticari pazarı da hesaba katılmalıdır.

2.3 Yoğunluk

Bir maddenin yoğunluğu, kütlesinin hacmine oranıdır. Yoğunluğu ifade etmek için standart uluslararası (SI) birimleri $\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3}$ dir.

Aynı tanım, katı, sıvı, gaz ve köpük hacimli eşya veya toz gibi düzensiz sistemler için de geçerlidir. Yoğunluğun tersine özgül hacim denir ve birimi $\mathrm{m}^{3}\cdot\mathrm{kg}^{-1}$ dir.

$$\rho = \frac{m}{V} \tag{2.8}$$

$$\frac{V}{m} = v = \frac{1}{\rho} \tag{2.9}$$

olur.

Denklemde, m kütle (kg), ρ yoğunluk ($\mathrm{kg}.\mathrm{m}^{-3}$), V hacim (m^{3}), v özgül hacim ($\mathrm{m}^{-3}.\mathrm{kg}^{-1}$) olarak ifade edilir.

2.3.1 Yoğunluğun Sıcaklıkla Değişimi

Birçok madde ısıtıldıklarında, kütlelerinde herhangi bir değişiklik olmadan hacmindeki artışla ısısal genleşmeye uğrarlar. Bu nedenle, belirli bir malzemenin yoğunluğu genellikle sıcaklığına bağlıdır. Bir malzemenin normalde hacmi sıcaklık ile

artarken, yoğunluğu genelde sıcaklıkla birlikte azalır. Bu etki, katı veya sıvı sistemlerinden gaz sistemlerindeki çok daha büyüktür.

İdeal gazlar

Pek çok mühendislik uygulamaları için ideal gaz yasası, sıcaklık ve basıncın bir fonksiyonu olarak hava yoğunluğunun hesaplanması için kullanılabilir anlamına gelir, havanın bir ideal gaz gibi davrandığı kabul edilebilir.

$$p.V = m.R_s.T \tag{2.10}$$

$$\rho = \frac{p}{R_s.T} \tag{2.11}$$

olur.

Burada, p basınç (Pa), ρ yoğunluk $(\mathrm{kg.m^{-3}})$, R_s belirli bir gaz sabiti $(\mathrm{J.K^{-1}.kg^{-1}})$, T sıcaklık (K), m kütle (kg), V hacim $(\mathrm{m^3})$ olarak ifade edilir.

Düşük sıcaklıklarda ve nemli hava halinde, ideal gaz kanunu doğruluğunu kaybeder ve hataya yol açar. Daha kesin bir şekilde su buharının, kısmi basınç ve atmosfer basıncının bir fonksiyonu olarak havadaki yoğunluğunu hesaplamak için, denklem (2.7) kullanılabilir.

Katı ve sıvılar

Sıvı ve katı maddelerin yoğunluğu sıcaklığın bir fonksiyonudur. Sıcaklık değişimi nedeniyle hacimdeki küçük değişiklikler, termal genleşme katsayısı yardımı ile hesaplanabilir:

$$\gamma = \frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dT} \tag{2.12}$$

dır.

Denklemde, γ termal genleşme katsayısı, V hacim (m^3), T sıcaklık (K) olarak ifade edilir.

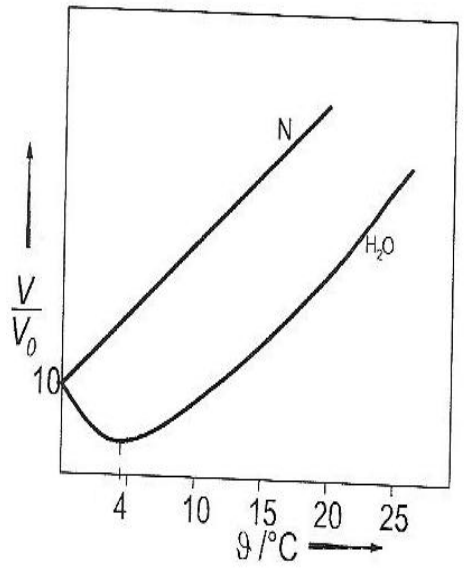
Çeşitli malzemeler için, farklı sıcaklıklarda yoğunluk değerleri tabloları (örneğin hava, su, süt için) polinom fonksiyonları ile hesaplanır.

Atmosferik basınçta suyun sıcaklığı, donma noktasının yakınındaki dar bir aralık içinde anormal davranış gösterir. Su sıcaklığının $4^o C$' den $0^o C$' ye düşürülmesi, suyun yoğunluğunu artırması yerine azaltır. Suyun bu anormal davranışı (bkz. Şekil 2.2 ve Şekil 2.3) sıvının su yoğunluk hesaplanması için BERTSCH polinom fonksiyonu (denklem (2.13)) dikkate alınır.

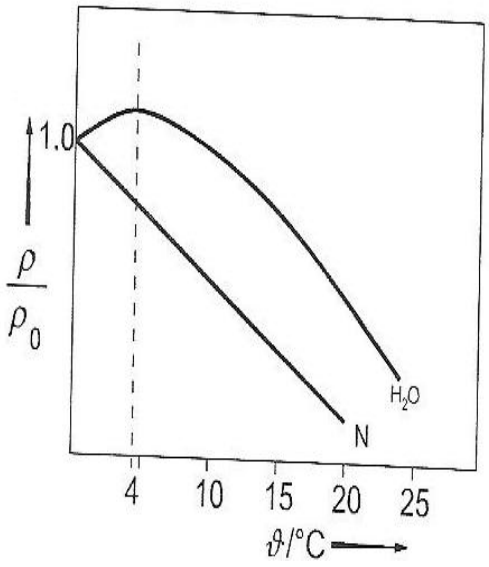
$$\begin{aligned} \rho / \mathrm{kg.m}^{-3} = 1000.22 &+ 1.0205 \cdot 10^{-2} . (\vartheta / ^{\circ}C) \\ &- 5.8149 \cdot 10^{-3} \cdot (\vartheta / ^{\circ}C)^2 \\ &+ 1.496 \cdot 10^{-5} \cdot (\vartheta / ^{0}C)^3 \end{aligned} \tag{2.13}$$

Bir başka anormallik suyun, aynı sıcaklıkta katı fazın (buz) sıvı fazdan daha düşük bir yoğunluğa sahip olmasıdır. Bu davranışın, biyosfer için önemli sonuçları vardır.

Çünkü bu sıcaklıkta yoğunluk bağımlılığı, yoğunluğu kontrol veya sıcaklığın ölçümü ve kaydı, kontrol süreci ve kalite kontrolü amacıyla gerekli olduğunda ölçülmektedir.



Şekil 2.2. Normal (*N*) ve anormal (H_2O) ısıl genleşme (şematik**)**



Şekil 2.3. Anormal su (H_2O) normal bir davranış (*N*) sıcaklık bağımlılığı ile yoğunluğunun karşılaştırılması

2.3.2 Yoğunluğun Basınçla Değişimi

Materyaller sıkıştırılabilir. Hacim, sıcaklık ve yoğunluğun yanı sıra basınç uygulanması, basınç fonksiyonunun azalmasına neden olur. Gazlar, sıvılar ve katılardan çok daha fazla sıkıştırılabilir. Normal bir sıcaklık aralığında birçok gazın ideal gazlar gibi davrandığı varsayılabilir:

İdeal gazlar

İdeal gazların yoğunluğu basınç ile doğru orantılıdır.

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T \qquad (2.14)$$

$$\frac{m}{V} = \frac{p}{R_s T} \tag{2.15}$$

$$\rho = \frac{p}{R_s T} \tag{2.16}$$

İdeal gaz yoğunluğu;

$$\rho \sim p \tag{2.17}$$

olarak alınabilir.

Hacim-basınç eğrisinin eğimi sıkıştırılabilirlik κ olarak adlandırılır. Bu, bir materyalin sıkıştırma modülü K' nın tersidir.

$$\kappa = -\frac{1}{V} \cdot \frac{dV}{dp} \tag{2.18}$$

$$\frac{1}{\kappa} = K \tag{2.19}$$

olur.

Katı ve sıvılar

İdeal sıvı ve katılar elastik bir davranış göstermektedir. Yani bir basınç uygulandığında hacminde belirli bir miktar azalma olabilir ancak basınç eski haline geldiğinde ilk hacminin tamamen aynı olacağı anlamına gelir. Bu tür malzemenin giderek artan bir basınç nedeniyle hacim değişikliği denklem (2.20)'e göre hesaplanabilir:

$$\frac{\Delta V}{V} = -\kappa \cdot \Delta p \tag{2.20}$$

Bağıl yoğunluğu:

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \left|\frac{\Delta V}{V}\right| = \left|\kappa \cdot \Delta p\right| \tag{2.21}$$

olur.

Burada, p basınç (Pa), T sıcaklık (K), R_s özgül gaz sabiti ($\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}}$), m kütle (kg), ρ yoğunluk ($\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$), V hacim ($\mathrm{m^{-3}}$), κ sıkıştırılabilirlik ($\mathrm{Pa^{-1}}$), K sıkıştırılabilirlik modülü (Pa) olarak ifade edilir.

Sıvılar ve katılarda çok düşük olarak κ sıkıştırılabilirlik, çok küçük bir hacimde azalma göstermekte ve uygulamada genellikle sıkıştırılamayan malzemeler gibi işlem görmektedir. Suyun sıkıştırılabilirlik değeri $\kappa \approx 5 \cdot 10^{-10}\ \mathrm{Pa^{-1}}$ çok düşüktür. Gıdaların, basıncı 100 MPa aralığında sıralandığı, gıdaların yapımında kullanılan yüksek basınca rağmen, suyun sıkıştırılabilirliği ihmal edilemez (Örnek 2.2 'e bakınız). Aynı zamanda sıkıştırmanın mekanik enerjisi sıcaklığa dönüştüğünden dolayı dikkate alınmalıdır (Örnek 2.3 bakınız).

Örnek 2.2. Yüksek basınç işlemleri altında su yoğunluğu değişimi

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \left|\kappa \cdot \Delta p\right|$$

Bu denklemde yoğunlukta göreceli değişiklik:

	Δp	**Sonuç**
10 bar	$\frac{\Delta\rho}{\rho} = 5\cdot10^{-10}\ \text{Pa}^{-1}\cdot10^{6}\ \text{Pa} = 5\cdot10^{-4} =$	0.05%
100 bar	$\frac{\Delta\rho}{\rho} = 5\cdot10^{-10}\ \text{Pa}^{-1}\cdot10^{7}\ \text{Pa} = 5\cdot10^{-3} =$	0.5%
1000 bar	$\frac{\Delta\rho}{\rho} = 5\cdot10^{-10}\ \text{Pa}^{-1}\cdot 100\cdot10^{6}\ \text{Pa} = 5\cdot10^{-2} =$	5.0%
10000 bar	$\frac{\Delta\rho}{\rho} = 5\cdot10^{-10}\ \text{Pa}^{-1}\cdot 1000\cdot10^{6}\ \text{Pa} = 50\cdot10^{-2} =$	50%

Bu denklemin göreceli yoğunluk değişikliği, malzemelerin sertliği veya sıkıştırma modülünü karakterize etmek için kullanılır.

Örnek 2.3. 1 kg suyun $\Delta p = 300$ MPa (3000 bar) basınçta sıkıştırma enerji girişi;

$$dW = -p\cdot dV$$

$$W = -\int p\cdot dV$$

$$W = -\int p\left(-\kappa.V\right)dp$$

$$W = \kappa\int p\cdot V\cdot dp$$

$$W = \kappa\cdot V\int p\cdot dp$$

$$W = \frac{1}{2}\kappa \cdot V \cdot p^2$$

olur.

Bu terim için boyutsal birimler:

$$\mathrm{Pa}^{-1} \cdot \mathrm{m}^3 \cdot \mathrm{Pa} = \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2} \cdot \mathrm{m}^3 = \mathrm{N} \cdot \mathrm{m}$$

$$3000\ \mathrm{bar} = 300\ \mathrm{MPa} = 3 \cdot 10^8\ \mathrm{Pa}$$

dır.

1 kg su örneği için, bu değer hesaplanacak olursa;

$$\kappa \approx 5 \cdot 10^{-10}\ \mathrm{Pa}^{-1}$$

$$\frac{W}{m} = \frac{1}{2}\kappa \cdot \frac{V}{m} \cdot p^2$$

$$\frac{W}{m} = \frac{1}{2} \cdot 5 \cdot 10^{-10}\ \frac{10^{-3}}{1} \cdot \left(10^8\right)^2 \frac{\mathrm{J}}{\mathrm{kg}} = 22.5\ \frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg}}$$

olarak bulunur.

Bu aldığı enerji karşılığında sıcaklıkta meydana gelecek değişiklik ise;

$$Q = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$\frac{Q}{m} = m \cdot c_p \cdot \Delta T$$

$$\Delta T = \frac{Q}{m \cdot c_p}$$

$$\Delta T = 22.5 \frac{kJ}{kg} \cdot \frac{1kg}{4.18\,kJ} \cdot K$$

$$\Delta T = 5.4\,K$$

değerindedir.

Bu şekilde diğer gıda maddelerinin yüksek basınç altında sıcaklık değişimleri (Patazca vd., 2007) hesaplanabilinir.

2.3.3 Özgül Ağırlık (bağıl yoğunluk)

Mutlak bir malzemenin yoğunluğunun bir örnek malzemenin yoğunluğuna oranına *d* bağıl yoğunluk adı verilir. Çoğu zaman $4°C$ veya $20°C'$ de su, bu amaca yönelik bir örnek malzeme olarak kullanılır.

ABD ve Kanada' da standart olarak su örneği kullanıldığında, "relativite yoğunluğu" terimi kullanılmaz ve "özgül ağırlık" terimi ile değiştirilir. Su hemen her zaman pratik amaçlar için dünya çapında standart olarak örnek seçilmiş olduğu için "göreli (bağıl) yoğunluk" ve "özgül ağırlık" eş anlamlı olarak kabul edilebilir.

$$d = \frac{\rho}{\rho_R} \tag{2.22}$$

Burada, *d* bağıl yoğunluk, ρ_R örnek madde yoğunluğu ($kg \cdot m^{-3}$), ρ yoğunluk ($kg.m^{-3}$) şeklinde ifade edilir.

Hem yoğunluğun hem de özgül ağırlığın (bağıl yoğunluk) aynı fiziksel özellik ile ilgili olduğunu dikkate almak önemlidir. Bununla beraber özgül ağırlık (bağıl yoğunluk) yoğunlukları oranı olarak bulunmaktadır ve daima boyutsuz bir sayıdır.

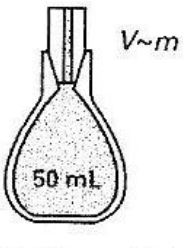
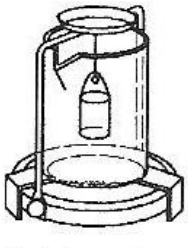
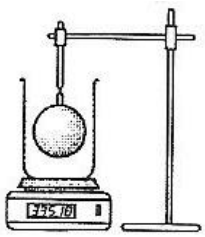
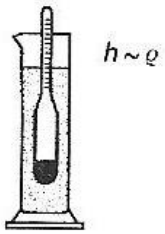
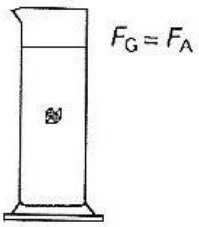
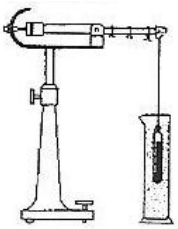
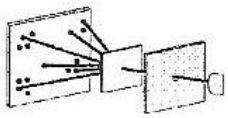
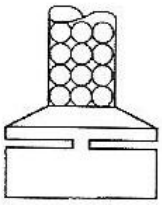
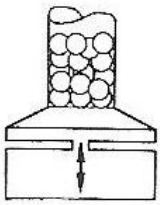
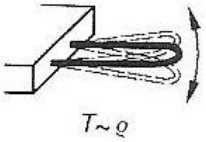
Yoğunluk ise boyutlu bir nicelik olup birimleri (örneğin $g \cdot cm^{-3}$ ya da $kg \cdot m^{-3}$) olmalıdır. Örnek materyal durumunda olan $1g \cdot cm^{-3}$ yoğunluk (bağıl yoğunluk) ya da özgül ağırlığın yaklaşık $1g \cdot cm^{-3}$ hemen hemen aynı olacağını bulmak ilginçtir (Örnek 2.4).

Örnek 2.4 Patatesin özgül ağırlığı.

Patates Yoğunluğu	**Özgül Ağırlık** $\mathbf{d = \frac{\rho}{\rho_R}}$ **ile**	
	$\rho_R = 1000\ kg \cdot m^{-3}$ (4°*C* suyun)	$\rho_R = 997.1\ kg \cdot m^{-3}$ (20°*C* suyun)
$\rho = 1000\ kg \cdot m^{-3}$		
	d=1.080	d=1.083

2.4. Yoğunluk Ölçüm Teknikleri

Tablo 2.4: Yoğunluk ölçüm teknikleri.

piknometre	hidrostatik denge	viskoz sıvılar için dalma denge	hidrometre	yoğunluk sütun gradyenti
				
sıvı-katı	sıvı-katı	sıvı	sıvı	katı parçacıklar
Mohr-Westphal Denge	x-ışını tekniği	bulk yoğunluğu	sıkıştırılmış bulk yoğunluğu	rezonatör frekans
				
sıvı	katı	katı	katı	gaz-sıvı

2.4.1 Piknometre

Bilinen bir sıvının hacminin tartılması, bu sıvının yoğunluğu ile basit bir şekilde ölçülebilir. Bu amaç için kullanılan hacmi kesin olarak bilinmeyen cam ampullere piknometre denir. Hacmi kesin olarak bilinmemekle birlikte aynı amaç için tasarlanmış ancak diğer malzemelerle (cam ampuller) yapılan yoğunluk şişesi de başka bir araç

olabilir. Cam ampul veya numune haznesinin sıvı örneği ile dikkatlice doldurulmalısı bir gösterge olacaktır. Daha sonra sıvı yoğunluğu hesaplanabilir:

$$\rho = \frac{m_F - m_0}{V} \tag{2.23}$$

Denklemde m_0 boş piknometre kütlesi (kg), V hacim (m^{-3}), m_F örnek ile dolu piknometre kütlesi (kg) şeklinde ifade edilir.

Camın termal genleşmesi nedeniyle yoğunluk şişesi hacminin sıcaklığı için sadece kalibre edilmiş olduğu bilinmektedir. Yani piknometre mutlak yoğunluğun ölçümü için, kalibre edildiği aynı sıcaklıkta olmalıdır. Başka bir yol ise mutlak yoğunluktan daha çok bağıl yoğunluğu (özgül ağırlık) ölçmektir. Bu amaçla örnek sıvı ile yoğunluk şişesi tartılır ve karşılaştırılan sıvı (genellikle su) tekrar tartılır. Her iki ağırlığın oranı ya da numunenin özgül ağırlığı d bağıl yoğunluğu verir.

$$\frac{m_F}{m_W} = \frac{m_F \cdot V}{V \cdot m_W} = \frac{\rho_F}{\rho_W} = d \tag{2.24}$$

olur.

Denklemde m_F örnek ile dolu piknometre kütlesi (kg), ρ_F örnek yoğunluğu ($\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$), d örnek bağıl yoğunluğu (özgül ağırlık), ρ_W su yoğunluğu ($\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$), m_W su ile dolu piknometre kütlesi (kg), V hacim (m^3) olarak ifade edilir.

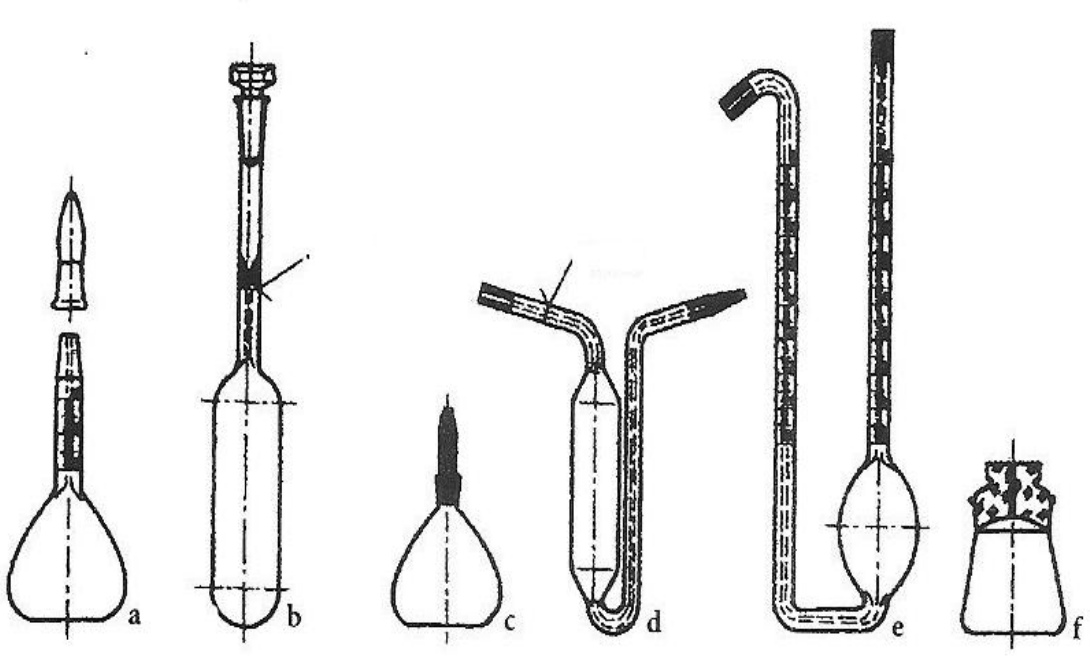
İkinci yaklaşımın avantajı, piknometrenin ne boş ağırlığı ne de hacminin bilinmesi gerekiyor. Bu durumda örnek numune ile karşılaştırılan numunenin tartılması aynı sıcaklıkta yapılmalıdır. Piknometre ayarının sıcaklığını ayarlamak üzere hiçbir imkân yoksa uyum sağlamak için cihazın bağıl yoğunluk (özgül ağırlık) ölçmek için kullanılır olması gerekir. Bu durumda, gerçekleştirilen örnek tartım ve referans malzeme tartılması aynı sıcaklıkta olmalıdır.

Numunenin *d* bağıl yoğunluğu veya özgül ağırlığı ile referans malzeme yoğunluğu da biliniyorsa, örnek numunenin yoğunluğu hesaplanabilir:

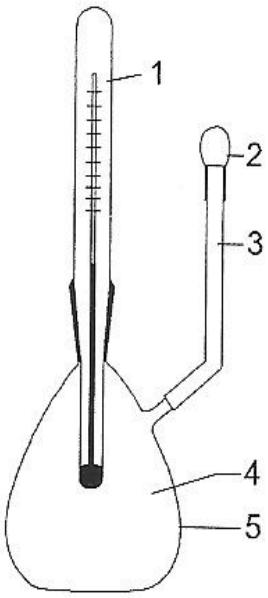
$$\rho_F = d \cdot \rho_W \tag{2.25}$$

Bir tartı sonucunda atmosferik kaldırma kuvveti etkisi düzeltilebilir. Bir cismin düzeltilmiş kütlesi, gerçek kütlesi ve dengesini gösteren kütlesinden biraz daha yüksektir. Yoğunluğu hesaplamak için gerçek bir kütle kullanıldığında, buna gerçek yoğunluk adı verilir.

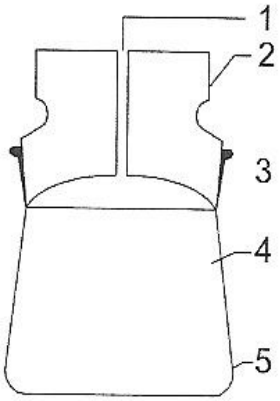
Atmosferik kaldırma kuvvetinin doğrulanması uygulanır değilse, sonucu belirgin bir kütle denilen, belirgin bir yoğunluk olabilir. Bağıl yoğunluk, hem örnek hem de referans malzeme için aynı piknometre ile ölçülür. Ağırlık oranı oluşturarak, kaldırma kuvvetinin etkisi ortadan kalkar. Şekil 2.4 ve Şekil 2.5 cam piknometrelerin farklı tasarımlarını gösterir.



Şekil 2.4. Piknometre tasarımları: (a) Reischauer, (b) Bingöl, (c) Gay-Lussac, (d) Sprengel, (e) Lipkin, (f) Hubbard.



Piknometre: 1.termometre, 2.başlık, 3.kılcal damar, 4.örnek numune, 5.cam ampul.



HUBBARD piknometresi: 1.kılcal damar, 2.cam kapağı, 3.geniş ve çıkarılabilen kapak, 4.örnek numune, 5.cam ampul.

Şekil 2.5. Piknometre örnekleri.

2.4.2 Hidrostatik denge (kaldırma kuvveti)

Hidrostatik denge ilkesi, ARCHIMEDES kaldırma kuvveti kanuna dayanmaktadır. Bir cisim, sıvıya batırılmış ise kaldırma kuvveti nedeniyle ağırlığı düşer. Suya daldırılmış cismin kaldırma kuvveti hacmi ve sıvı yoğunluğu ile doğru orantılıdır. Kaldırma kuvveti dengesi ölçümü ile cismin hacmi oldukça doğru bir şekilde tespit edilebilir ve ölçülen cismin kütlesi ile birlikte yoğunluğu da elde edilir. Bu tip ölçüm yapmak için basit bir yöntem, ekranda sıfır okumak için tared-out beher su ve ağırlığı ile üstten yüklemeli bir denge üstüne kısmen su ile dolu bir beher yerleştirmektir. Sonra, katı bir cismi ne alt ne de beher tarafına dokunmamasına dikkat ederek, su yüzeyinin altına tümüyle daldırılır. Denge ekranında gösterilen okuma

ağırlığı, katı cisim tarafından yerinden edilmiş su hacminin ağırlığı olacaktır. Suyun yoğunluğu bilinir olduğundan, katı bir cismin hacmi kesin belirlenir.

$$\frac{m_L}{V_K} = \rho_K$$

ve

$$F_A = \rho_F \cdot V_K \cdot g \tag{2.26}$$

Δm cismin suya batma sonrasında ve öncesi ağırlığı arasındaki fark (kg) olmak üzere:

$$\Delta m = m_L - m_F \tag{2.27}$$

$$F_A = \Delta m \cdot g \tag{2.28}$$

$$V_K = \frac{(m_L - m_F)\,g}{\rho_F \cdot g} = \frac{m_L - m_F}{\rho_F} \tag{2.29}$$

$$\rho_K = \frac{m_L}{m_L - m_F} \cdot \rho_F \tag{2.30}$$

şeklinde elde edilir.

Denklemde m_L cismin havadaki kütlesi (kg), V cismin hacmi (m^3), m_F sıvı ile temas eden cismin kütlesi (kg), ρ_F sıvının yoğunluğu ($\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$), F_A kaldırma kuvveti (N), ρ_K cismin yoğunluğu, g yerçekimi ivmesi ($\mathrm{m \cdot s^{-2}}$), d bağıl yoğunluk ifade etmektedir.

Yani bir cismin yoğunluğu suya batma öncesinde ilk ağırlığı alınarak (hava ağırlığında) ve onun, bilinen bir sıvı ağırlığı ile teması kullanılarak yoğunluk ρ_F elde edilir.

$$\frac{\rho_K}{\rho_F} = \frac{m_L}{m_L - m_F} \tag{2.31}$$

cismin *d* bağıl yoğunluğu (özgül ağırlık);

$$d = \frac{\rho_K}{\rho_F} \tag{2.32}$$

ya da

$$d = \frac{m_L}{m_L - m_F} \tag{2.33}$$

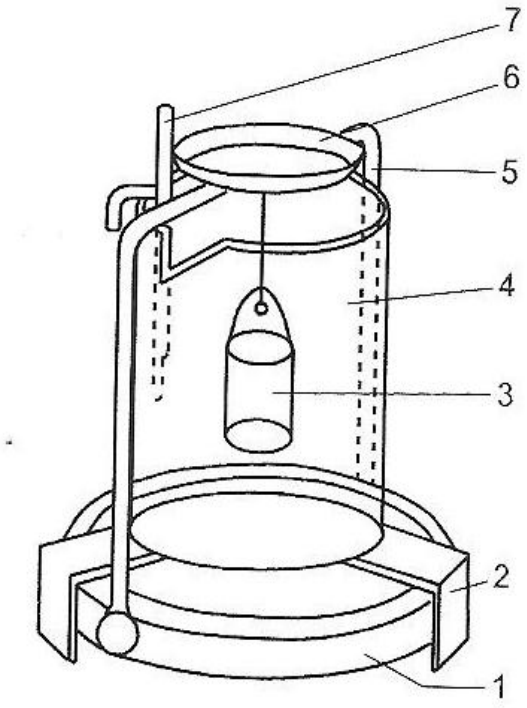
şeklinde ifade edilir.

m_L hava ağırlığı atmosferik yüzerlik için düzeltilmiş ise, hidrostatik tartım ile elde edilen cismin yoğunluğu görünür yoğunluk alınabilinir. Bu düzeltmeyi yaparsak, daha sonra m_L ve ρ_K nin gerçek kütle ve gerçek yoğunluk olması biraz daha yüksektir.

Öte yandan bir cismin hacmi bilinir bir sıvı ile teması, hava ve yerinden edilmiş sıvı ağırlığı cismin ağırlığı arasındaki fark cismin sıvı yoğunluğunu belirlemek için kullanılır. Denklem (2.34) ile hesaplanır:

$$\rho_F = \frac{m_L - m_F}{V_K} \tag{2.34}$$

Uygun özel bir tasarımla hidrostatik denge katı bir cismin hacmi ile birlikte kullanıldığında, bir katı yoğunluğu veya hazne içindeki sıvının yoğunluk ölçümü kesin olarak bilinmemektedir.



Şekil 2.6. Hidrostatik denge tasarımı: 1. Denge, 2.platform, 3.küçük beher, 4.büyük beher, 5.destek aparatı, 6.tava, 7.termometre.

Büyük beherdeki bilinen sıvı yoğunluğuna bir örnek cisim hacmi ile sıvı yoğunluğu elde etmek için ilk tava (kap) yerleştirilir ve hava ağırlığı ölçülür. Sonra örnek cisim, küçük behere yerleştirilir sıvı ile teması ile tekrar tartılır. Sonra sıvı yoğunluğu denklem (2.34) kullanılarak hesaplanır. Sıcaklık kontrol ve kayıt altına alınmalı, böylece bu sıvının yoğunluğunun, sıcaklığa bağlı olduğu unutulmamalıdır. Burada hidrostatik bir denge prensibi uygulamasına iki örnek aşağıda verilmiştir.

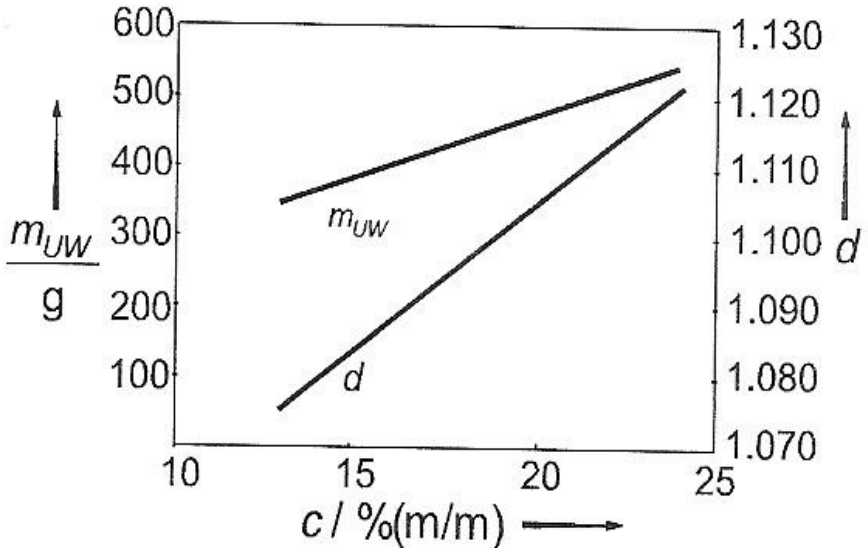
Örnek Mısır tanesi nişastası

Ziraatçılar mısır olgunluğu dereceleri tespit etmiş ve tepe olgunluğunun 1.080 ve 1.118 arasında bir özgül ağırlık aralığında (bağıl yoğunluk) beklendiğini ve mısır taneleri yoğunluğu (veya özgül ağırlık) ile yakından ilişkili olduğunu ifade etmişlerdir. Bu aralığın altındaki değerler yetersiz olgunluğu işaret eder, değerlerin üzerinde mısır tepe olgunluğu ötesine geçtiğinin belirtisidir.

Örnek Patates Nişastası

Başka bir uygulama patates işleme tesisine gelen bir patates kalitesini kontrol etmek içindir. Patates yoğunluğunda nişasta içeriği bir fonksiyondur. Bir sepet ağırlığında patates hava ile ve sonra su ile temas ederek, nişasta içeriği hızlı bir şekilde tahmin edilebilir.

Şekil 2.7' deki diyagram, patates ve onun içerisinde ki nişasta ile arasındaki ilişkiyi gösterir.



Şekil 2.7. Patatesin *d* bağıl yoğunluğuna karşılık nişasta içeriği (5050 gr patates için (http://europa.eu.int/eur-lex/hu/dd/docs/1999/31999R2718-HU.doc)).

Materyalin G_L havadaki ağırlığı ile F_A sualtında etkiyen kaldırma kuvveti arasındaki fark, G_{UW} sualtındaki ağırlığına eşittir.

$$G_{UW} = G_L - F_A \tag{2.35}$$

bundan dolayı

$$m_{UW} = m_L \cdot \rho_F \cdot V_K \cdot g \tag{2.36}$$

örneğin hacmi

$$V_K = \frac{m_L - m_{UW}}{\rho_F} \tag{2.37}$$

örneğin yoğunluğu

$$\rho_K = \frac{m_L}{V_K} = \frac{\rho_K \cdot m_L}{m_L - m_{UW}} \tag{2.38}$$

ve bağıl yoğunluk

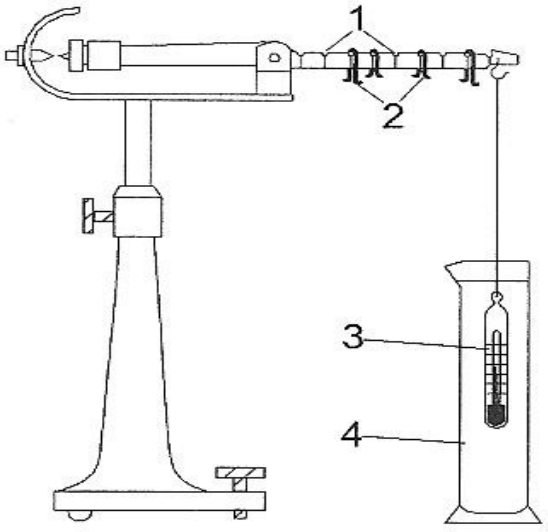
$$d = \frac{\rho_K}{\rho_F} = \frac{m_L}{m_L - m_{UW}} \tag{2.39}$$

olarak elde edilir.

Denklemde g yerçekimi ivmesi ($\mathrm{m \cdot s^{-2}}$), d örnek bağıl yoğunluğu (özgül ağırlık), G_{UW} sualtı ağırlık kuvveti (N), m_L örnek hava kütlesi (kg), G_L hava ağırlık kuvveti (N), ρ_F örnek sıvı yoğunluğu ($\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$), m_{UW} numune ile temas eden belirgin kütle (kg), V_K örnek hacim ($\mathrm{m^3}$) olarak ifade edilir.

2.4.3 Mohr-Westphal Dengesi

Mohr-Westphal dengesi hidrostatik başka bir tür dengedir. Sıvıların yoğunluğunu ölçmek için simetrik olmayan bir kiriş denge olarak tasarlanmıştır.



Şekil 2.8. Mohr-Westphal denge: 1. kiriş, 2. ağırlıklar, 3. cisim kaldırma kuvveti, 4. sıvı örneği.

Kaldırma kuvveti cismi normal camdan yapılmış ve yerleşik bir termometre olabilir. Sonra cisim ilgili kaldırma kuvveti ile sıvı içine daldırılmıştır. Kolun dengesi geri dönene kadar sıfırdır. Kaldırma kuvveti gittikçe küçük ağırlıklar ekleyerek ölçülebilir. Ölçü, bir referans sıvı olarak su ile tekrarlanır. Sıvı okuma oranı hem göreli yoğunluğu hem de özgül ağırlığın bulunmasını sağlar.

Kaldırma kuvveti:

$$F_A = \rho \cdot V \cdot g \tag{2.40}$$

$$F_A = m \cdot g \tag{2.41}$$

sıvı ile

$$F_{A,B} = \rho_F \cdot V_K \cdot g = m_F \cdot g \tag{2.42}$$

ve başvuru malzemesi olarak su ile

$$F_{A,W} = \rho_F \cdot V_W \cdot g = m_W \cdot g \tag{2.43}$$

olur, böylece bunların oranı

$$\tau = \frac{m_F}{m_W} \tag{2.44}$$

olur.

Cam gövde hacmi okumaları için aynı olduğundan,

$$\tau = \frac{m_F}{m_W} = \frac{m_F \cdot V}{V \cdot m_W} = \frac{\rho_F}{\rho_W} = d \tag{2.45}$$

böylece özgül ağırlığı sadece:

$$d = \frac{m_F}{m_W} \tag{2.46}$$

olur.

Denklemde m kütle (kg), W örnek malzeme için indis (çoğunlukla su), V hacim (m^3), τ suya daldırılmış ağırlıklar oranı, F_A kaldırma kuvveti (N), d bağıl yoğunluk (özgül ağırlık), ρ yoğunluk ($\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$), F akışkan için indis, g yerçekimi ivmesi ($\mathrm{m \cdot s^{-2}}$) şeklinde ifade edilir.

Sonuç sıcaklık ölçümü ile birlikte kayıt altına alınmalıdır. Genellikle her iki okumaları $20°C$ de alınır ve sonuç $d_{20/20}$ olarak yazılır. 4°C su yoğunluğu karşılaştırıldığında sıvı yoğunluğu miktarı $d_{20/4}$ anlamına gelir.

$$d_{20/20} = \frac{\rho_{F,20°C}}{\rho_{W,20°C}}$$

$$d_{20/4} = \frac{\rho_{F,20\circ C}}{\rho_{W,4\circ C}}$$

Mohr-Westphal denge yoğunluğu ölçmek için kullanılan yoğunluğu ile bilinen bir sıvı ile temasına bir örnek olabilir. Örnek hacmini hesaplamak için denklem (2.37) kullanılır.

2.4.4 Hidrometre

Hidrometreler (bazen areometrede denir) bir şamandıra şekli ile birlikte içi boş bir cam alettir. Hidrometre bir sıvının yoğunluğuna bağlı olarak daha yüksek veya daha düşük bir pozisyonda yüzer. Hidrometrenin yüzen cam gövdesinin batmayan kısmında, saat okumak için ölçek vardır.

Hidrometre yüzen derinliği, konumuna, ağırlığa ve ara yüzey kuvvetine bağlıdır.

$$F_G + F_\sigma = F_A \tag{2.47}$$

yani

$$m \cdot g + \sigma \cdot \pi \cdot d = V_S \cdot \rho \cdot g \tag{2.48}$$

dir. Böylece

$$m \cdot g + \sigma \cdot \pi \cdot d = \left(V - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h \right) \cdot \rho \cdot g \tag{2.49}$$

Hidrometre olmayan suya daldırılmış parçasının uzunluğu:

$$h = \frac{4}{\pi \cdot d^2} \cdot \left(V - \frac{m \cdot g + \sigma \cdot \pi \cdot d}{\rho \cdot g} \right) \tag{2.50}$$

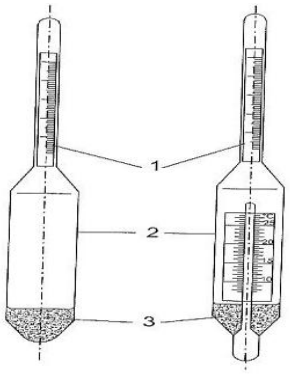
olduğu anlamına gelir ve

$$h = fonksiyon(\rho)$$

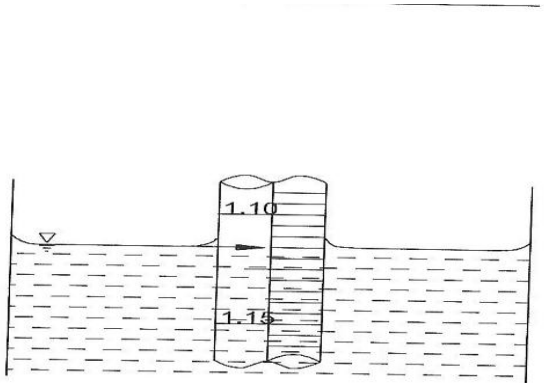
dır.

Su altında olmayan hidrometre uzunluğu, bir ölçek yardımı ile hidrometrenin üst kısmında okunabilir. Hidrometre altındaki ağırlığını, dikey olarak bu sıvı içinde sağlamak amacıyla, bir yelkenli gemi omurgası gibi davranır.

Ölçek yoğunluğu birimleri, doğrudan kalibre edilmiş yada, konsantrasyon birimleri olabilir. Özel ölçekler ile hidrometreler şeker çözümleri (sakarimetre), alkoller (alkol metre), asitler (asit hidrometre), tuz çözeltileri (BAUME hidrometre), süt, (QUEVENNE laktometre), idrar denetleyicisi gibi özel sıvı- gaz- hava ölçüm cihazı, vb. uygulamaları için kullanılabilir.



Şekil 2.9. Hidrometre: 1.ölçek, 2.gövde (termometre olan ve olmayan), 3.salma.



Şekil 2.10. Sıvı yüzeyin de hidrometre skalasının okunuş örneği.

Bazen iki fiziksel özelliği kombinasyonu, bir süreç ya da bir ürün hakkında gerekli bilgileri verir. Örneğin, biranın yoğunluk ve kırılma indisinin her ikisinin de bilinmesiyle, fermantasyon gelişimi ve alkol içeriği hesaplanabilir (Rauscher vd., 1986).

Burada m hidrometre kütlesi (kg), σ ara yüzey gerilimi ($\mathrm{N \cdot m^{-1}}$), V hidrometrenin toplam hacmi ($\mathrm{m^3}$), d hidrometrenin boyun çapı (m), V_S hidrometre temas hacmi ($\mathrm{m^3}$), ρ sıvı yoğunluğu ($\mathrm{m^{-3}}$), F_A kaldırma kuvveti (N), g yerçekimi

ivmesi($\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-2}$), F_σ ara yüzey gerilme kuvveti (yüzey gerilim kuvveti) (N) olarak alınmıştır.

Ara yüzey gerilimi etkileri dikkate almadan hidrometre denklemini kolaylaştırırsak;

$$h = \frac{4}{\pi \cdot d^2}\left(V - \frac{m}{\rho}\right) \tag{2.52}$$

şeklini alır.

Hidrometrede ara yüzey gerilimi etkileri dikkate alınmadan denklem kolaylaşır. Ara yüzey gerilimi için L (düşük,$15-35\,\mathrm{mN}\cdot\mathrm{m}^{-1}$), M (orta, $35-65\,\mathrm{mN}\cdot\mathrm{m}^{-1}$) ve H (yüksek, daha yüksek değerler için) olarak adlandırılan farklı bir dizi kategorilerde sunulan düzeltilmiş hidrometreler vardır.

2.4.5 Daldırma tekniği

Piknometreler ve hidrometreler yüksek viskoziteli sıvılar ile çok iyi bir sonuç vermez. Yüksek viskoz sıvılar için yoğunluk ölçümü batırma tekniği ile yapılabilir. Bir beherdeki viskoz sıvı örneği ile bir denge alınır. Gösterge değeri kaydedilir veya ekran sıfır (dara) olarak ayarlanmış olabilir. Sonra bir test cisim hacmi bilinen numunenin içine batırılır. Sonra batırılmış test cisim tarafından kaynaklanan belirgin bir artış ağırlık Δm olarak kaldırma kuvveti dengesi ve ekranda aktarılan bir karakter belirir. Suya daldırılmış katı bir cismin bu artan ağırlığı, kaldırma kuvveti ve yer değiştiren sıvının hacmine eşit ağırlığıdır.

$$\Delta G = F_A \tag{2.53}$$

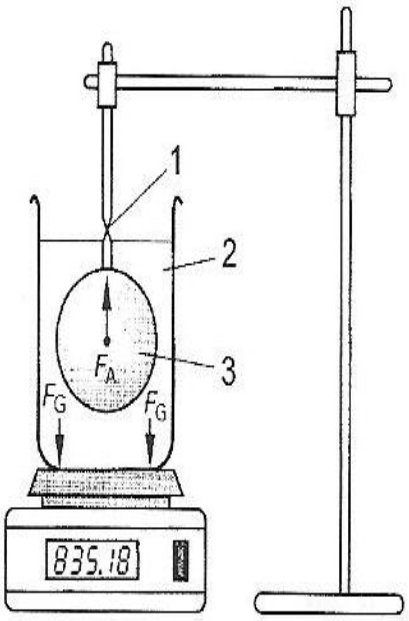
ve

$$\Delta m \cdot g = \rho \cdot V_K \cdot g \tag{2.54}$$

dır.

Denklemde ΔG görünen ağırlık artışı (kg), V_K test cismin hacmi (m^3), Δm görünen kütle artışı (kg), ρ sıvının yoğunluğu ($\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^{-3}$) olarak ifade edilir.

Hassas ölçüm için, kaldırma kuvveti ile içi boş metal küre cisim hacmiyle kalibre edilebilir. Bağlantı çubuğun kaldırma kuvveti hatalarını önlemek için, şekilde çubuğun batırılmış bölümünde kalibre edilen hacminin batırılmasının hesabında en uygun derinlik konumunu gösteren çubuk üzerinde bir derinlik işareti normalde bulunmaktadır.



Şekil 2.11. Yoğunluk ölçümü için daldırma tekniği: 1.derinlik işareti,2.sıvı örneği 3.kaldırma kuvveti.

2.4.6 Yüzen parçacık tekniği

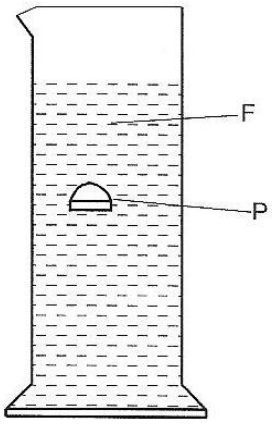
Bir katı parçacık, sıvı ve katı parçacık her ikisi de aynı yoğunlukta olduğu zaman (ne yüzeyinde yüzerek yükselir ne de altındaki geri kalanı batacağı anlamına gelir) bir sıvı içinde asılı kalacaktır. Ardından aşağıya doğru hareket eden parçacık kaldırma kuvveti ile asılı kalacaktır. Yüzen yöntemi ile yoğunluğu ölçmek için, biri düşük ve diğeri daha yüksek iki farklı sıvı yoğunluğu seçilmiş olmalıdır. Ayrıca her iki sıvı birlikte karıştığı zaman birbirleriyle karışabilir ve parçacığın gözlemleyebilmek için sıvılar içine yerleştirildiği zaman görsel olarak saydam kalması gerekir. Parçacık üzerinde herhangi bir olumsuz bir etkiye sahip olmamalıdırlar. Parçacığın çözünmez ya da bir şekilde değiştirilmemiş olduğu anlamı, sıvının parçacık üzerinde herhangi bir olumsuz etkiye sahip olmadığını ifade eder. Tablo 2.5 'te bu amaç için uygun sıvılar listelenmiştir.

Tablo 2.5: Yüzen tekniği için örnek sıvılar (Lide, 2006).

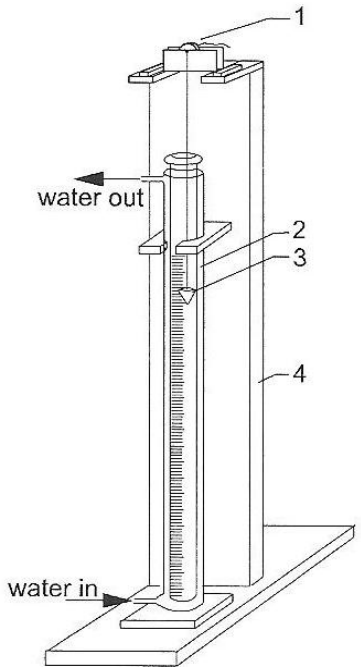
Sıvı	**(20°C) de Yoğunluk ($kg \cdot m^{-3}$)**
Su	998.2
Sulu sakkoroz çözeltisi $\%50(m/m)$	1229.5
Sulu NaCl çözeltisi $\%20(m/m)$	1147.8
Etanol $\%90(m/m)$	818.0

İlk önce yoğunluğu bilinmeyen katı parçacıklar, düşük yoğunluklu kısmen dolu bir behere yerleştirilir. Sıvının yoğunluğu parçacığa göre daha düşük olduğundan, beherin (kabın) dibinde batması gerekir. Ardından, az miktarda yüksek yoğunluklu sıvı sadece parçacığın yukarı yüzmeye başlayıp asılı kalıncaya kadar eklenir ve yavaşça karıştırılır (Şekil 2.12). Bu nokta sıvının karışımı ve katı numune yoğunluğu aynı olduğu zamandır.

Örneğin Piknometre yöntemi ile sıvı karışımının yoğunluk ölçümünden, katı parçacık numunesinin yoğunluğu bilinir. Sıvı yüzen yöntemini tarım ürünlerinin yoğunluğunu ölçmek için kullandığımızda, gıda ürünlerinin 900 ve 1500 $kg \cdot m^{-3}$ arasında değişen yoğunluklarda olması gerekir. Örneğin su ve alkol karışımı ile şeker çözeltileri ya da tuz çözeltileri ile bu aralıkta yoğunlukları elde edilebilir doğru sonuçlar vermesi için sıvı karışımın sıcaklığı sabit tutulmalıdır. Eğer bu çok kolay yapılabilirse, böylece yüzen tekniğini gerçekleştirmek için sabit veya kontrollü bir sıcaklıkta olup olmadığından emin olmaya gerek yoktur. Yüzen teknik hidrostatik bir denge içinde ele alınamaz, katı örnekler için önerilir. Örnek sulu çözeltiler içinde çözülür veya değişebilir ise sorunlar ortaya çıkabilir. Buna neden olan örnekleri paketlemeli ya da kaplamalı veya başka bir sıvı tercih edilmelidir.



Şekil 2.12. Yüzer teknik: Örnek P sıvı F içinde askıdadır.



Şekil 2.13.Yoğunluk sütun gradyenti (Mohsenin, 1986): 1. hız ölçer, 2.su ceketi, 3.yükselen sepeti, 4.destek.

2.4.7 Yoğunluk sütun gradiyenti

Yüzen tekniğinin ilginç bir varyasyonu, tarım tohum ve tahıllar gibi küçük katı parçacıkların yoğunluğunun belirlenmesi için hızlı ve doğru yöntem olarak bir yoğunluk sütun gradiyenti kullanımıdır. Yöntem Şekil 2.13 'de gösterildiği gibi bir derinliği gözlemlemeye dayanan parçacık sıvı içinde asılı kalacak, uzun boylu bir sütunda sütun derinliği boyunca yoğunluğu kademeli bir değişiklik sergilemektedir. Sütun öncelikle yüzen yöntemlerinde kullanılan benzer farklı yoğunluklarda karışabilir saydam iki sıvı farklı oranlarda karışım katmanları ile dikkatlice doldurarak hazırlanmıştır. Alt kısmındaki ilk katmanı yüksek yoğunluklu sıvı oluşturacaktır. Bir sonraki katman, %80 yüksek yoğunluklu %20 düşük yoğunluklu bir katman tarafından, % 10 düşük yoğunluklu sıvı ve %90 yüksek yoğunluklu sıvının bir karışımı olacaktır ve üst katman düşük yoğunluklu sıvıdan oluşacaktır. Bu şekilde, sütun üstündeki düşük yoğunluklu altındaki yüksek yoğunluklu arasında değişen kademeli yoğunluğu kadar bir gradyan sergileyecektir. Sütun normalde bilinen bu yoğunluğu renk kodlu cam boncuklar ile kalibre edilmiş olarak, ticari amaçla kullanılabilir. Kalibrasyon boncukları sütuna düşürülürse ve her bir boncuk sıvı yoğunluklu boncuk gibi aynı derinlikte asılı durur. Sütun kalibrasyonu için bir grafikte boncuk yoğunluğu yerine sütun derinliği alınmaktadır. Yoğunluğu bilinmeyen küçük parçacıklar sütuna bırakılır. Bunlar sıvı yoğunluğu ile aynı ise bu derinlikte asılı duracaklardır.

Bu derinlikte, sütun üzerinde dereceli ölçek okunur. Bu derinlikte yoğunluğu verecek kalibrasyon grafiğinde, parçacık yoğunluğu elde edilir. Tablo 2.6 çeşitli sıvı karışımların bir yoğunluk sütun gradyenti hazırlanması için uygun bir listesini verir.

Tablo 2.6: Yoğunluk sütun gradyenti için uygun sıvılar.

Sıvı	**Özgül Ağırlık**
İsopronal-su	0.790 için 1.00
İsopronal glikol	0.790 için 1.11
Su-kalsiyum nitrat	1.00 için 1.60

2.4.8 Resanator frekans teknikleri

İlgilenilen sıvı titreşen bir, rezonans frekansı, sıvı yoğunluğuna bağlıdır. Yani, elektronik araçlar ve uygun kalibrasyon ile titreşen bir tüpün rezonans frekansını bir monitör ile izleyerek bir sıvının yoğunluğunu ölçmek mümkündür.

Çırpma

Çırpma dondurma ya da çırpılmış süt hacmini arttırmak (şişkinlik) için işlem sırasında dondurmanın havayla karıştırılmasını ifade etmekte kullanılan bir terimdir. Çırpma işleminde hava köpüklenmeye sebep olur. Yoğunluk, köpüklenme derecesi ile ilgili önemli bir süreç parametresidir. Köpüklenme sıvının ilk hacminin artmasına ve çırpılmış sıvının hacminde bir artışa sebep olur. Bu hacim artışının orijinal hacme bölünmesine, çırpma *A* denir. Boyutsuz bir oran olup ve matematiksel olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$A = \frac{V_{köpük} - V_{SIVI}}{V_{SIVI}} \tag{2.56}$$

alındığında

$$m_{köpük} = m_{SIVI} + m_{gaz} \approx m_{SIVI} \tag{2.57}$$

ve

$$m = m_{köpük} \approx m_{SIVI} \tag{2.58}$$

ile

$$\frac{1}{\rho} = \frac{V}{m}$$

$$A = \frac{\frac{m}{V_{köpük}} - \frac{m}{V_{SIVI}}}{\frac{m}{V_{SIVI}}} \tag{2.59}$$

$$A = \frac{\frac{1}{\rho_{köpük}} - \frac{1}{\rho_{SIVI}}}{\frac{1}{\rho_{SIVI}}} \tag{2.60}$$

$$A = \frac{\rho_{SIVI}}{\rho_{köpük}} - \frac{\rho_{SIVI}}{\rho_{SIVI}} \tag{2.61}$$

ve

$$A = \frac{\rho_{SIVI}}{\rho_{köpük}} - 1 \tag{2.62}$$

olur.

Denklem (2.62) boyutsuz bir oran verir. Eğer çırpma % yüzde olarak hesaplanacak olursa denklem (2.63) kullanılır.

$$A için \% = \left(\frac{\rho_{SIVI}}{\rho_{köpük}} - 1 \right) \cdot 100 \tag{2.63}$$

olur.

Denklemde A çırpma, V hacim (m^3), m kütle (kg), ρ yoğunluk ($\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$) şeklinde gösterilmiştir.

Örnek 2.8. Dondurmanın Çırpılması

Dondurmanın = 550 $\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$ ve buz karışımı =1150 $\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$ değerleri verilerek, dondurma için denklem (2.62) kullanılmış ve çırpma değeri yüzde olarak hesaplanmıştır.

$$A = \left(\frac{\rho_{SIVI}}{\rho_{köpük}} - 1 \right) \cdot 100\ \%$$

$$A = \left(\frac{1150\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}}{550\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}} - 1 \right) \cdot 100\ \% = 109\ \%$$

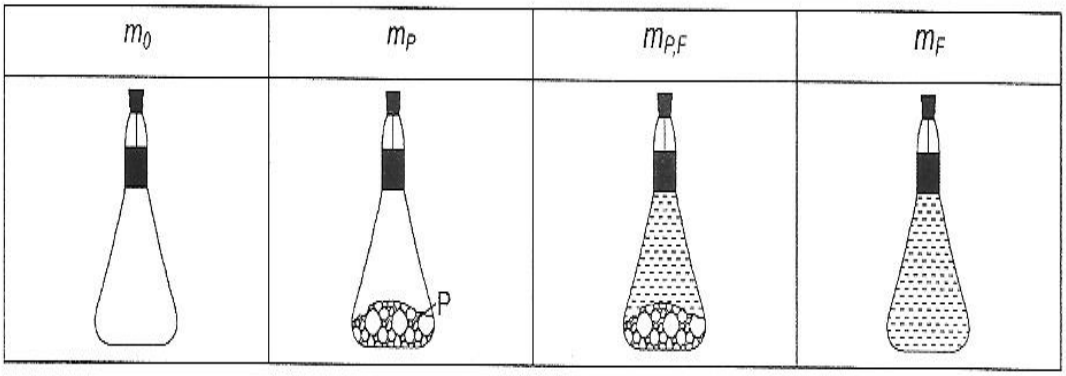
Katıların yoğunluğu

Bulk (yığın) gıda ve besinlerden oluşan katı maddeler ve birçok tarımsal materyallerin küçük parçacıklarından oluşmuş taneli materyallerin (tahıl, yemek ve tozlar) bir formudur. Diğer taraftan eğer katı parçacıkları gazlar ya da sıvılarla doldurulmuş gözenek ya da boşluklar içeriyorsa, bu katının yoğunluğuna katkıda bulunur. Gözenek ya da boşluklar doldurulduğunda, onların açık yada kapalı olup olmadığı önemlidir. Eğer onlar kapalı ise, bunun anlamı tamamı ile katı parçacıklara yerleşmiştir ve onlar katıya aittir. Eğer onlar açık ise, parçacık yüzeyine çevrelenmişse (örneğin atmosfer), onlar katıya ait değildir. İletişim hatalarından kaçınmak için katıların yoğunluğu "gözeneksiz hacim" ya da "gözenek içeren hacim" gibi bir not ile verilmelidir. Bir sistemin sınırlarının nasıl tanımlandığını öğrenmek faydalı olabilir ve yoğunluk aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$\rho = \frac{m_S}{V_S} \tag{2.8}$$

Denklemde m_S katı materyalin kütlesi (kg), ρ katının yoğunluğu ($\mathrm{kg \cdot m^{-3}}$), V_S katı materyalin hacmi ($\mathrm{m^3}$) olarak ifade edilir.

Katı parçaların yoğunluğunun ölçümü onun kütlesi bilindiğinden çoğunlukla hacminin ölçülmesi anlamına gelir. Açık gözenekler olmaksızın katı örneklerinin hacminin elde edilmesi için uygun sıvı ile yoğunlukölçer tekniği kullanılabilir. Bu katıların bir sıvı içersinde çözülmemesi ve değişmemesi gerekmektedir. Bu amaç için, düzenek Şekil 2.14' te gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Piknometre ile katı granül bir toz malzemenin yoğunluk ölçümü.

Bu yöntem yardımıyla katı maddenin yoğunluğu hesaplanabilir.

$$\rho = \frac{m_S}{V_S} \tag{2.8}$$

$$m_S = m_p - m_0 \tag{2.64}$$

$$V_S = V_0 - V_F \tag{2.65}$$

$$V_F = \frac{m_{p,F} - m_p}{\rho_F} \tag{2.66}$$

$$\rho_S = \frac{m_p - m_0}{V_0 - \dfrac{m_{p,F} - m_p}{\rho_F}} \tag{2.67}$$

$$\rho_S = \frac{m_p - m_0}{\dfrac{m_F}{\rho_F} - \dfrac{m_{p,F} - m_p}{\rho_F}} \tag{2.68}$$

$$\rho_S = \rho_F \frac{m_p - m_0}{m_F - m_{p,F} + m_p} \tag{2.69}$$

$$d = \frac{\rho_S}{\rho_F} \tag{2.70}$$

$$d = \frac{m_p - m_0}{m_F - m_{p,F} + m_p} \tag{2.71}$$

olur.

Burada m_0 boş piknometre kütlesi (kg), V_0 piknometrenin hacmi (m^3), m_S örnek kütle (kg), V_S örnek hacmi (m^3), m_p numune ile dolu piknometre kütlesi (kg) ρ örnek yoğunluğu ($\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3}$), $m_{p,F}$ numune ve referans sıvı ile dolu piknometre kütlesi (kg), m_F sadece referans sıvı ile dolu piknometre kütlesi (kg), V_F referans sıvının piknometredeki hacmi (m^3), ρ_F referans sıvı yoğunluğu ($\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3}$) şeklinde ifade edilir.

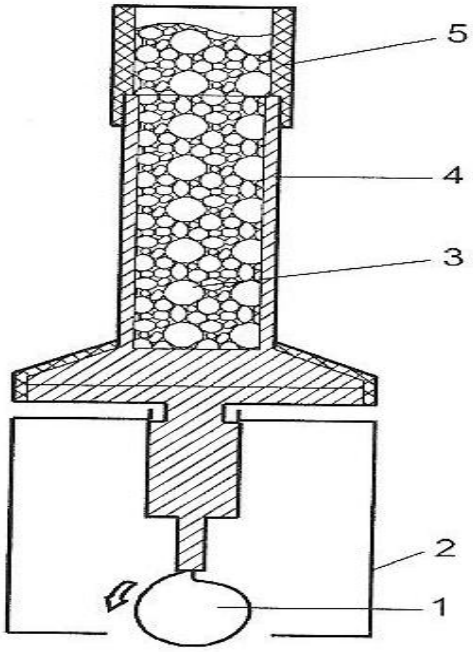
Hassas ölçümler için gözlenen bir kütle yerine belirgin kütle kullanılmalıdır. Bu durumda, gerçek sıvı yoğunluğunun bir referansı da kullanılmalıdır.

2.4.9 Bulk yoğunluğu

Tozlar veya bulk ürünleri, gaz ile (normal olarak hava) doldurulmuş boşluklar içerir. Boşluk içeren bulk materyallerin bu şeklinin yoğunluğuna, bulk yoğunluğu denir. Denklem (2.8) eşitliği kullanılarak bulk yoğunluğu, bulk materyalinin bir örneği tartarak ve onun hacmini ölçerek hesaplanabilir.

Tüm bulk materyalinin hacmi hiçbir değişiklik yapmadan alınabilir. Hacmi ölçmek için, bu örnek materyal hacmi bilinen bir beher içersine dökülür. Dolu beherdeki farklı teknikler boşluklu uzay ve katı parçacıkların farklı dağılımı ile uygulanabilir. Bu nedenle, doldurma tekniğinde tekrarlanabilir sonuçlar elde etmek için standartlaştırılmıştır.

Tekrar edilebilir teknikler problemin üstesinden gelmek için, bulk materyallerde hacmi okumadan önce bağlantı kurulmalıdır. Materyalin dağılımı ile katı parçacıklar da birçok uygun duruma ulaşabilir. Bulk yoğunluğu maksimuma ulaştığı yerde uzaysal durum adım adım katı parçacıkların kurulumu olarak, bu boş uzay daha da küçülecektir. Zaman dağılma hızı ve dağılma genliğine bağlı olan bu maksimuma ulaşmaya ihtiyaç duyar. Sürekli hareketteki dağılımların seçilen değerinin oluşmasına uygun laboratuar aletleri vardır. Örnek özelliklere bağımlılık, bazen 10, 100, 1000 veya daha fazla kez maksimum bulk yoğunluğuna ulaşmak için uygun olabilir.



Şekil 2.15. Bulk yoğunluğunu ölçmek için aygıt: 1.dönen kam, 2.konut, 3.toz örnek, 4.silindir, 5. taşma.

Şekil 2.15'de bulk yoğunluğu ve bağımlı bulk yoğunluğu ölçmek için kullanılabilecek bir alet örneği gösterilmiştir. Öncelikle tekrarlanabilir teknik koşullar altında dökme malzeme taşana kadar, $1000\,cm^3$ silindir içine doldurulur. Örnek malzemenin aşırı taşmasından sonra düz bir spatula yardımı ile silindirin üstü kazınır ve bulk yoğunluğunu elde etmek için $1000\,cm^3$ numune tartılır.

Silindirik bir uzantısı $1000\,cm^3$ silindir üzerine kaçırırsak ve daha fazla numune doldurulur. Silindir alet üzerine monte edilmiş ve bağlantının sayısı sabitlenmiştir. Alman test standartları, $250\,s^{-1}$ frekansı ile 2500 sayısı arasında belirlenir.

Tablo 2.7: Hausner oranı - toz akışkanlık karakterizasyonu (Kress-Rogers, 2001).

Hausner Oranı	**Toz Akışkanlık**
$1.1-1.1$	Serbest akışkan
$1.1-1.25$	Orta akışkan
$1.25-1.4$	Zor akışkan
>1.4	Çok zor ya da akışkan olmayan

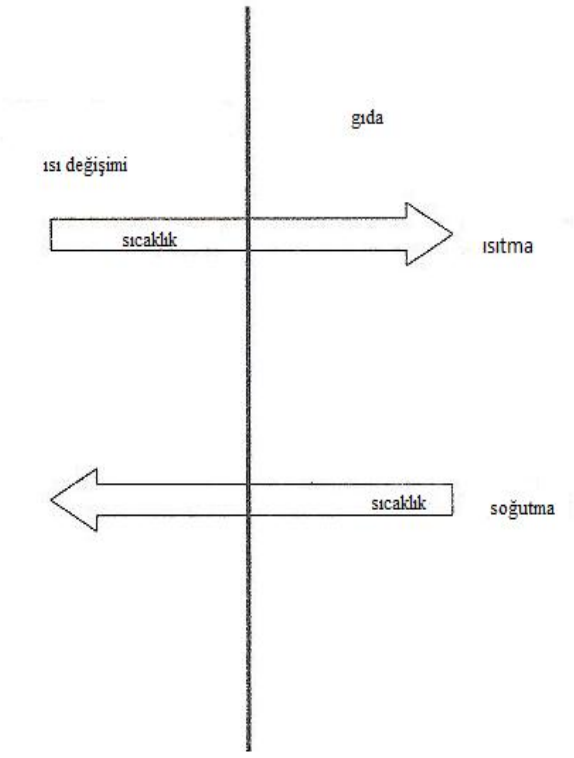
Ardından bu örnek materyal tekrar $1000\,cm^3$ ayarlanır ve tartılır. Yığın yoğunluğu ölçümü parametreleri ile kayıt edilmelidir.

Bulk yoğunluğu ve maksimum dağılmış bulk yoğunluğu arasındaki fark gravitasyon veya basınç tarafından sıkıştırılmış bulk materyallerin yetenekleri hakkında bilgi verir. Hausner oranı tarafından bu özellikleri için karakterize edilebilir. Bu Hausner oranı, dağılmamış bulk yoğunluğu üzerinde dağılmış bulk yoğunluğunun oranıdır.

BÖLÜM 3

TERMAL ÖZELLİKLER

Besinlerin raf ömürlerini uzatmak için kullanılan besin imal işlemlerinin çoğu enzimatik ve mikrobik aktivitelerin önlenmesine duyarlı sıcaklıklar gerekmektedir. Gıda malzemelerinin kontrollü ısı transferine dayanan bu ısıl işlemler, termal özelliklerine bağlıdır. Bir gıda ürününün iç sıcaklığını artırmak amacıyla, ısı ilk önce gıdanın dış yüzeyine aktarılır ve ardından, gıda ürününün merkezine ulaşmak için gıda materyali boyunca iletilir. Bu ısı transferine bir örnektir.



Şekil 3.1.Bir gıdanın yüzeyi üzerinden ısı transferi

Bir materyal bir değişim geçirmekte olduğu sırada ısı eklenince (ısıtma), o materyalin sıcaklığı çok uzun zaman artacaktır. Bir malzemeden ısı çıkarılır(soğutma) ve daha düşük bir sıcaklıkta çevreleyen ortamda ısı değişimi transferi olduğunda, malzemenin sıcaklığı azalacaktır. Şekil 3.1 ısı akışını, farklı yönlerde göstermektedir. Gıda imalatında, gıdanın korunması için termal işlem çalışmaları çok önemlidir. Termal işlem çalışmalarının bazı örnekleri Tablo 3.1 'de listelenmiştir.

Bu bölümde, faz geçiş noktaları (erime, donma, camsı geçiş, kimyasal reaksiyonlar, buharlaşma, vb) yanı sıra, ısı kapasitesi, sıcaklık ve entalpi, gibi gıdaların termal özelliklerine değinilecektir.

Tablo 3.1: Gıda Mühendisliğinde önemli termal işlem operasyonları.

İşlem	Amacı	Gıda Örnekleri	Isı Değişimi	Sıcaklık Aralığı
Pastörizasyon / sterilizasyon	raf ömrünün artırılması için patojen mikroorganizmaların inaktivasyonu	et, balık, çorba, sebze, meyve, krema	elektrik, sıcak su, buhar (doğrudan veya dolaylı buhar)	63-135°C
Bir defada alınan miktar(yığın)	katı ve sıvıların konserveleri	süt, krema, muhallebi tatlı, çorba, meyve, meyve suyu, bira, yumurta		
Sürekli bir akış / sıvı (UHT / HTST)	uzun ömürlü aseptik ambalajlama	uzun ömürlü süt,meyve suları, krema		
Buharlaşma	su çıkarılması,sıvı konsantresidir	süt,patates, peynir altı suyu,meyve	buhar	40-100°C
Kurutma	düşük su aktivitesi ile birlikte kurutulmuş malzeme arasında su giderimi, üretim	süt, patates, meyve, balık, et	sıcak hava, buhar, elektrik	150-250°C
Kızartma	su reaksiyonları,(proteinler, karbonhidratlar) buharlaşma	patates kızartması, lokmalar	kızgın yağ	100-150°C
Pişirme / fırınlama	su reaksiyonları, (proteinler karbonhidratlar) buharlaşma	ekmek,etli börek,	buhar,yüksek hava mikrodalga	100-200°C
Şok soğutma / dondurma	bozulma reaksiyonları azaltarak, mikrobiyal aktivite	et,balık,meyve, sebze	soğuk hava,sıvı azot	10-0°C (-18)-(-30)°C (-100)-(-200)°C

3.1 Sıcaklık

Bir sistemin sıcaklığı sistemi oluşturan maddelerin moleküler hareketleri tarafından ortaya çıkan kinetik enerjinin bir ölçüsüdür. Sıcaklık artışı ile bu kinetik enerji artar (moleküller daha hızlı hareket ederler). T mutlak sıcaklık ve k Boltzmann sabiti ' nin matematiksel denklemine E termal enerji denir.

$$E = k \cdot T \tag{3.1}$$

Burada E enerji (J), T sıcaklık (K), k Boltzman sabiti ($\mathrm{J \cdot K^{-1}}$) şeklinde ifade edilir.

Moleküler ölçekte termal enerji, bir sistem içinde hareket eden moleküllerin kinetik enerjisi ve ideal gazların gaz atomlarının hız dağılımı sıcaklığının bir fonksiyonudur. Makroskobik ölçekte bir sistemin termal enerjisi, sistemin sıcaklığı ile ifade edilebilir. Sonuç olarak yüksek bir sistem sıcaklığı moleküllerin yüksek kinetik enerjiye sahip olduğunu gösterir. Farazi bir sıfır sıcaklıkta, hareketsiz haldeki moleküllerin kinetik enerjisi yoktur. Bu mutlak sıcaklık ölçeğinin (termodinamiğin sıcaklık ölçeğinin) alt sınırdır. Bunun için herhangi bir üst sınırı yoktur. Bu ölçek için seçilen sıcaklık birimi 1 K (Kelvin), suyun üçlü nokta sıcaklığı $\frac{1}{273.16}$ olarak tanımlanır. Bu üçlü nokta dünyanın her noktasında aynıdır ve termodinamik sıcaklık ölçeğinin sabit bir noktası olarak adlandırılır.

Diğer birimlere sahip başka sıcaklık ölçekleri bulunmaktadır. Örneğin, CELSIUS ölçeği için suyun donacağı sıcaklıklarda (donma noktası) ve standart atmosferik basınçta kaynatıldığı (kaynama noktası) sabit noktalar vardır. Bu sabit noktalar arasındaki sıcaklık farkı, 100 derece olarak tanımlanmıştır. Benzer bir şekilde Fahrenheit ölçeğinde, kabul edilebilir iki sabit nokta bulunmaktadır. Fahrenheit ölçeği, sıfır ($-17.8 \circ C = 0 \circ F$) olabilecek en düşük nokta ve sağlıklı kişinin vücut kan sıcaklığında olduğuna inanılan ($37 \circ C = 100 \circ F$) en yüksek noktası olarak ayarlanmıştır. Bu sabit noktalar arasındaki sıcaklık farkı, 100 derece olarak tanımlanmıştır. Aynı şekilde, her bir Fahrenheit derecesine dayanan aynı mutlak bir

sıcaklık ölçeği vardır. Buna Rankine sıcaklık ölçeği (ºR) denir ve Kelvin sıcaklık örneği ile benzerdir. Tablo 3.2 genel bir bakış listelemektedir.

Tablo 3.2: Bazı sıcaklıklar için sabit noktalar ve bağıl ölçekler.

	Mutlak Sıfır Noktası	**N_2'nin Kaynama Sıcaklığı**	**H_2O'nun Donma Sıcaklığı**	**H_2O'nun Üçlü Noktası**	**İnsan Vücudundaki Kanın Sıcaklığı**	**H_2O'nun Kaynama Sıcaklığı**	**Sıcaklık Ölçeğinin İsmi**
T/K	0	77.4	273.15	273.16	310.15	373.15	KELVİN
$\vartheta/^\circ C$	-273.15	-195.8	0.0	0.01	37	100.0	CELCİUS
$\vartheta/^\circ$F	-459.67	-320.4	32.0	32.02	100	212.0	FAHRENHEİT
$\vartheta/^\circ R$	0	139.3	491.69	491.69	560	672	RANKİNE

Endüstriyel kullanım için, ITS-90 (1990 uluslararası sıcaklık ölçeği denilen) uluslararası bir sıcaklık ölçeği vardır. ITS-90, birçok laboratuarda üretilecek, 0.7 K ve 2500 K aralığında sabit noktalara dayanmaktadır. Tablo 3.3'te ITS-90'nın gıda mühendisleri için gösterilen ilginç bazı sabit noktalar listelenmiştir. Sabit noktalar ve değerleri ulusal metroloji enstitüleri arasında uluslararası sözleşmelerle zaman zaman ayarlanır.

Tablo 3.3: Bazı sabit noktaların gıda süreçlerinin sıcaklık aralığında ITS-90 uluslararası sıcaklık ölçeği.

Denge Durumunda	**$\vartheta/^\circ$C ye göre ITS-90**
Suyun üçlü noktası	0.01
Galyum'un erime noktası	29.7646
İndiyum' un erime noktası	156.5985

3.2 Isı ve Entalpi

Isı bir enerji şeklidir. Enerjinin genellikle iş, ısı gibi birçok formları (ısı, ışık, iş, kimya, elektrik, vb) ve sık sık bir türden diğerine geçişi bulunur (bkz. Tablo 3.4). Ancak, enerji, başlı başına ne yaratılabilir ne de yok edilebilir. Termodinamiğin birinci yasası olarak bilinen ve genellikle mühendisler tarafından, bir sistemde enerji denge hesaplamalarını yürütmede enerji korunumu kuralı olarak kullanılır. Enerji bir formdan diğerine dönüşür, bu dönüşüm etkinliğini dikkate almak zorundayız.

Tablo 3.4: Enerjinin çeşitli formları.

Enerji Türü	**Örnekler**
Mekanik enerji	Bir yayın potansiyel enerjisi
	Hareketli bir cismin kinetik enerjisi
Elektrik enerjisi	Elektrik şebekesi
Işık enerjisi	Güneş ışığı, akkor ampul ışığı
Kimyasal enerji	Bitkisel yağ, mineral yağ, patates nişastası, yakıt
Nükleer enerji	Atom çekirdeğinin yaydığı radyoaktivite
Isı enerjisi	Pişirme/soba ısıtması, ev ısıtma sistemi

Isı dışında, her türlü enerji teorik olarak $\%100$ verimle birbirleriyle dönüştürülebilir. $\%100$ bu verim gerçekte doğru değildir. Isı durumunda, diğer enerji biçimlerine dönüşüm, sadece mutlak sıfır sıcaklığına ulaşıldığında olabilir. Termodinamiğin üçüncü yasası nedeniyle, bu imkansız olarak kabul edilir. Sonuç olarak, ısı $\%100$ verimlilik ile diğer enerji formlarına dönüştürülemez. Bu nedenle ısı, bir enerji formudur.

Termodinamik bir sistemin iç enerjisi U, hem ısı hem de iş formunda bulunmaktadır. Bu nedenle, iç enerji için iki dönüşüm mümkündür. Isı dönüşümü Q ve işin dönüşümü W' olarak alınırsa, iç enerjiyi şu şekilde ifade edebiliriz:

$$dU = dQ + dW' \tag{3.2}$$

Termodinamik bir sistemde, W işi sadece yer değiştirme işi (kuvvet-yer değiştirme ya da basınç-hacim) olarak ele alınabilir. İşin elektrik, manyetik, elastik ve sürtünme gibi diğer formlarıyla ilişkili olmadığı kabul edilirse,

$$dU = dQ + dW \tag{3.3}$$

olur. Yer değiştirme sonucunda yapılan iş tanımı:

$$dW = -p \cdot dV \tag{3.4}$$

dır. dW' yi yerine koyarsak

$$dU = dQ - p \cdot dV \tag{3.5}$$

ya da

$$dQ = dU + p \cdot dV \tag{3.6}$$

olur.

Burada U iç enerji (J), W' iş (J), Q ısı (J), W yer değiştirme işi (J), p basınç (Pa), H entalpi (J) olarak gösterilmiştir.

H entalpi terimi iç enerji ve p.V toplamı için kullanılır:

$$H = U + p \cdot V \tag{3.7}$$

Enthalpide ki değişim ise:

$$dH = dU + p \cdot dV + V \cdot dp \tag{3.8}$$

dır. Eğer basıncı sabit alırsak $dp = 0$, o zaman entalpi değişimi:

$$dH = dU + p \cdot dV \tag{3.9}$$

olur. Denklem (3.6) dikkate alınırsa,

$$dH = dQ \tag{3.10}$$

olur.

Bu sabit basınçlı süreç (izobarik) sırasında meydana gelen dQ ısı değişim miktarının sistemin entalpi değişimi ile aynı olduğu anlamına gelmektedir. Bir laboratuarda sabit basınç altında (normal atmosferik basınç gibi) bir materyalin özelliklerini araştırdığımızda, bir sistemin enerjisi yerine onun entalpisi hakkında konuşabiliriz demektir.

Sonuç olarak, bir sistemin dU iç enerjisindeki değişikliği ve dH entalpideki değişim arasındaki fark iş kadardır ve yukarıdaki yaklaşımlar ile bu iş $dW = -p \cdot dV$ ' dir. Eğer sabit basınçlı (izobarik) süreç içinde ise, yani hiçbir yer değiştirmenin olmadığı ya da sıfıra yakın olduğunda, o zaman yer değiştirme işi sistemde bir rol oynamaz ve entalpisi ile iç enerji arasındaki fark nerdeyse sıfırdır. dH ve dU değerleri benzerdir (Tablo 3.5).

Isı bir sistem içine ve dışına transfer edildiğinde, normal olarak sıcaklık sırasıyla yükselir veya düşer. Bu tip ısıya, sıcaklık değişimi ile uyarı ya da soğutma etkisi anlamında, hissedilir ısı denir. Ancak bir sistemin içine veya dışına ısı transfer edilebildiği durumlarda bile sıcaklık sabit kalabilir. Bu, suyun kaynaması süresindeki sıvı fazdan gaz fazına geçerken ya da suyun donma sürecinde ki sıvıdan katıya faz değişiminde olur. Bu tip ısı gizli ısı olarak adlandırılır. Gizli ısı materyallerin faz geçişlerine bağlıdır. Faz geçişleri hakkında daha fazla bilgi vermeden önce, bir sonraki bölümde termodinamiğin temel ilkelerinin bazılarını hatırlamak yararlı olacaktır.

Tablo 3.5: İzobarik süreçteki bir sistemde *dQ* ısı iletimi.

Termodinamik Süreç	**Isı Karşılığı**	**Entalpi Karşılığı**
Genel süreç	$dQ = dU + p \cdot dV + V \cdot dp$	$dQ = dH$
Yerdeğiştirme işi ile izobarik süreç	$dQ = dU + p \cdot dV + 0$	$dQ = dH$
Yerdeğiştirme işi sıfır olmak üzere izobarik süreç	$dQ = dU + 0 + 0$	$dQ = dH = dU$

3.3 Termodinamiğin Temel İlkeleri

Termodinamik, maddelerin ısıtıldığında ya da soğutulduğunda etkilenmelerini, özellikle ısı verildiğinde ya da alındığında sebep olan faz değişimini incelediğimiz bilimin bir dalıdır. Bu nedenle, termodinamik önemli bir konu olup çoğu mühendis ve özellikle gıda mühendisleri tarafından iyi anlaşılmalıdır. Bu bölümde termodinamiğin temel ilkelerinin termal özelliklerinin sadece kısa bir değerlendirmesi yapılacaktır.

Materyallerin termal özelliklerini ölçmek, termal etkileri oluşmasına neden deneyler yapmak ve bu etkilerin sonuçlarını kaydetmek gerekir. Çoğu kez sıcaklık ya da ısı miktarı izlenir ve ölçülür. Moleküler bir ölçekte fiziksel bir büyüklüğün sıcaklık bağımlılığını (basınç bağımlılığı gibi) gözlemlemek bir malzemenin enerjik davranışını incelemek için yaygın bir yoldur.

3.3.1 Termodinamik Kanunları

Bir önceki bölümde, enerji korunumu yasasının termodinamiğin birinci yasası olduğunu denklem (3.6)'da verildi. Hatırlanırsa bu denklem yer değiştirme işinden meydana gelen varsayımla elde edilmişti.

$$dU = dQ - p \cdot dV \tag{3.6}$$

Eğer sınırda, ısı geçişi olmaması için termal olarak yalıtılmış bir sisteme sahipsek, bu sisteme adiyabatik sistem denir (sabit entropili = izentropik). Adiyabatik bir sistemde yola bağlı iş sıfır olduğundan, sistemin iç enerjisi sabittir ($dU = 0$).

T sıcaklıktaki bir sisteme dQ kadarlık bir ısı girdiğinde ya da çıktığında, ısının sıcaklığa bölümüne dS sistemin entropisindeki değişim denir.

$$dS = \frac{dQ}{T} \tag{3.11}$$

olur.

Bu tanım, kapalı bir sistem ve tersinir bir süreç için geçerlidir. İlgili işlem kısmen veya tamamen tersinmez olduğu zaman,

$$dS > \frac{dQ}{T} \tag{3.12}$$

dir.

Denklem (3.12) bir sistemin dengede değilse S entropisini arttırmak ve maksimuma ulaşmak için eğilim göstereceğini belirtmektedir ve termodinamiğin ikinci yasasının bir ifadesidir.

Tersinir süreçler ve sadece tersinir dönüşümlü yer değiştirmeler göz önünde bulundurulduğunda, (3.6) ve (3.11) denklemleri kullanılarak:

$$dU = T \cdot dS - p \cdot dV \tag{3.13}$$

sağlanır.

Bunun anlamı kapalı bir sistemin iç enerjisi, entropi veya hacmin değişimi ile değişebilmektedir.

Termodinamikte, yararlı G GİBBS entalpisi gibi başka bir enerji terimi de bulunmaktadır. Bu, H entalpi ile T sıcaklık ve S entropi çarpımının farkına eşittir.

$$G = H - T \cdot S \tag{3.14}$$

denklem (3.7) den

$$G = U + p \cdot V - T \cdot S \tag{3.15}$$

şeklinde ifade edilebilir. Gibbs entalpisindeki değişim;

$$dG = dU + p \cdot dV + V \cdot dp - S \cdot dT - T \cdot dS \tag{3.16}$$

ardından, (3.6) ve (3.11) denklemleri ile:

$$dG = V \cdot dp - T \cdot dS \tag{3.17}$$

elde edilir. Belirli bir sıcaklıkta bir denge durumu düşünüldüğünde $dQ = T \cdot dS = 0$;

$$dG = V \cdot dp \tag{3.18}$$

ya da

$$\frac{dG}{dp} = V \tag{3.19}$$

olur. Eğer su buharı bir ideal gaz gibi belirli koşullar altında ele alınırsa:

$$\frac{dG}{dp} = \frac{R \cdot T}{p} \tag{3.20}$$

ya da

$$dG = R \cdot T \cdot d \ln p \tag{3.21}$$

elde edilir.

Su buharının ideal bir gaz olmaması nedeniyle, basınç p yerine onun ideal olmayan davranışlarını *f* buhar fugasitesini kullanarak (bir gazın genişleme veya kaçma eğiliminin bir ölçüsüdür) hesaplamak için su buharı özelliklerinden faydalanılır;

$$dG = R \cdot T \cdot d \ln f \tag{3.22}$$

Bu, basit bir sistemin Gibbs enerjisinin buhar basıncı ya da f fugasitesi ölçülmesi ile hesaplanabildiğini göstermektedir. Boyutsuz bağıl f fugasiteye, kimyasal bileşik aktivitesi denir. Su için, bu değişken su aktivitesi olarak tanımlanır;

$$a_W = \frac{f}{f_0} \tag{3.23}$$

şeklindedir.

Gibbs entalpisi kimyasal bir bileşiğe bağlı olduğu zaman, *dG*' nin *dn*'e göre kısmi türevine μ kimyasal potansiyel denir.

$$\mu_i = \left(\frac{\delta G}{\delta n_i} \right) \tag{3.24}$$

Kimyasal potansiyel, bir bileşenin bir reaksiyona geçmesi yeteneğini gösterir. Örnek su buharı terimleri, kimyasal potansiyelin bir kimyasal reaksiyonun bir parçası olarak suyun hareket etme yeteneğini gösterir. Çeşitli kimyasal reaksiyonları desteklemek için kullanılan su aktivitesinin mevcut ya da bağlı suyun indikatör olarak sağlam termodinamik temelleri vardır. Eğer suyun reaksiyona girme eğilimini bilmek istiyorsak, o zaman su buhar basıncını (daha kesinlikle fugasitesini *f*) ölçmemiz gerekir. Bunu suyun aktivitesinin ölçülmesinde yaptığımız gibi yaparız. Su aktivitesi, suyun kimyasal potansiyelinin bağıl bir ölçüsünden başka bir şey değildir.

$$d\mu = R \cdot T \cdot d \ln f \tag{3.25}$$

(3.8) denklemi ile

$$d\mu = fonksiyon(a_w)$$

şeklinde olur.

Denklemde G Gibbs enerjisi (J), μ kimyasal potansiyel ($J \cdot mol^{-1}$), N maddenin molü, S entropi ($J \cdot K^{-1}$) , f fugasite (Pa), a_w su aktivitesi olarak ifade edilir.

3.4 Isı Sığası

Bir malzemenin ısı sığası, ısıyı tutmak ve saklamak için materyalin yeteneğini gösteren bir termal özelliğidir. Isı sığası, sıcaklığı arttırmak için verilen belirli ısı miktarı ile ölçülebilir.

Matematiksel olarak ısı sığası, ısının sıcaklığa bölümüdür:

$$C = \frac{dQ}{dT} \tag{3.26}$$

ve

$$C = \frac{\Delta Q}{\Delta T} \tag{3.27}$$

şeklindedir.

Isı sığası sadece bu şekilde tanımlandığında, örnek malzemenin kütlesine bağlı olacaktır ve ayırt edici bir özellik olarak görülecektir. Bu sebepten ısı sığasını kütlenin ortak bir biriminin bazın da ölçmelidir. Bunu elverişli şekilde yapmak, belirli ısı sığasıyla mümkündür. Bu özelliğe materyalin özgül ısısı denir ama $dQ/dm = q$ özgül ısı olduğundan bundan kaçınılmalıdır.

$$c = \frac{C}{m} \tag{3.28}$$

$$c = \frac{1}{m} \cdot \frac{dQ}{dT} = \frac{dq}{dT} \tag{3.29}$$

Isı sığasını daha iyi anlamak için, bir litre suyun sıcaklığını 21°C dereceden 23°C' ye yükseltmek için ne kadar ısı gerektiğini hesaplarız (2K ile). Bunu yaptığımızda, gereken ısı ölçümünü 8.39 kJ olduğunu buluruz.

Bunun gibi bir sisteme ısı eklendiğinde, su molekülleri kinetik enerjisinde bir artış yaşanır. Moleküller, daha hızlı öteleme ve dönme hareketi yaparlar. Biz bu su içine parmağımızı (ya da bir termometre) batırırsak, artan bu termal enerji düzeyini parmaklarımız üzerindeki ısınma ile hissedebiliriz ya da termometre üzerindeki skalada bir artış görebiliriz. Bu nedenle sıcaklığı, artan termal sıcaklığın bir ölçüsü olarak kullanabiliriz. Bu durumda, sıcaklık artışı $\Delta T = 2K$ ' dır.

Tablo 3.6 Sabit basınç ve sabit hacimde ısı sığası terimleri.

Isı Sığası **P=sabit**		**Isı Sığası** **V=sabit**	
$C_p = \frac{dH}{dT}$	(3.30)	$C_V = \frac{dU}{dT}$	(3.31)
$c_p = \frac{1}{m} \cdot \frac{dH}{dT}$	(3.32)	$c_V = \frac{1}{m} \cdot \frac{dU}{dT}$	(3.33)
$c_p = \frac{dh}{dT}$	(3.34)	$c_V = \frac{du}{dT}$	(3.35)

Bu tabloda, denklemlerdeki terimlerin karşılıkları, C ısı sığası ($\mathrm{J\cdot K^{-1}}$), Q ısı (J), c özgül sığası ($\mathrm{J\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$), q özgül ısı ($\mathrm{J\cdot kg^{-1}}$), T sıcaklık (K), H entalpi (J), m kütle (kg), h özgül entalpi ($\mathrm{J\cdot kg^{-1}}$), U enerji (J), u özgül iç enerji ($\mathrm{J\cdot kg^{-1}}$) olarak ifade edilir.

Örnek 3.1 Yukarıdaki denklem (3.29)' la elde ettiğimiz değerler ile suyun özgül ısı sığasını hesaplarsak;

$$c_p = \frac{1}{m}\cdot\frac{\Delta Q}{\Delta T}$$

$$c_p = \frac{8.36\,\mathrm{kJ}}{1\,\mathrm{kg}\cdot 2\,\mathrm{K}}$$

$$c_p = 4.18\,\mathrm{kJ\cdot kg^{-1}\cdot K^{-1}}$$

olarak bulunur.

Genellikle termodinamikte yer değiştirme işi ile iç enerjiyi birbirinden ayırt etmek gereklidir. Herhangi bir yer değiştirme işi olmadığında sistem hacmi (V = sabit, $dQ = dU$) sabit kalır ve ısı sığası terimi V indisi ile kullanılır. Yer değiştirme varken, sistemin basıncı(p = sabit, $dQ = dH$) sabit kalır ve ısı sığası terimi p indisi ile kullanılır (bkz. Tablo 3.6).

3.4.1 İdeal gazlar ve ideal katılar

İdeal gazlar ve katılar için, termal enerji, moleküllerin hareketi teorisiyle tahmin edilebilmektedir. Buna bağlı olarak, ideal maddelerin ısı sığaları da bir teoriden belirlenebilir. Bir ideal gazda, moleküller 3 boyutlu uzayda 3 yönde serbest hareket

yönüne sahiptirler (ileri-geri, yan-yan, aşağı-yukarı). Böylece öteleme hareketi için serbestlik derecesi 3 tür diyebiliriz (f=3).

Ötelenme hareketinin yanı sıra, moleküllerin dönme hareketi vardır. Sadece iki atomdan meydana gelen gaz molekülleri örneğin N_2 çizgisel bağlıdır. Bu onların iki eksen etrafında döndürebilen bir katı cisim gibi görünmesini sağlar. Bu onlara iki serbestlik derece verir. Böylece, toplamda beş serbestlik derecesi f = 5 olur.

İdeal katılarda durum, moleküler bir düzlemde sabitlenmiştir ve dönme ya da ötelemeye sahip değillerdir. Bu sebep ile dönme ya da öteleme serbestlik dereceleri yoktur. Ancak bunlar üç yönde serbest salınım gösterirler. Böylece, termal enerjisini cevaben altı serbestlik derecesi vardır. Tablo 3.7 atomlar veya moleküller için birkaç basit ideal sistem serbestlik derecelerinin listesidir.

Tablo 3.7: Atomların ve moleküllerin basit, ideal bir sistem için serbestlik dereceleri.

	Öteleme	**Dönme**	**Titreşim**	**Toplam**
Tek atomlu gaz molekülü	3	-	-	$f = 3$
İki atomlu gaz molekülü	3	2	0	$f = 5$
Katı molekülleri	-	-	6	$f = 6$

İdeal gazların kinetik enerjiler ile termal enerjileri eşit ise,

$$\frac{1}{2} m \cdot \bar{v}^2 = \frac{f}{2} k \cdot T \tag{3.36}$$

$$E = \frac{f}{2} k \cdot T \tag{3.37}$$

$\bar{N}$ parçacıklı atomlar veya moleküller için iç enerji U;

$$U = \bar{N} \cdot \frac{f}{2} k \cdot T \tag{3.38}$$

ve $R = k\,N_A$ ile

$$U = \frac{\overline{N}}{N_A} \cdot \frac{f}{2} k \cdot N_A \cdot T = n \cdot \frac{f}{2} R \cdot T \tag{3.39}$$

$$U = n \cdot M \cdot \frac{f}{2} \cdot \frac{R}{M} \cdot T = m \cdot \frac{f}{2} R_S \cdot T \tag{3.40}$$

elde edilir.

$$C_V = \frac{dU}{dT} \tag{3.31}$$

ile

$$C_V = m \cdot \frac{f}{2} R_S \tag{3.41}$$

ve

$$C_V = \frac{f}{2} R_S \tag{3.42}$$

olur. Izobarik (sabit basınçta) durumda;

$$C_p = \frac{dQ}{dT} = \frac{dH}{dT} = \frac{dU}{dT} + \frac{pdV}{dT} = \frac{dU}{dT} + \frac{m \cdot R_S \cdot dT}{dT} \tag{3.43}$$

dır.

Sonuç olarak

$$C_p = C_V + m \cdot R_S \tag{3.44}$$

yada

$$c_p = c_V + R_S \tag{3.45}$$

olur.

Denklemde k BOLTZMANN sabiti, N_A AVOGADRO sabiti, m kütle (kg), f serbestlik derecesi, p basınç (Pa), $\overline{N}$ parçacık sayısı, V hacim (m^3), U iç enerji (J), C_p ısı sığası (p = sabit) $(\mathrm{J}\cdot\mathrm{K}^{-1})$, m moleküler kütle $(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{mol}^{-1})$ C_V ısı sığası (V = sabit) $(\mathrm{J}\cdot\mathrm{K}^{-1})$, R evrensel gaz sabiti $(\mathrm{J}\cdot\mathrm{K}^{-1}\cdot\mathrm{mol}^{-1})$, c_p özgül ısı sığası (p = sabit) $(\mathrm{J}\cdot\mathrm{kg}^{-1}\cdot\mathrm{K}^{-1})$, R_S özgül gaz sabiti $(\mathrm{J}\cdot\mathrm{K}^{-1}\cdot\mathrm{mol}^{-1})$, c_V özgül ısı sığası (V = sabit) $(\mathrm{J}\cdot\mathrm{kg}^{-1}\cdot\mathrm{K}^{-1})$ şeklinde ifade edilir.

Çok yüksek basınçlı olmayan katılarda durum şudur;

$$c_p \approx c_V \tag{3.46}$$

f = 6 ile

$$c_p \approx 3R_S \tag{3.47}$$

Denklem (3.47) katılarda ısı kapasitesi DULONG-PETİT kuralıdır. Tablo 3.8 termodinamiğin önemli noktaları ve ısı için deneysel verilere dayalı kuramsal değerleri göstermektedir.

Tablo 3.8: Seçilen sistemlerin belirli bir ısı kapasitesinde teorik ve deneysel değerleri.

Madde	f	$\mathbf{R_S / kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$	$\mathbf{c_p (teorik) / kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$	$\mathbf{c_p (deneysel) / kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$
H_e	3	2.078	5.195	5.23
N_2	5	0.297	1.039	1.03
Hava	5	0.287	1.0045	1.005
Pb	6	0.0401	0.1203	0.129

Aynı zamanda çoğu katı materyal için oda sıcaklığındaki ısı sığası hesaplamaları Dulong-Petit kuralını kullanmadan da yapılabilir. Bu durumda, aşağıda açıklanan yöntem tavsiye edilir.

3.4.2 Gerçek katıların ısı sığası

Malzemelerin bilinen ve tahmin edilen ısı sığalarını denklem (3.48) ile hesaplaya biliriz. Tablo 3.9 da çeşitli gıda bileşiklerinin özgül ısı sığaları listelenmiştir.

Tablo 3.9: Çeşitli gıda bileşenlerinin özgül ısı sığasını gösteren liste (Tscheuschner, 1996).

Bileşenler	**Öz Isı Sığaları** $(\mathbf{c_p / kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}})$	**Bileşenler**	**Öz Isı Sığaları** $(\mathbf{c_p / kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}})$
Su	$\approx$ 4.2	Mineraller	$\approx$ 0.8
Karbonhidratlar	$\approx$ 1.4	Buz	$\approx$ 2.1
Proteinler	$\approx$ 1.6	Yağsız katı madde (hayvansal)	$\approx 1.34 \cdots 1.68$

Yağlar	≈	1.7	Yağsız katı madde(bitkisel)	≈1.21	

$$c_p = \sum_i x_i \cdot c_{p,i} \tag{3.48}$$

ifade edildiğinde,

$$x_i = \frac{m_i}{m} \tag{3.49}$$

$$m = \sum_i m_i \tag{3.50}$$

değerini alır.

Burada, c_p özgül ısı sığası ($\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}}$), m_i i. bileşenin kütlesi (kg), x_i i bileşiğin kütle kesri, m toplam kütle (kg), $c_{p,i}$ i. bileşenin özgül ısı sığası ($\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}}$) olarak ifade edilir.

Örnek7.2 Gıdaların ısı sığasının belirlenmesi.

Bir gıda ürününün bileşimi aşağıda verilmiştir.

Bileşenler	**Kütle Oranı x_i / % (m/m)**
Su	84
Yağ	12
Protein	3
Mineraller	1

Bu tablo değerlerinden özgül ısı sığası aşağıdaki gibi belirlenebilir:

$$c_p \,/\mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}} = \sum 0.84 \cdot 4.2 + 0.12 \cdot 1.7 + 0.03 \cdot 1.6 + 0.01 \cdot 0.8$$

$$c_p = 3.8\ \mathrm{kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$$

değerini alır.

3.5 Faz Değişimlerinin Sınıflandırılması

Basit bir faz geçişine baktığımızda, örneğin bir madde donarak sıvı fazdan katı faza geçerken, normal olarak entalpisinde, entropisinde ve hacminde belirgin bir değişiklik gözlemleriz. Sıvı fazdan katı faza geçmeye başladığında, faz değişimi noktasında bu değişimleri elde ederiz. Bu faz değişim noktası malzemenin P-T diyagramındaki (faz diyagramı) bir noktadır. Her iki fazın kimyasal potansiyeli faz değişim noktasında eşit iken, entropiler ve entalpiler her iki fazda farklıdır.

Diğer durumlarda ise bir katının eriyerek entalpisinde ani bir değişiklik olmadan bir viskoz sıvı olduğunu gözlemleyebiliriz. Faz geçişlerinin bu türüne camsı geçiş denir ve kristal olmayan malzeme ile çalışıldığı zaman elde edilir. Örneğin, katı karbonhidratların formulasyonlarında şeker veya tuz gibi camsı geçişler sergilene bilmektedir.

Birinci dereceden faz geçişi (n=1) olarak isimlendirilen Ehrenfest (Ehrenfest, 1933) faz geçişine göre, sıcaklık altında Gibbs entalpisinin birinci türevinde bir kesiklilik (eğride atlama) vardır. Benzer davranış, sıcaklık altında Gibbs entalpisinin 2. türevi için 2. derece faz geçişinde (n=2) de eğride bir kesiklilik ortaya çıkar.

Soğutulan bir malzemenin sıvı-katı faz değişimi örneği ele alınırsa, bu geçiş sırasında elde edilen termal etki iki faz (sıvı faz ve katı faz) arasındaki entalpi farkını ortaya koyar. $\Delta_{trs}G_m$:

$$\Delta_{trs}G_m = G_m'' - G_m' = 0 \tag{3.51}$$

böylece, sıcaklığa göre kısmi türev:

$$\left(\frac{\partial \Delta_{trs}G_m}{\partial T}\right) = \left(\frac{\partial G_m''}{\partial T}\right)_p - \left(\frac{\partial G_m'}{\partial T}\right)_p = -S_m'' + S_m' = -\Delta_{trs}S_m \tag{3.52}$$

Denklemler (3.8) ve (3.13) ve *dp = 0* ile *H* entalpi değişimi:

$$\Delta_{trs}H_m = T \cdot \Delta_{trs}S_m \tag{3.53}$$

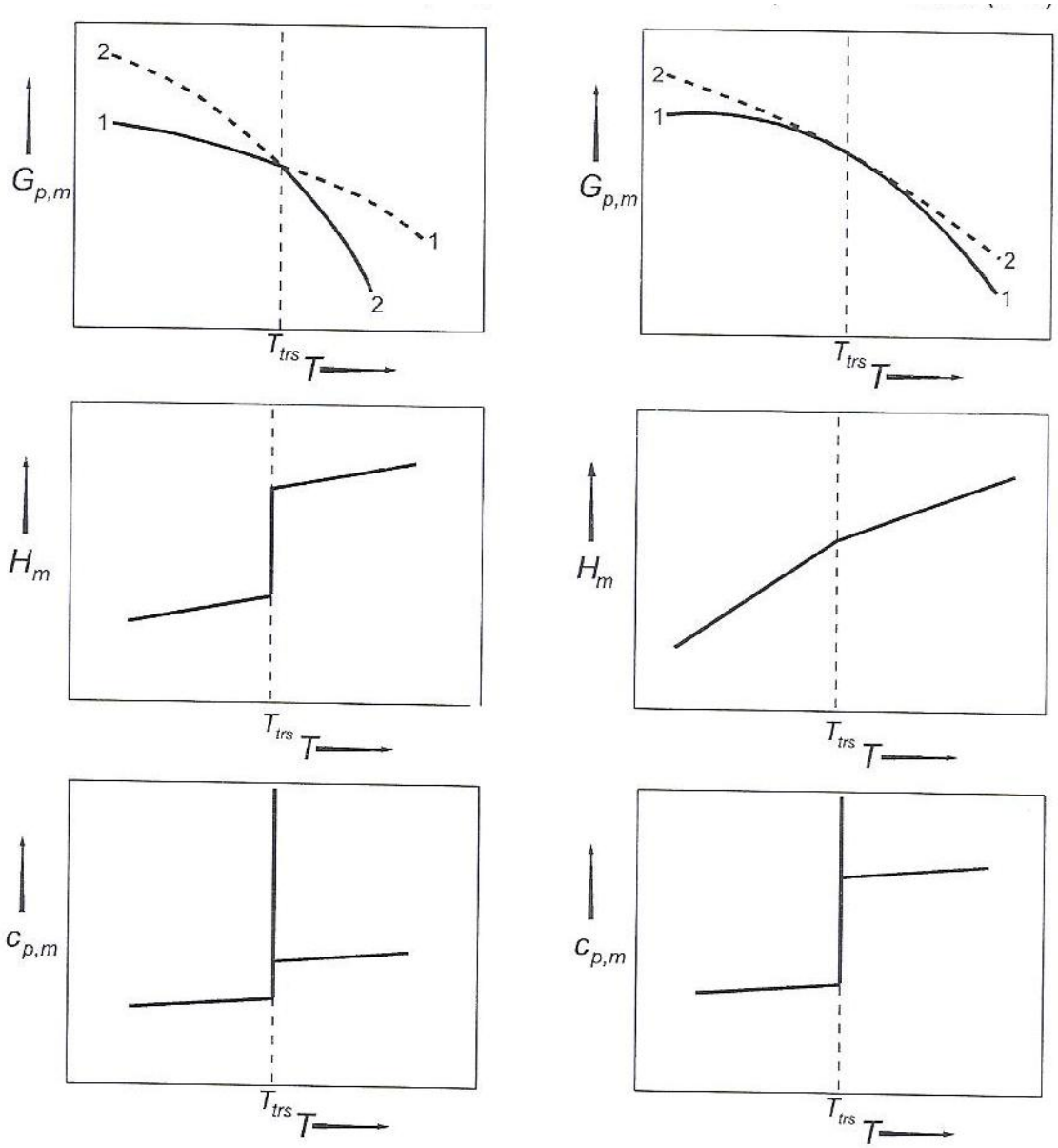
dir.

Bu Gibbs entalpisinin ilk türevi $\Delta_{trs}S$ veya $\Delta_{trs}H$ yı gösterdiği anlamına gelmektedir. Denklem (3.30) hatırlanırsa, c_p için *H*' in *T*'ye göre türevidir. Böylece *G*' nin sıcaklığa göre ikinci türevi ile ifade edilebilir. Bu düşünce ile Şekil 3.2' deki grafiklerde bunu göstermektedir. Şekil 3.2' de en üstteki sol şekilde, sıvı (2) ve katı (1) fazlarının *G*-*T* grafikleri görülmektedir (geçiş sıcaklığındaki buluşmaları da). Sıcaklığın azalması üzerine, sistem düşük enerji durumuna ulaşmak için 1 eğrisinden 2 eğrisine normal olarak değişecektir. Bu eğrilerin türevleri çizildiğinde, geçiş sıcaklığında atlamaya sahip *H*-*T* eğimi elde edilir. Bu bir birinci dereceden faz geçişidir.

Şekil (3.2)' nin sağ tarafında gösterilen 2. dereceden faz geçişleri için grafikler yer almaktadır. Geçiş sıcaklığında faz 1 ve faz 2 eğrisinin kesişmediğini, ancak birbirlerini teğet geçtiğini ve bu noktada hafifçe dokunmakta olduğu görülür. Sıcaklığın azalmasıyla, faz 2' den faz 1' e geçişe başlar. Birinci türev (sağ orta) doğrudan aşağıya inmektedir. Bu durumda, birinci türev eğimi *H*' tır, sadece geçiş noktasında yön değiştirir, fakat atlama ya da kesiklik olmadığı görülür. İkinci türev (en alttaki) bir kesiklilik "atlama" göstermektedir. Bu geçiş ikinci dereceden bir faz geçişidir. Camsı geçiş, ikinci dereceden faz geçişinin tipik bir örneğidir. Bir termal analiz deneyinde, geçişlerin bu kuralları $c_{p,m}$ ısı sığasında bir atlama yaptığı saptanırken, ΔH_m entalpisin de bu görülmeyebilir.

I.mertebeden Faz Geçişleri (n=1)

II.mertebeden Faz Geçişleri (n=2)



Şekil 3.2. EHRENFEST faz geçişleri sınıflandırılması.

	I.mertebeden Faz geçişleri (n=1)		II.mertebeden Faz geçişleri (n=2)
	$\left(\frac{\partial^n G'_m}{\partial T^n}\right)_p$	$\neq$	$\left(\frac{\partial^n G''_m}{\partial T^n}\right)_p$
	$\Delta_{trs}G = 0$		
$\left(\frac{\partial \Delta_{trs}G_m}{\partial T}\right)_p = -\Delta_{trs}S_m$	$\neq$ 0		$=$ 0
$\left(\frac{\partial^2 \Delta_{trs}G_m}{\partial T^2}\right)_p = -\frac{\Delta_{trs}C_{p,m}}{T}$	$\neq$ 0		$\neq$ 0

Gibbs entalpisinin basınç üzerinden türevi söz konusu olduğunda

	I.mertebeden Faz geçişleri (n=1)		II.mertebeden Faz geçişleri (n=2)
	$\left(\frac{\partial^n G'_m}{\partial T^n}\right)_T$	$\neq$	$\left(\frac{\partial^n G''_m}{\partial T^n}\right)_T$
	$\Delta_{trs}G = 0$		

Birinci türev

$$\left(\frac{\partial \Delta_{trs}G_m}{\partial p}\right) = \left(\frac{\partial G''_m}{\partial p}\right)_T - \left(\frac{\partial G''_m}{\partial p}\right)_T \quad \neq 0 \qquad = 0$$

$$= V''_m - V'_m = \Delta_{trs}V_m$$

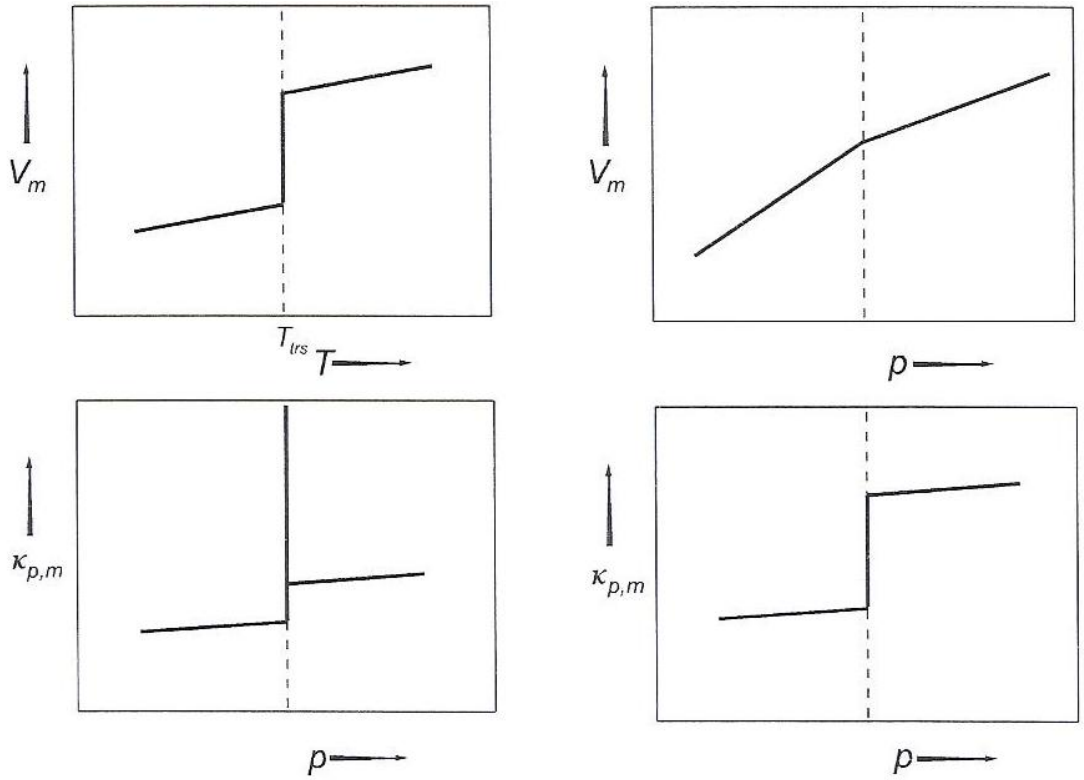
İkinci türev

$$\left(\frac{\partial^2 \Delta_{trs}G_m}{\partial p^2}\right)_T = -V_m \cdot \Delta_{trs}\kappa \quad \neq 0 \qquad \neq 0$$

olur.

Şekildeki tablolar da kullanılan denklemlerde C ısı sığası ($\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$), U iç enerji (J), Q ısı miktarı (J), G Gibbs entalpisi (J), T sıcaklık (K), S entropi ($\mathrm{J \cdot K^{-1}}$), p basınç (Pa), V hacim ($\mathrm{m^3}$), H entalpi (J), trs indisleri ise hal değişikliğini, n derece, m molar şeklinde ifade edilmiştir.

Hem camsı geçişleri hem de bazı katı-katı geçişleri besin maddelerinin içinde meydana gelir ve bu maddelerin kararlılığı, kalitesi ile ilgilidir. Faz diyagramlarının kurulumu için elde edilen veriler boyunca iki yaklaşım vardır; biri, sıcaklık taraması (termal analiz) ve incelemesi yaparak bu taramanın sonucu olarak gelen ilgili büyüklüklerdir. Diğer yaklaşım sabit sıcaklık ve basınç altında yapılan taramadır.



Şekil 3.3. Alternatif Ehrenfest faz geçişleri sınıflandırılması.

3.6 Gıdalarda Isı İletimi

Isı iletimi kendiliğinden her zaman sıcaklığı yüksek olan bir bölgeden düşük olan bir bölgeye doğru gerçekleşir. Isı iletiminin gerçekleşebilmesi için dört mekanizma vardır; radyasyon, kondüksiyon, konveksiyon ve faz geçişleridir. Bunlar Tablo 3.10' da listelenmiş ve kısaca açıklanmıştır ve sonrasında bu bölümde her durumda gerekli olan bu mekanizmaların her biri ve termal özellikleri ele alınmıştır.

Tablo 3.10: Isı iletimi mekanizmaları.

Mekanizma	**Açıklaması**	**Önekler**
Isı radrasyonu	1m den 1 mm'ye kadar olan dalga boylarına sahip elektromanyetik radyasyon	Izgara, kızıl ötesi ısı lambaları
Isı kondüksiyonu	Birbirine çarparak uyarılmış moleküllerin ısı taşıması	Katının ısıtılırken bir ucunun daha çok ısınması
Isı konveksiyonu	Isının akışkan sıvı tarafından iletilmesi	Merkezi ısıtma sistemi,akışkan hava veya sıvı
Faz geçişleri	Gizli ısı alımı	Su buharı ve yoğunlaşması

3.6.1 Isı radyasyonu

Isı radyasyonu, frekansı görünür ışığın altındaki elektromanyetik ışınımdır. Aynı zamanda infrared (kırmızıaltı) ışınımda denir. 0 K üstündeki tüm cisimler radyasyon ile ısı yayar. Tüm ısı iletim mekanizmalarında olduğu gibi, ısı, yüksek sıcaklıktaki cisimden düşük sıcaklığa doğru akacaktır. Ancak, cisimlerin birinin diğerine dokunmasına ya da arada bir maddenin olmasına ihtiyaç yoktur. Bu nedenle, ısı radyasyonu kusursuz bir vakum içinde çok uzak mesafelere ulaşabilir. Güneşten gelen ısıyı nasıl aldığımız bunun bir örneğidir. Isı radyasyonunun oluşması için, iki maddenin

birbirini görmesi yeterlidir. STEFAN-BOLTZMANN kanunu, radyasyon altında ısının akmasını hesaplamamızı sağlar;

$$Q = A \cdot \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \tag{3.54}$$

Burada ε bir cismin yayılma katsayısı, σ Stefan-Boltzman sabiti, T bir cismin termodinamik sıcaklığı (K), A radrasyon yayan veya emen bir bölgenin alanı (m^2) olarak ifade edilir.

Sıcaklıkları T_1 ve T_2 olan iki farklı cisim olduğunda, birinden diğerine net ısı akışı Stefan-Boltzmann kuralına göre;

$$\dot{Q} = A \cdot C_{12} \cdot \left(T_2^4 - T_1^4 \right) \tag{3.55}$$

dir.

Denklemde $\Delta\dot{Q}$ 1.cisimden 2.cisme ısı akışı $(\mathrm{J \cdot s^{-1}})$, C_{12} radrasyon değişim faktörü $(\mathrm{W \cdot K^{-4} \cdot m^{-2}})$, A radrasyon yayan alan (m^2), ε_1 1. cismin emisyon katsayısı, T_1 1. cismin sıcaklığı (K), ε_2 2. cismin emisyon katsayısı, T_2 2. cismin sıcaklığı (K) olarak ifade edilir.

Isı radyasyon değişim faktörü C_{12} cisimlerin salınım güçlerini birleştiren miktarının yanı sıra hem onların geometrilerine bağlı olan hem de göreli olarak cisimlerin yüzey soğurmasının bir niceliğidir. Örneğin, aynı geometri ve absortiviteye sahip iki paralel levhamız varsa, C_{12} ısı radyasyon değişim faktörü (Kurtzhalz, 2003) aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$C_{12} = \frac{\sigma}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \tag{3.56}$$

Tablo 3.11: Oda sıcaklığında bazı materyallerin yayılma değerleri.

Yüzey	Yayılma Değerleri (ε)
Cilalanmış krom	0.058
Cilalanmış alüminyum	0.095
Cilanmış bakır	0.03
Okside bakır	0.76
Paslı sac	0.685
Kalay kaplamalı sac	0.083
Pürüzlü beton	0.94
Beyaz boya	0.925
Düz siyah boya	0.97
Cam	0.88
Kırmızı tuğla	0.93
Alçıpen duvar	0.93
Pürüzlü buz yüzey	0.985
Su	0.90

Yayılma katsayısı

Bir malzemenin yayılma katsayısı, onun elektromanyetik radyasyonu (buradaki durumda ısı radyasyonu) yeteneğinin bir ölçüsü olarak verilir. Bir sonuç özelliği olan absortivite, bir malzemenin ısı radyasyonunu absorplayabilme yeteneğidir. Bir malzeme termal dengede olduğu zaman, absorptivitesinin ve yayılmasının eşit olduğu söylenebilir. Bu KİRCHHOFF YASASI olarak bilinir.

İdeal siyah bir cismin absorptivitesi maksimumdur ve $\varepsilon = 1$' dir. İdeal bir yansıtıcının, hiç radyasyon absorplamayan cisim için bu değer $\varepsilon = 0$' dır. Tüm gerçek cisimler gri cisim olarak bilinir ve absorptivitesi 0 ile 1 arasında değişir.

Bir malzemenin ε yayılma katsayısı ve yüzey sıcaklığı biliniyorsa, radyasyon ısı transferinin sebep olduğu cismin enerji kaybı hesaplanabilir. Benzer şekilde sıcaklığı bilinmiyorsa fakat yaydığı ısı enerjisi ölçebiliyorsa, cismin yüzey sıcaklığı hesaplana bilir. Bu, kızılötesi termometre ile yüzey sıcaklıklarının ölçülmesi için temel ilkedir (Pham, 2006).

3.6.2 Isı İletimi

Isı iletimi çalışmasına baktığımızda, kararlı hal koşulları (ısı akarken sıcaklığın zaman içinde herhangi bir noktada sabit kalması) ve kararsız hal koşulları (ısı akarken sıcaklığın herhangi bir noktada değişmesi) arasında ayrım yapmak önemlidir. Bu bölümde, kararlı hal ısı iletimi ele alınmıştır. Bu bekletme tüplerinde ve ısı değişimi boyunca sıvı gıda ürünlerinin ısıtılması ve soğutulması aşamasında sık karşılaşılan bir durumdur. Isıtma ve soğutma işlemleri kararlı hal koşulları altında işletilir, çünkü ısı transfer iletimi sabit hızda iken sistemin giriş ve çıkışlarındaki ortalama sıcaklık zamanla sabit kalmalıdır. Gıda işleme çalışmalarında kullanılan pek çok ısı değiştiricisi ya bir plaka (yassı plakadan yapılmış) ya da tüp şeklindedir (silindirik tüplerden yapılmış). Plaka ısı değiştiricisinde, sıvı ürün paslanmaz çelik iki plaka arasında akar. Bu plakaların diğer tarafında, farklı sıcaklıkta normal bir ısı değişimi (sıcak su ya da yoğuşmalı buhar gibi) akmaktadır. Bu durum sıcak olan taraftan soğuk olan tarafa ısı iletimine neden olur. Böylece soğuk gelen ürünün sıcaklığının yükselmesine diğer taraftaki sıcak sıvının ısısının değişmesine neden olur. Tüp şeklindeki bir ısı değiştiricisinde tüpün duvarının diğer tarafında bir akışkan, ortalama ısı alış verişi ile silindirik tüp boyunca ısıyı değiştirmek için akar.

Bir malzeme boyunca ısı iletimi uzayın tüm üç yönünde (3 boyutta) meydana gelebilir. Ancak, ısı alış-verişi uygulamalarında, sıcaklık gradyenti ince paslanmaz çelik duvardaki geçişi tek yöndedir, diğer iki yönde çok az ya da ısı alış-verişi olmamaktadır. Bu nedenle, kararlı durumda yassı plaka duvarındaki ısı iletimi en basit durum olan tek boyutta ısı iletimiyle sınırlandırılmıştır.

3.6.2a Tek Boyutta Kararlı-Durumda Yassı Bir Plakada Isı İletiminin Geçişi

Şekil 3.4' teki gibi katı bir yassı plakada ısının geçişi ele alınırsa; FOURİER' in ilk yasası ile ısı akış miktarı ifade edilebilir;

$$\frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \tag{3.57a}$$

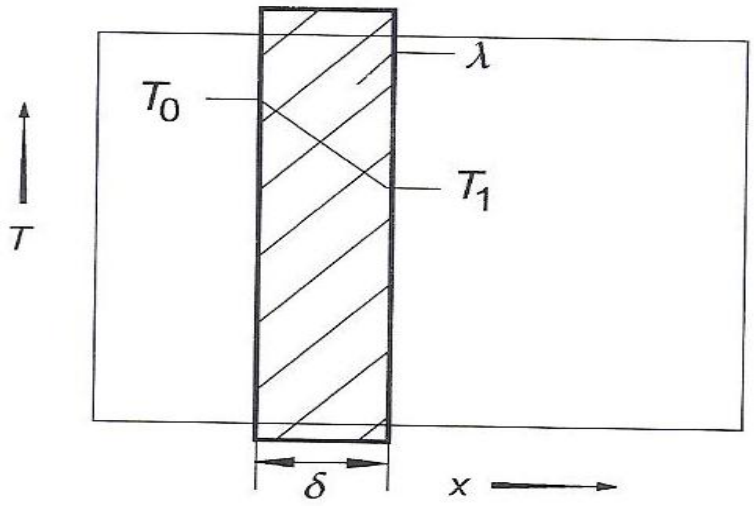
(Şekil 3.4) sembolleri ile:

$$\frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \cdot \frac{T_0 - T_1}{\delta} \tag{3.57b}$$

Ve

$$\dot{Q} = A \cdot \lambda \cdot \frac{T_0 - T_1}{\delta} \tag{3.58}$$

olur.



Şekil 3.4. Katı yassı bir plakada sıcaklık geçişi.

Tablo 3.12: Şekil 3.4 için ısı akışı ve sıcaklık gradiyenti sonuçları.

Durum	**Sıcaklık Gradiyenti**	**İfade**
$x > 0$	pozitif	T artan x artan $T_1 > T_0$
$x > 0$	negatif	T azalan x artan $T_1 < T_0$

Burada $\frac{dT}{dx}$ sıcaklık gradiyenti ($\mathrm{K \cdot m^{-1}}$), λ ısı iletkenliği ($\mathrm{W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}}$), $\dot{Q}$ ısı akışı (W), $\frac{\dot{Q}}{A}$ ısı akış yoğunluğu ($\mathrm{W \cdot m^{-1}}$) olarak ifade edilir.

Fourier kanundaki eksi işareti, negatif bir sıcaklık sabiti pozitif bir ısı akışına yanıt olması için gereklidir. Çünkü ısı sadece yüksekten düşük sıcaklığa doğru akacaktır, bu "aşağı tepe" ya da negatif eğimdir. Tablo 3.12' de pozitif ve negatif sıcaklık sabitlerinde ısı akışının nasıl olduğu gösterilmiştir.

Isı iletimi zaman üzerinden integral ile hesaplanabilir;

$$\dot{Q} = \frac{dQ}{dT} \tag{3.59}$$

olduğundan

$$dQ = -A \cdot \lambda \cdot \frac{T_1 - T_0}{\delta} \cdot dt \tag{3.60}$$

ve buradan da

$$Q = \int_{t=0}^{t} A \cdot \frac{\lambda}{\delta} \cdot (T_0 - T_1)\, dt \tag{3.61}$$

olur.

3.6.2b Üç Boyutlu Kararlı Durumda Isı İletimi

En genel durumda, üç boyutta sıcaklık değişimleri olduğu zaman, ısı bir malzemenin üç boyutu boyunca transfer olacaktır. Bu durumda, Fourier kanunu sıcaklık değişimi için üç yönde (*x*, *y*, z,) diferansiyel şeklinde ifade edilmelidir.

$$\frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial y}, \frac{\partial T}{\partial z} \right) \tag{3.62}$$

benzer biçimde;

$$\frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) T = -\lambda \cdot grad\, T \tag{3.63}$$

veya kısaltma ile;

$$\nabla T = grad\, T = \lambda \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) T \tag{3.64}$$

olmak üzere kısaca;

$$\frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \cdot \nabla T \tag{3.65}$$

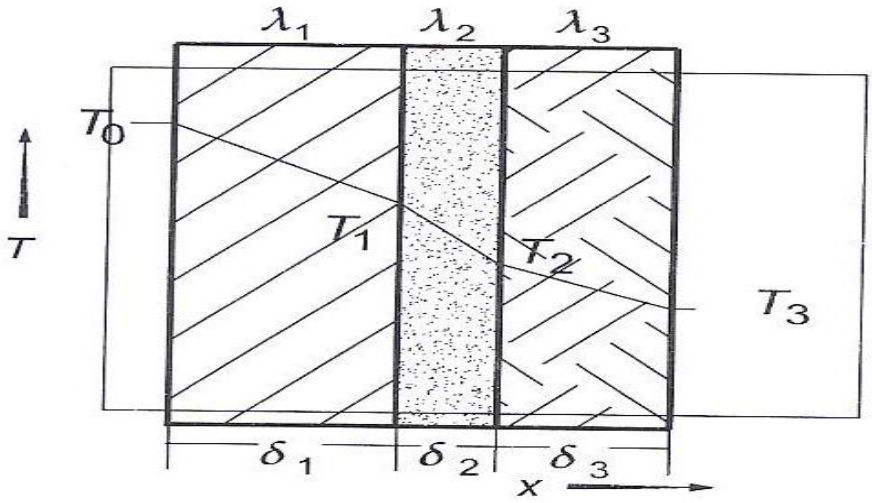
şeklinde ifade edilebilir.

Burada ∇ matris cebirin de nabla veya dell operatörü olarak isimlendirilir.

3.6.2c Tek Boyutta Çoklu Katmanlarda Kararlı Durum Isı İletimi

Şekil 3.5 farklı malzemelerin oluşturduğu birkaç katmandan yapılmış yassı bir duvardaki ısı transferini göstermektedir. Her bir malzemenin ısı geçirgenliği λ ve kalınlıkları δ farklıdır.

Bu durumda, ısı akış miktarı için matematiksel bir ifadesi aşağıdaki gibi tanımlanabilir. Çünkü ısı akışı üç katman boyunca benzerdir;



Şekil 3.5. Çok katmanlı yassı duvarda sıcaklık geçişi.

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 = \dot{Q}_3 \tag{3.66}$$

$$\frac{\dot{Q}_1}{A} = \frac{\dot{Q}_2}{A} = \frac{\dot{Q}_3}{A} \tag{3.67}$$

$$\frac{\dot{Q}_1}{A} = -\lambda_1 \cdot \frac{T_1 - T_0}{\delta_1} \tag{3.68}$$

için

$$T_0 - T_1 = \frac{\dot{Q}_1}{A} \cdot \frac{\delta_1}{\lambda_1} \tag{3.69}$$

dir ve benzer şekilde,

$$\frac{\dot{Q}_2}{A} = -\lambda_2 \cdot \frac{T_2 - T_1}{\delta_2} \tag{3.70}$$

için

$$T_1 - T_2 = \frac{\dot{Q}_2}{A} \cdot \frac{\delta_2}{\lambda_2} \tag{3.71}$$

dir ve yine

$$\frac{\dot{Q}_3}{A} = -\lambda_3 \cdot \frac{T_3 - T_2}{\delta_3} \tag{3.72}$$

için

$$T_2 - T_3 = \frac{\dot{Q}_3}{A} \cdot \frac{\delta_3}{\lambda_3} \tag{7.73}$$

olmaktadır.

(3.69), (3.71) ve (3.73) denklemlerindeki sıcaklık farklarını toplayarak, toplam sıcaklık farkı elde edilebilir;

$$T_0 - T_3 = \frac{\dot{Q}}{A} \cdot \left(\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3} \right) \tag{3.74}$$

böylece, ısı akış yoğunluğu;

$$\frac{\dot{Q}}{A}=\frac{1}{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2}+\frac{\delta_3}{\lambda_3}\right)}\cdot\left(T_0-T_3\right) \tag{3.75}$$

olur. Buradan da

$$\frac{\dot{Q}}{A}=\frac{1}{\left(\frac{\delta_1}{\lambda_1}+\frac{\delta_2}{\lambda_2}+\frac{\delta_3}{\lambda_3}\right)}\cdot\Delta T \tag{3.76}$$

dir.

n katmanlı kararlı durum için daha genel bir ifade yazılabilir. Isı akış yoğunluğu;

$$\frac{\dot{Q}}{A}=\frac{1}{\sum_i^n\frac{\delta_i}{\lambda_i}}\cdot\Delta T \tag{3.77}$$

ısı akışı ile;

$$\dot{Q}=A\cdot\frac{1}{\sum_i^n\frac{\delta_i}{\lambda_i}}\cdot\Delta T \tag{3.78}$$

ve ısı miktarı;

$$Q=A\cdot\frac{1}{\sum_i^n\frac{\delta_i}{\lambda_i}}\cdot\Delta T\cdot t \tag{3.79}$$

olarak elde edilir.

Her bir katmanın yüzey alanı farklı olduğu zaman, denklem (3.79) u;

$$\dot{Q}=\frac{1}{\sum_i^n\frac{\delta_i}{\lambda_i\cdot A_i}}\cdot\Delta T \tag{3.80}$$

şeklinde ifade etmek uygun olur.

Çok katmanlı kararlı durumlarda ısı geçişlerinde direnç kavramı da kullanabilir. Bunu kısaltılmış olarak;

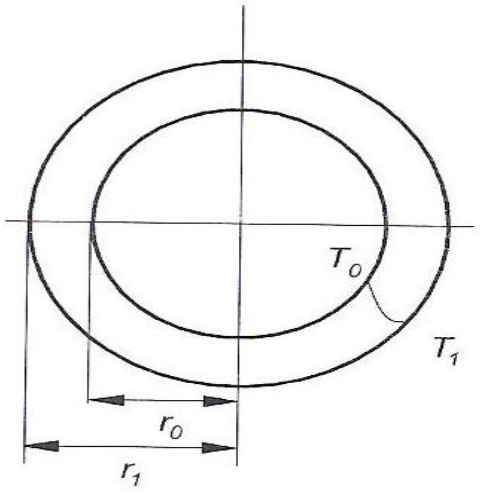
$$\sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i \cdot A_i} = \sum_{i=1}^{n} R_i \tag{3.81}$$

şeklinde yazılabilir.

Burada λ ısı iletkenliği ($\mathrm{W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}}$), R ısı direnci ($\mathrm{K^{-1} \cdot W^{-1}}$), δ kalınlık (m), i katman indisi, $\dot{Q}$ ısı akışı (W), n katmanların toplam sayısı, Q ısı (J) olarak ifade edilir.

3.6.2d Bir Boyutta Tek Katmanlı Silindirik Yüzeyde Kararlı Isı İletimi

Şekil 3.6' da silindirik bir yüzeyde ısı transferi gösterilmektedir. Örneğin, tüplü ısı değiştiriciler kullanımı bu şekildedir. Bu durumda, Fourier kanunu için benzer ifade hala geçerlidir. Toplam duvar kalınlığı dış ve iç tüplerin yarıçapları arasındaki fark olarak ifade edilmelidir.



Şekil 3.6. Tek katmanlı silindirik duvarda sıcaklık profili.

Tüpün kalınlığı boyunca artan mesafe "*r*" yarıçap olarak ifade edilmelidir. Bununla birlikte, tek katmanlı silindirik yüzey durumunda, Fourier kanunu;

$$\frac{\dot{Q}}{A} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dt} \tag{3.82}$$

şeklinde yazılabilir. Isı akısı silindirik yüzey üzerinden integral ile elde edilebilir.

$$dT = -\frac{\dot{Q}}{A \cdot \lambda} dr = \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot l \cdot r \cdot \lambda} dr \tag{3.83}$$

$$\int_{T_0}^{T_1} dT = -\int_{r_0}^{r_1} \frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot l \cdot r \cdot \lambda} dr = -\frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot l \cdot \lambda} \int_{r_0}^{r_1} \frac{dr}{r} \tag{3.84}$$

$$T_1 - T_0 = -\frac{\dot{Q}}{2\pi \cdot l \cdot \lambda} \ln \frac{r_1}{r_0} \tag{3.85}$$

olur ve böylece

$$\dot{Q} = \frac{2\pi \cdot l}{\ln \frac{r_1}{r_0}} \cdot \lambda \cdot \left(T_o - T_1 \right) \tag{3.86}$$

ile verilir. Şekil 3.6' daki ısı iletiminde alternatif bir hesaplama için ortalama bir A_m alan kullanılır. A_m' nin değeri ortalama bir yarıçap kullanılarak hesaplanabilir. Bu ortalama yarıçapı aritmetik olarak;

$$r_m = \frac{r_1 + r_0}{2} \tag{3.87}$$

şeklinde bulunabilir.

Fakat ilk olarak, r_0 ve r_1 arasındaki r_m ortalama yarıçapı hesaplanmalıdır. (3.82) denklemi;

$$-\frac{\dot{Q}}{A_m} = \frac{\dot{Q}}{2\pi r_m \cdot l} = \frac{\lambda}{(r_1 - r_0)} \cdot (T_1 - T_0) \tag{3.88}$$

olur ve ısı akışı için;

$$\dot{Q} = \frac{2\pi r_m \cdot l}{(r_1 - r_0)} \cdot \lambda \cdot (T_0 - T_1) \tag{3.89}$$

elde edilir. (3.86) denklemi ile karşılaştırırsak;

$$2\pi \cdot r_m \cdot l \cdot \frac{\lambda}{r_1 - r_0} \cdot (T_0 - T_1) = \frac{2\pi l}{\ln \frac{r_1}{r_0}} \cdot \lambda (T_0 - T_1) \tag{3.90}$$

dir. Sonuçta;

$$\frac{r_m}{r_1 - r_0} = \frac{1}{\ln \frac{r_1}{r_0}} \tag{3.91}$$

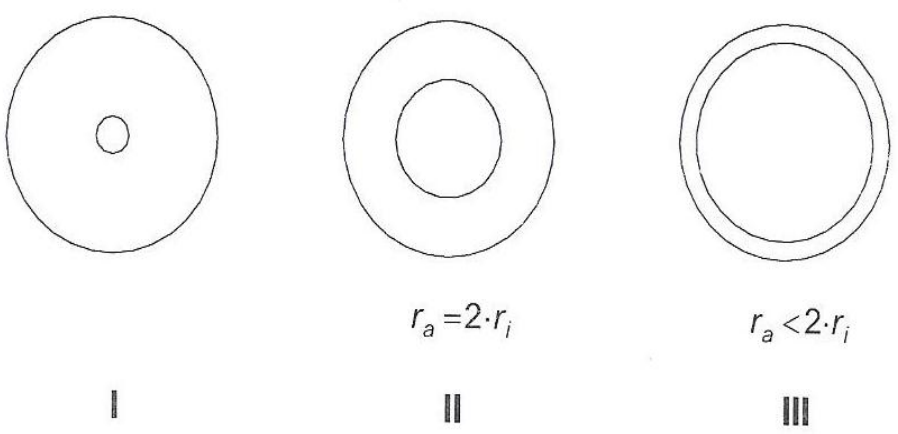
ve

$$r_m = \frac{r_1 - r_0}{\ln \frac{r_1}{r_0}} \tag{3.92}$$

olur.

Sonuç olarak, tüm tüp tiplerinde r_m' yi hesaplamak için bir algoritmaya sahibiz. Bu tip ortalama yarıçapa logaritmik yarıçap denir. Tüm tüpler için kullanılabilir. İnce

duvarlı bir tüp durumunda, aritmetik ortalamayı kullanılmalıdır. Fakat duvarın ince mi kalın mı olduğuna nasıl karar verilir? Şekil 3.7 İnce duvarlı bir tüpün dış yarıçapının, iç yarıçapının iki katından küçük olduğunu göstermektedir ($r_a < 2r_i$). Tersi durumda, ($r_a > 2r_i$) yani dış yarıçapın, iç yarıçapın 2 katından büyük olması ise kalın duvarlı tüp olduğunu göstermektedir. İkisi arasındaki durum ise dış yarıçapın iki katına eşit olmasıdır ($r_a = 2r_i$). Bu bir sınır durumunu göstermektedir ve her iki yaklaşımda kullanılabilir.



Şekil 3.7 (I) kalın duvarlı tüp. (III) ince duvarlı tüp. (II) I ve III arasındaki sınır durumu

Örnek 3.3. Logaritmik ve aritmetik ortalamanın karşılaştırılması

Bu noktada aritmetik ortalama kullanımının tahmini, logaritmik ortalama kullanımının ise kesin olduğu söylenebilir. Fakat aritmetik ortalama tahmini yerine logaritmik ortalama kesinliğinin kullanımıyla ne kadar hata yapıldığını bilinmesi gerekir. Şekil 3.7' de II. Durum için hesaplamalar karşılaştırılmıştır.

Logaritmik Ortalama	**Aritmetik Ortalama**
$r_m = \dfrac{r_a - r_i}{\ln \dfrac{r_a}{r_i}}$	$r_m = \dfrac{r_a + r_i}{2}$
$r_a = 2r_i$	
$m = \dfrac{2r_i - r_i}{\ln \dfrac{2r_i}{r_i}}$	$r_m = \dfrac{2r_i + r_i}{2}$
$r_m = \dfrac{r_i}{\ln 2}$	$r_m = \dfrac{3}{2} r_i$
$r_m = 1.44\, r_i$	$r_m = 1.5 r_i$

Buradan bağıl hata hesaplanırsa:

$\dfrac{\Delta r_m}{r_m} = \dfrac{1.5 r_i - 1.44 r_i}{1.44 r_i} = \dfrac{0.06}{1.44} = \%4$ olarak bulunur.

Sonuç olarak gerçek değerinden %4 daha az bir sonuç elde edildiği görülmektedir.

Isı akışı yoğunluğu için,

$$\frac{\dot{Q}}{A_m} = \frac{\lambda}{(r_a - r_i)} \cdot (T_i - T_a) \tag{3.93}$$

ısı akışı için;

$$\dot{Q} = A_m \cdot \frac{\lambda}{(r_a - r_i)} \cdot (T_i - T_a) \tag{3.94}$$

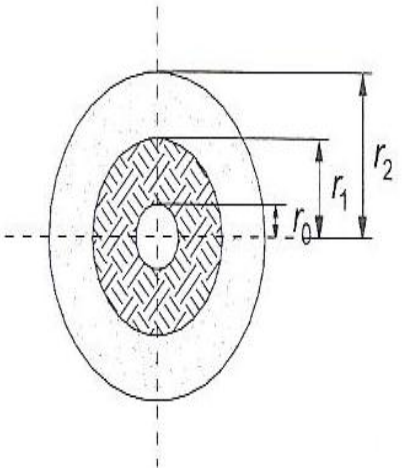
ve ısı için ise;

$$Q = A_m \cdot \frac{\lambda}{(r_a - r_i)} \cdot (T_i - T_a) \cdot t \tag{3.95}$$

ifadeleri elde edilir.

3.6.2e Çok Katmanlı Silindirik Duvarda Bir Boyutlu Kararlı Isı İletimi

Şekil 3.8 farklı malzemelerin birkaç katmanından yapılmış silindirik bir duvarda ısı transferini göstermektedir. Her malzemenin ısı iletim katsayısı λ ve kalınlığı δ farklıdır. Bu durumda, ısı akış miktarı için genel matematiksel denklem (3.77)' ye benzerdir.



Şekil 3.8. Çok katmanlı silindirik duvar.

Çok katmanlı yassı duvar denklemini yazarak başlanırsa;

$$\dot{Q} = \frac{1}{\sum_{i}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i \cdot A_i}} \cdot \Delta T \tag{3.80}$$

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{\delta_i}{\lambda_i \cdot A_i} = \sum_{i=1}^{n} R_i \tag{3.81}$$

dir. (3.92) denklemi ile

$$r_m = \frac{r_n - r_{n-1}}{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}} \tag{3.90}$$

olmak üzere,

$$\dot{Q} = \frac{1}{\sum_i^n \frac{r_n - r_{n-1}}{\lambda_n \cdot 2\pi r_m \cdot l}} \cdot \Delta T = \frac{2\pi l}{\sum \frac{r_n - r_{n-1}}{\lambda_n \cdot r_{m_n}}} \cdot \Delta T \tag{3.97}$$

olur. Paydasını yalnız bırakırsak;

$$\sum \frac{(r_n - r_{n-1}) \cdot \ln \frac{r_n}{r_{n-1}}}{\lambda_n \cdot (r_n - r_{n-1})} = \sum \frac{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}}{\lambda_n} \tag{3.98}$$

sonuç olarak ısı akışı için;

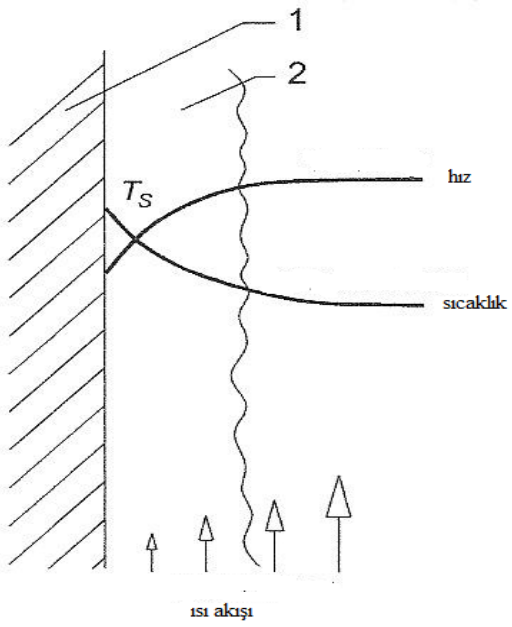
$$\dot{Q} = \frac{2\pi l}{\sum_{i=1}^n \frac{\ln \frac{r_n}{r_{n-1}}}{\lambda_n}} \cdot \Delta T \tag{3.99}$$

elde edilmiş olur.

Isı iletiminin radyasyonla iletimi olduğu gibi, aynı zamanda alternatif mekanizmalar olarak konveksiyon yoluyla ve faz geçişiyle de ısı iletimi olabilir. Sonuç olarak, ısı iletimini genel olarak hesaplamak için pek çok parametre ve özellikler bulunmaktadır ve burada bunlar kısaca açıklanmıştır.

3.6.3 Konveksiyon Yoluyla Isı İletimi

Konveksiyon ısı iletimi, ısı enerjisi katı bir yüzey ile temas halinde hareket eden akışkan ile karşılaştığı zaman meydana gelir. Akışkan, sıvı ya da gaz olabilir. Örneğin, soğuk dış mekandan ısıtılmış bir odaya girdiğimizde odada dolaşan sıcak ısıtılmış hava ile yüzey temas haline gelir ve ısınır. Benzer şekilde, hava, ısınmış metal bir radyatörün yüzeyi ile temas ettiğinde ısınır. Bunun anlamı, metal radyatörün içindeki akan sıcak sudan ısı iletimidir ve radyatörün dış yüzeyden odada ki havanın konveksiyonla sirkülasyon yapmasıdır. Konveksiyonla ısı iletimi durumunda, akıcı madde hem sıcak hem de soğuk taşır.



Şekil 3.9. Konveksiyon yoluyla ısı iletimi: 1. sıcak duvar 2. sınır katmanı.

Bu hareket sıcaklığın artmasıyla, yoğunluk azalmasıyla, doğal kaldırma kuvveti etkisi nedeni ile olabilir. Konveksiyon ısı iletimi oranının belirlenmesi bu sıvı akışının nedeniyle karmaşıktır. Bir sıvı katı üzerinde kaydığı zaman, sıvının viskoz özellikleri nedeniyle yüzeye yakın yerlerde gerilmeler meydana gelir. Komşu moleküller onları geçmeye çalışırken yüzeydeki moleküller kendilerini yüzeye eklemeye çalışır. Bunun sebebi yüzey yakınında gelişen hız profilidir.

Aşağıdaki moleküller tarafından sürtünmenin etkisiyle sıvı akışı yavaşlarken, yüzeydeki moleküler hareket etmez ve yapışır. Bu nedenle, bulk bölgesine akan sıvı ulaşana kadar yüzeyden uzaklaşan akışkanın hızı yavaş yavaş artar. Burada maksimum olur. Bu bölge sınır tabakası olarak bilinir.

Hız profili ile birlikte, duvara yakın sınır tabakasında sıcaklık profili gelişir. Bunun nedeni, bir sıvıdan bir katıya taşınan ısı iletim oranı, yüzeyle temas halindeki sıvı hızına kısmen bağlı olmasıdır. Bu göreceli hız yapışkan viskoz etkileri nedeniyle yüzeyde sıfıra yakındır, ısı iletimi de kötüdür. Bunun anlamı yüzeyin, bulk sıvı akışında sıcaklık duygusunun olmadığı ve yüzeyden uzaklaştıkça sıcaklığın değişeceğidir. Bu nedenle, yüzey yakınındaki sınır bölgesinde sanki bir yalıtım malzemesi eklenmiş gibidir. Sıvı ve katı yüzey arasına daha fazla ısı direnci ekler.

Isı İletim Katsayısı

Matematiksel olarak, bu direnç Fourier' in birinci kanunundan elde edebilir. Bu görünmez sınır tabakasının "termal iletkenliği" için bir değer atanabilir. Bunun ismi ısı iletim katsayısıdır ve "α" ile gösterilir. O zaman ısı iletimi aşağıdaki gibi basitçe ifade edilebilir.

T_S sıcak yüzey sıcaklığı , T_∞ soğuk bir sıvı sıcaklığı olduğunda buradan bir sınır katmanındaki ısı transferi;

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (T_S - T_\infty) \tag{3.100}$$

denklemi ile verilir.

Isı iletim katsayısını, görünmez bir sınır tabakası genel "termal iletkenliği" temsil eden bir sayısal değer olduğunu not etmek önemlidir. Başka şeylerin yanı sıra sistem geometrisi olarak yüzey temas değeri, yüzey bağıl hızı, yüzey ile sıvının

temasında sıvının, fiziksel, termal ve viskoz özellikleri ve kombine etkilerine bağlıdır. Bu nedenle, ısı transfer katsayısı bir materyal özelliği değildir. Bu süreç ısı iletim denklemleri bir parametre (katsayısı) sistem altında çalışma koşullarına göre değişir.

3.7. Termal Özelliklerin Ölçülmesi

Termal iletkenlik ve termal difüzyon malzemenin özellikleridir, ısı malzeme tarafından yönetilir. Bu özelliklerin ikisi de ısı iletim transferi ile ilgilidir. Geçici ısı iletiminde (kararsız-durum) termal difüzyon ısı akışını yönetirken, kararlı durumda termal iletkenlik ısı akışını yönetmektedir. Kararlı durum ısı iletkenliği, zamanla değişmeyen sabit bir sıcaklıkta meydana gelir. Bu nedenle termal iletkenliğin ölçülmesinde kullanılan ölçüm teknikleri sıcaklık sabiti ve bir sıcaklık sabitinde zamanla azalan sıcaklık akışıyla gerçekleştirilir.

3.7.1 Kararlı Durum Teknikleri

Kararlı durum altında ölçmenin birincil avantajı basit ve pahalı olmayan laboratuar ekipmanlarının kullanılmasıdır. Veri analizi yalın ve Fourier' in birinci kanununa göre yapılır. Dezavantajı, ölçümlerin kararlı durum altında alınmasının gerekmesidir. Birçok laboratuar da kontrollü kararlı duruma ulaşmak çok zaman alır.

Bir malzemenin termal iletkenlik ölçümü için yapılan deneyin temel tipi ısı transferinin olduğu ve geometrisi bilinen (alan, kalınlık) tek yönde örnekler kullanılmasıdır. Bir kez kararlı duruma ulaşıldığında (örneğin zıt ucundaki sıcaklık sabit kalır), sabit sıcaklıkları kaydetmek ve ısı akışını ölçmek gerekir. Daha sonra termal iletkenlik Fourier' in birinci yasasından hesaplanabilir.

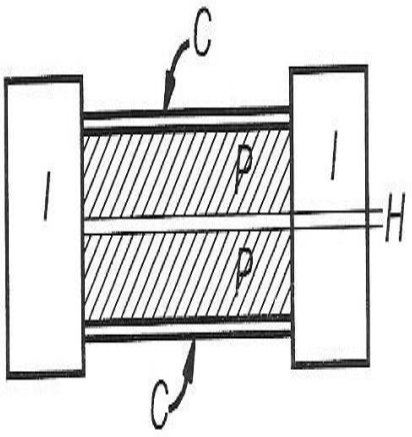
Normalde bu deneylerde kullanılan ısı kaynağı elektriksel dirençtir, ısı akışı voltaj ve akımdan hesaplanabilir. Burada sıcaklık direnç termometresi ile ölçülür.

Şekil 3.10' da böyle bir deney için kullanılan laboratuar cihazlarının şematik çizimi gösterilmektedir. Geometrisi bilinen bir malzeme, ısı kaynağının her iki yanına konularak sandviç yapılmıştır. Enine yönde ısı transferini önlemek için kenarları izole edilmiştir.

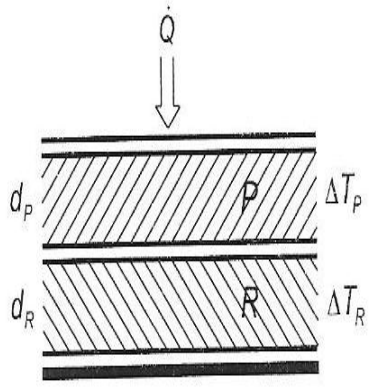
Şekil 3.10' da ki gibi bir deney düzeneğini kullandığımızda, termal iletkenliği bilinmeyen bir malzemeyi sıcak yüzeyin bir tarafına, termal iletkenliği bilinen bir malzemeyi de diğer tarafına koymamızı mümkün kılar. Bu termal iletkenliğin hesaplanmasına izin verir ve Şekil 3.11' de gösterildiği gibi ısı akışını ölçme gereğini ortadan kaldırır. Sadece kararlı durum sıcaklıklarının ölçülmesi gereklidir.

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_R} = \frac{d_p}{d_R} \cdot \frac{\Delta T_R}{\Delta T_p} \tag{3.101}$$

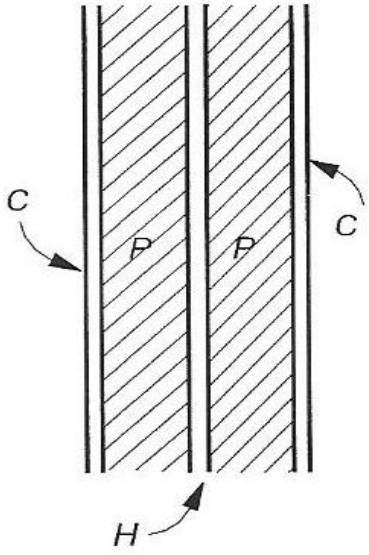
olarak bulunur.



Şekil 3.10. Korumalı sıcak plaka yöntemi ile Termal iletkenliğin ölçülmesi: P örnek C soğutulmuş plaka, H ısıtıcı, I termal izolasyon.



Şekil 3.11. Referans malzemeye bağlı olarak termal iletkenliğin ölçülmesi için iki plaka tekniği: P örnek malzeme, R referans malzeme.



Şekil 3.12. Akışkan örnek malzemelerin termal iletkenliğinin ölçülmesi için Eşmerkezli silindir metodu.

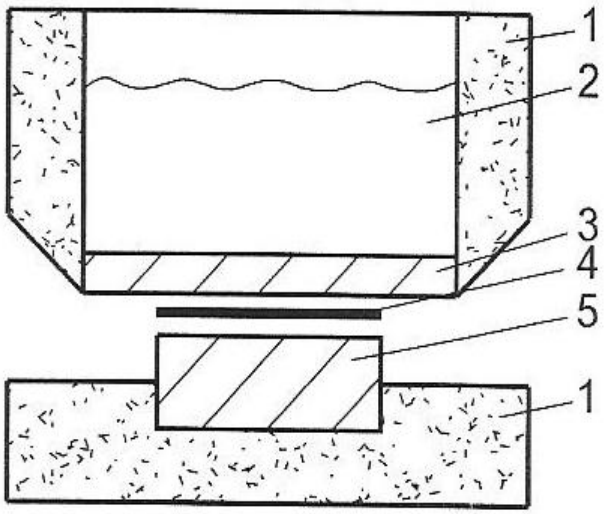
Sıvı ve akıcı örneklerin termal iletkenliğini ölçmek için, yassı plaka kullanımı yerine şekil (3.12)' te ki gibi eşmerkezli silindir metodu kullanılır. Bu yöntemde ısı kaynağı silindirik bir çubuktur. Dar bir halka şeklinde boşluk bırakarak içi boş silindir tüp içinde sıvı örneği tutulur. Herhangi bir doğal konveksiyondan kaçınmak için halka kalınlığı (1-3 mm) çok küçük tutulmalıdır ve akışkan viskozitesine bağlı sıcaklık farklarının da küçük olması gerekir (1-5 K).

Bu tür ölçüm tekniklerinde büyük bakım gerektiren ve ısı kayıplarını en aza indiren cihazlar gerekir. Sıcaklık algılama problarının yalıtılmış olması ve ölçülen örnek

sıcaklıklarından emin olmak için dikkatli bir şekilde yerleştirilmesi önemlidir. Bu ölçümler cihazın herhangi bir yerinde temas varsa değişik sonuçlar verir. Termal iletkenlik için farklı ölçüm metotları da bulunmaktadır (Spiess vd., 2001, Nesvadba, 1982).

3.7.2 Yarı Kararlı Durum Teknikleri

Isı akışının ölçüm boyunca sabit olduğu farz edildiğinde Fourier' in ikinci yasasına dayanan bazı teknikler mevcuttur. Bu teknikler malzemenin termal iletkenliği çok düşük olduğu zaman yararlıdır. Bu tekniklerden biri FİTCH metodudur. Bu metot bir ısı kaynağı ve bakır blok sabit sıcaklıkta sıvı ile dolu bir kaptan oluşmaktadır (Şekil 3.14). Örnek malzeme plakalar arasında sandviç yapılır.



Şekil 3.13. Termal iletkenliğin ölçüldüğü Fitch cihazı (Rahman, 1995): 1. yalıtım malzemesi, 2. T_s sıcaklığında sıvı, 3. ve 5. bakır blok, 4. örnek malzeme.

Yarı kararlı durumda ısı iletkenliğini ölçmek için aşağıda ki basit matematiksel eşitlik kullanılabilir.

$$\frac{A \cdot \lambda \cdot (T - T_S)}{\delta} = m \cdot c_p \cdot \frac{dT}{dt} \tag{3.102}$$

$T = 0$ ve $T = T_0$ başlangıç koşulları olmak üzere,

$$\ln \frac{T_0 - T_S}{T - T_S} = \frac{A \cdot \lambda \cdot t}{\delta \cdot m \cdot c_p} \tag{3.103}$$

olur.

Denklemlerde T_0 bakır bloğun başlangıç sıcaklığı (K), t zaman (s), T bakır bloğun sıcaklığı (K), m kütle (kg), T_S Şekil 3.13 deki üst kabın sıcaklığı (K), A alan (m^2), δ kalınlık (m), c_p özgül ısı kapasitesi($\mathrm{J \cdot K^{-1} \cdot kg^{-1}}$) ,$\lambda$ ısıl iletkenlik ($\mathrm{W \cdot K^{-1} \cdot m^{-1}}$) olarak ifade edilir.

3.7.3 Kararlı Olmayan Durum Teknikleri

Kararlı olmayan ya da süreksiz ısı iletim metotları örnek bir malzemenin termal iletkenliğinin ölçülmesinde kullanılır. Süreksiz ısı iletiminde, ısı akışı bir malzeme içinde zamanla birikir. Zamanla malzemenin iç sıcaklığının artmasına neden olur. Böylece sıcaklık sabiti sabit olmayacak fakat zamanla üstel olarak azalacak. Bu nedenle, bu deneysel yöntemin amacı ısı akışı bilinen bir örnekle sıcaklık zaman kaydını elde etmektir. Daha sonra veri analizi Fourier' in ikinci yasasına göre yapılır.

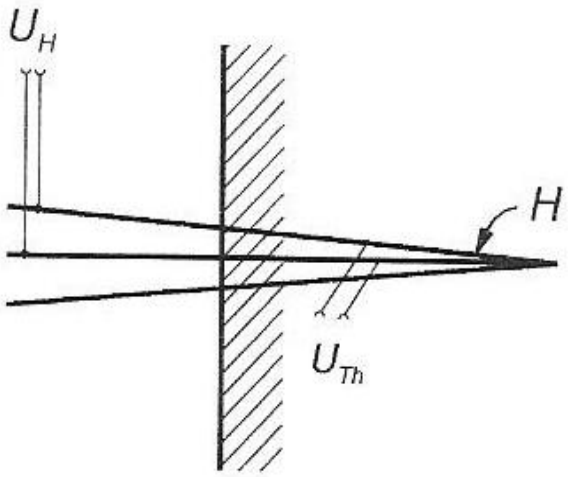
Şekil (3.12)' de gösterilen silindirik yönteme benzeyen bir deney, bu amaç için kullanılabilir. Örnek malzeme silindirdeki boş alana yerleştirilir. Isı kaynağı merkeze ve

silindir boyunca yerleştirilir. Deneyin başlangıcında, malzeme ve ısı kaynağının sıcaklıkları t = 0’ da aynıdır. Isıtıcı çalıştırıldığında, ısı sabit bir oranda $\dot{Q}$ akmaya başlayacaktır. Sonra, numunenin sıcaklığı ısıtma süresi boyunca ölçülür ve kayıt edilir. Örneğin Termal iletkenliği;

$$\lambda = \frac{\dot{Q}}{4\pi \cdot L \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_1)} \cdot \ln \frac{r_2}{r_1} \tag{3.104}$$

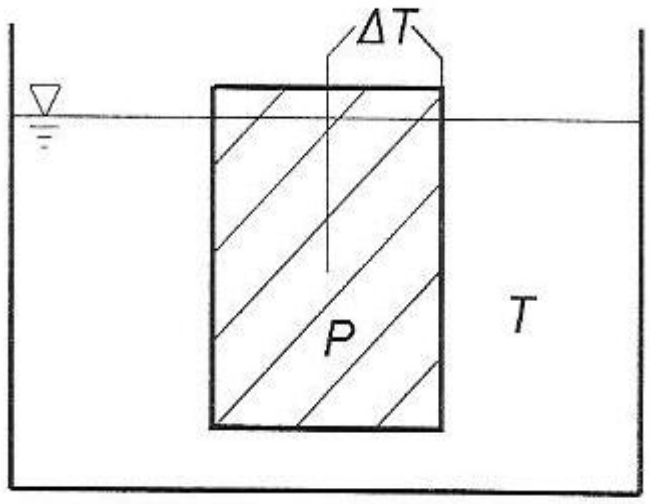
eşitliğinden elde edilir.

Diğer bir yöntem iğne tipi ısı probu kullanımını içerir. İğne malzemenin merkezine batırılır ve başlangıç sıcaklığı ölçülüp, kayıt edilir. Daha sonra ısı akış miktarı bilinen bir iğneden yayınlanır ve bu ısı akışı süresince numunenin sıcaklığı ölçülüp kayıt edilir (Şekil 3.14).



Şekil 3.14. Termal iletkenliği ölçmek için ısı prob sensörü: H ısıtılan element, ısı kaynağının gücü için U_H elektriksel potansiyel, sıcaklık ölçmek için kullanılan ısıl çiftin U_{TH} gerilim potansiyeli.

Termal iletkenlik yerine termal difüzyon ölçülmesi gerektiğinde, nispeten daha basit bir yöntem numunenin hem içerden hem de dışarıdan ısıtılarak sıcaklığının ölçülmesine dayanır. Bunu yapmak için, deneyciler şöyle bir yol kurmuşlardır.



Şekil 3.15. Termal difüzyon ölçüm tekniği: P örnek malzeme, T örneğin içinde bulunduğu kontrollü sıcaklığı.

Geometrik merkezdeki (soğuk uç) sıcaklığı zamanla ölçülürken örneğin dış yüzeyine hızlıca bilinen bir sıcaklık uygulanır. Bu genellikle ısıtılmış bir sıvıya ya da sıcaklığı sabit tutulan sıvıya daldırılarak yapılır (Şekil 3.15). Ortaya çıkan sıcak nokta sıcaklık profili çizilen yarı-log alan üzerinde düz bir çizgi üretene kadar devam edilir.

3.8. Besinlerin Kalori Değerleri

3.8.1 İnsan Vücudunun Kalori (Enerji) İhtiyacı

Besinler enerji içerir. Tüketildikleri zaman bu enerji insan vücuduna aktarılır. Bu enerji ilk olarak vücuttaki doku ve organların içindeki hücrelerin temel görevlerini yapabilmesi için kullanılır hatta vücut dinlenmekteyken bile gereklidir (bazal metabolizma). Daha sonra, alınan enerji vücudun taşınması ve iş yapabilmesi için kas dokuları tarafından iş enerjisine çevrilir. Sonunda fazla enerji vücudun normal sıcaklığını koruduktan sonra ısı olarak vücuttan atılır. Toplam enerji, aşağıdaki enerji dengesinden hesaplanabilir;

$$E_A = E_M + E_N + E_B \tag{3.117}$$

Denklemde E_A alınan enerji (J), E_M metabolize enerji (J), E_N metabolize olmayan enerji (J), E_B vücut atıklarıyla atılan enerji (J) olarak ifade edilir.

Sağlıklı bir insanın atıklarının çok az bir kısmı protein, yağ ve karbonhidrat içerdiği için, çok az bir enerji atıkla atılır.

Gıdalarımızdaki karbonhidratlar, sadece sindirilebilecek kadardır ve bağırsakta absorbe edilebilir, vücut tarafından enerji olarak alınır. Geriye kalanlara selüloz lifleri denir ve vücut atığı ile atılır. Bu sindirilmemiş liflerin bağırsak parçası içindeki doğal mikrobiyal popülasyonların, sağlıklı bir denge sürdürebilmesinde önemli bir rolü vardır. Bu selüloz lifleri, bağırsaktaki mikrobiyal metabolizmasını sürdürebilmek için besin üreten bağırsak mikropları tarafından üretilen enzimlerle daha fazla parçalanırlar. Bu nedenle, bu aktivite sağlıklı kalabilmek için önemli bir fizyolojik etki sağlar fakat bu vücuda alınan enerjide kayda değer bir katkıda bulunmaz. Sonuç olarak, bir önceki enerji denklemine baktığımızda;

$$E_A = E_M + E_B \tag{3.118}$$

olurki;

$$E_A \approx E_M \tag{3.119}$$

dir.

İnsan vücudunun ihtiyaç duyduğu $\dot{E}$ güç pek çok faktöre bağlıdır, örneğin yaş, cinsiyet, çalışma… genel bir kural olarak, 24 saatlik bir süreçte alınan insan gücü ölçüsü 100 W' tır. Bu gücün %70' nin sadece bazal metabolizmayı sürdürmek için gerekli olduğu dikkat çekicidir. Sadece %30 kısa periyotlar da bir şeyler yapmak içindir.

Tablo 3.13: İnsan vücudunun $\dot{E}$ güç ihtiyacı (Lewis, 1996).

Ė (W)	**Aktivitenin Tipi**
70	Uyumak, oturmak, durmak
200-300	Hafif işler (boya yapmak, araba sürmek)
300-500	Orta aktivite (tenis, 16 $\mathrm{km.h^{-1}}$de bisiklet sürmek)
500-700	Ağır aktivite (yüzmek, koşmak, kürek çekmek)
100	24 saatteki ortalama

Örnek3.5. SI birimlerinde bir günde insan vücudunun ihtiyaç duyduğu minimum güç;

Bu genel kural 65 kg' lık bir insan için uygulanırsa;

$$\dot{\mathrm{E}} = \frac{1\,\mathrm{kcal}}{\mathrm{h}\cdot\mathrm{kg}}\cdot 65\,\mathrm{kg} = \frac{65000\ \mathrm{cal}}{3600\ \mathrm{s}} = 18\,\mathrm{cal}\cdot\mathrm{s}^{-1} = 75\,\mathrm{J}\cdot\mathrm{s}^{-1} = 75\,\mathrm{W}$$

Bu Tablo 3.13 de bulunan ilk satırdaki değere yakındır.

Örnek 3.6. SI birimlerinde vücut ağırlığındaki her kg için her saat başına 1 kcal düşünülürse,

$$\dot{\mathrm{E}} = \frac{1\,\mathrm{kcal}}{\mathrm{h}\cdot\mathrm{kg}} = \frac{4.18\,\mathrm{kJ}}{\mathrm{h}\cdot\mathrm{kg}} = \frac{24\cdot 4.18}{\mathrm{d}\cdot\mathrm{kg}} = 100\,\mathrm{kJ}\cdot\mathrm{d}^{-1}\cdot\mathrm{kg}^{-1}$$

$$\dot{\mathrm{E}} = 100\,\mathrm{kJ}\cdot\mathrm{d}^{-1}\cdot\mathrm{kg}^{-1}$$

olur.

Sonuç olarak, insan vücudu için gerekli olan minimum gücün günde 100 kj olduğunu söyleyebiliriz.

Ancak, yetişkin aktif bir erkek için ortalama insan vücudunun gerekli güç ihtiyacı minimum gereksinimden daha fazla olacaktır. Çalışmalar göstermektedir ki, bireysel olarak kişilerin insan vücudunun güç ihtiyaçları için en yakın tahminler insanın gerçek yüzey vücut alanına dayanmaktadır (Haycock, 1978). Aynı zamanda vücut kütlesiyle de ilişkilidir;

$$\frac{\dot{E}}{A} = 58.2\,\mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-2} \tag{3.108}$$

Ortalama yetişkin bir erkeğin vücut yüzey alanı A=1.75 m^2 olarak alırsak, ortalama güç gerekliliğini hesaplayabiliriz

$$\dot{\mathrm{E}} = 58.2\,\mathrm{W}\cdot\mathrm{m}^{-2}\cdot 1.75\,\mathrm{m}^{-2} \cong 100\,\mathrm{W} \tag{3.109}$$

100 Watt' ı enerjiye çevirirsek;

$$E = \dot{E}\cdot t \tag{3.110}$$

$$\mathrm{E} = 100\,\mathrm{W}\cdot 24\cdot 3600\,\mathrm{s} = 8640\,\mathrm{kJ} \tag{3.111}$$

8640 kj, kaloriye çevirirsek, 2067 kcal değerindedir. Kalori kullanımı daha yaygındır (1 Cal=1 kcal). Bir günlük kalori alımı 2000 ± 500 Cal aralığında olmalıdır. Artı, eksi 500 Cal yaş, cinsiyet, sağlık, vücut genişliği gibi farklılıklara bağlıdır.

Gerekli güç ihtiyacının hesaplanmasındaki başka bir yaklaşım, 1 ve 1.7 arasındaki *f* faktörü ile minimum gücü çarpmaktır. 70 Watt' lık minimum gerekli gücü kalori olarak yazarsak;

$$E = f \cdot 70\ \mathrm{W} \cdot 24 \cdot 3600\ \mathrm{s} = f \cdot 6048\ \mathrm{kJ} = f \cdot 1447\ \mathrm{kcal}$$

elde edilir.

Tablo 3.14' te ortalama güç gereksinimi için birkaç f faktörü gösterilmiştir;

Tablo 3.14: Ortalama güç için *f* faktörleri.

Faaliyet	***f***	***E*(kcal)**
Hiçbir şey yapılmadığında	1.0	1560
Ofis işi	1.4	2184
Spor yaparken	1.7	2460

3.8.2 Gıdaların Kalori Değeri

Besinler başlıca su, protein, karbonhidrat ve yağdan oluşmaktadırlar. Herhangi bir gıda ürününün enerji değerini hesaplamamız mümkündür. Bu bileşenlerin, solunumla elde edilen oksijen tarafından desteklenen oksidasyon reaksiyonları ile insan vücudunda enerjiye dönüşürler. Oksidasyon reaksiyonları besinlerimizden gelen karbonu karbondioksit gazına çevirir. Bu özgül enerji, makro besinlerin her birinden insan vücudu için elde edilir ve buna fizyolojik kalori değeri denir. Aynı zamanda, ATWATER faktörü olarak da bilinir ve fizyolojik kalori değerleri Tablo 3.14' te listelenmektedir(Atwater ve Benedict, 1902, Atwater ve Woods, 1898);

Tablo 3.15: Atwater faktörleri: Fizyolojik kalori değerleri (Nielsen, 2003).

İçerdiği Bileşenler	**Fizyolojik Kalori Değerleri**	
	($e_i / kJ \cdot g^{-1}$)	**($e_i / kcal \cdot g^{-1}$)**
Proteinler	17	4
Karbonhidratlar	17	4
Yağlar	37	9
Alkol	29	7

Faktör e' nin yardımıyla herhangi bir gıda ürününün enerji değerini hesaplayabiliriz, hem de yağ, protein ve karbonhidrat cinsinden brüt kompozisyonunu bulabiliriz. Bu gıda ürünlerinin ilgili Atwarter faktörü ile kütlesinin çarpımının toplamı ile yapılır ve aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$E = \sum m_i \cdot e_i \tag{3.112}$$

Burada E fizyolojik yanma enerjisi (J), e_i i. maddenin yanma değeri ($J \cdot g^{-1}$), m_i i. maddenin kütlesi (g) olarak ifade edilir.

Örnek 3.7 Patatesin Kalori Değeri

Literatüre göre (Griugull, 1979) 100 gr patatesin bileşenleri aşağıdaki gibidir.

Kütle (g)	**Bileşenler**
79.8	Su
2.1	Protein
0.1	Yağ
17.7	Karbonhidrat

Buradan da verilen değerler alınarak, patatesin enerjisi hesaplanırsa;

$$E = 2.1\ g.17\ kJ.g^{-1} + 0.1\ g.37\ kJ.g^{-1} + 17.7\ g.17\ kJ.g^{-1}$$

$$E = 340.3\ kJ = 81.4\ kcal$$

olarak bulunur.

3.8.3 Kalori Değerlerin Hesaplanması

Bir gıda numunesinin kalori değeri laboratuarda yanma kalorimetresi kullanılarak ölçülebilir. Numune, yanma kalorimetresine konur ve tamamen oksitlenir. Oksidasyon reaksiyonlarından ısı elde edilir ve bu ısı sıcaklığın yükselmesine neden olur. Bu sıcaklıkta ölçülerek, kayıt edilir. Buradan da kalori değeri hesaplanabilir.

Bir yanma kalorimetresinde tüm proteinler, karbonhidratlar ve yağlar tamamen NO_2, CO_2 ve H_2O içinde oksitlenir. Kalorimetreden alınan enerji değeri, insan vücudu tarafından alınan enerji değeri ile aynı değildir, bazı ayarlamalar gerektirir.

İnsan vücudundaki proteinlerden gelen azotun çoğu şu şekilde yakılır; %80-90 üre (H_2N-CO-NH_2), %3-5 ürik asit ve <%1 kreatinin.

Görüyoruz ki, vücudumuzdaki azot oksidasyonu düşüktür ve fizyolojik yanma değeri bu nedenle kalorimetredekinden daha düşüktür.

Tablo 3.16**:** Fizyolojik ve fiziksel yanmanın karşılaştırılması.

İçerik(bileşen)	**Fiziksel Yanma Değeri** $(kJ \cdot g^{-1})$	**Fizyolojik Yanma Değeri** $(kJ \cdot g^{-1})$
Yağ	38.9	37
Karbonhidrat	17.2	17
Protein	23.4	17
Alkol	30	29

Besinlerin kalori değerlerini tahmin etmek için diğer yöntemler toplam vücut kalorimetresine bağlıdır ya da kişilerin aldıkları oksijen miktarından hesaplanabilmektedir.

İnsanların beslenmesinde, besin enerjisi çok fazla etmene bağlıdır. Örneğin, beslenme danışmanları ve diyetisyenler, bir kişi için açıkladıkları diyet programını o kişinin yaşam tarzı ve sağlığına bakarak yapmaktadır.

BÖLÜM 4

SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Gıdalarda mikrobiyal faaliyetler, gıda bozulmaları veya gıda zehirlenmelerine neden olabilmektedir. Gıdaların pH, su aktivitesi, toplam asitliği, koruyucuların varlığı doğal mikro flora, besin içeriği, indirgenme potansiyeli, çevrenin kimyasal ve fiziksel özellikleri, gaz bileşimi, depolama sıcaklığı ve bağıl nemi mikroorganizmaların faaliyetlerini etkileyen önemli unsurlardır.

Gıda maddelerinin pek çok uygulama alanı, fiziksel ve termal özelliklerine bağlıdır.

Yoğunluk ve ergime sıcaklığı önemli fiziksel özelliklerdendir.

Farklı malzemeler, farklı fiziksel ve termal özellikler gösterirler. Yoğunluk, viskozite, ergime sıcaklığı, ısı sığası, termal iletkenlik ve termal genleşme gibi fiziksel özellikleri malzemeye bağlı olarak değişmektedir.

Pek çok maddede olduğu gibi, gıda maddeleri de kullanım esnasında sıcaklığa maruz kalırlar. Bu nedenle gıda maddelerinin üretiminden tüketimine kadar geçen tüm süreçlerde termal özelliklerinin iyi bilinmesi gerekir.

Tablo 4.1a,b,c de katı-sıvı ve gaz maddelerin fiziksel ve termal özelliklerinden bazıları (Gürses,1986) kaynağından alınarak verilmiştir.

Tablo 4.1.a: Katı materyallerin bazı temel fiziksel ve termal özellikleri.

Katılar	**Termal iletkenlik ($J/m \cdot s \cdot {}^0C$)**	**Özgül ısı ($kJ/kg \cdot {}^0C$)**	**Yoğunluk (kg/m^3)**	**Sıcaklık (°C)**
1.Metaller				
Alüminyum	220	0.87	2640	0
Pirinç	97	0.38	8650	0
Dökme demir	55	0.42	7210	0
Bakır	388	0.38	8900	0
Yumuşak çelik	45	0.47	7840	18
Paslanmaz çelik	21	0.48	7950	20
2.Metal olmayanlar				
Asbest levha	0.17	0.84	890	51
Tuğla	0.7	0.92	1760	20
Mukavva	0.07	1.26	640	20
Beton	0.87	1.05	2000	20
Selüloit	0.21	1.55	1400	30
Ham pamuk	0.04	1.26	80	30
Mantar	0.043	1.55	160	30
Kauçuk	0.04	-	72	0
Kontrplak	0.052	-	240	21
Cam, sodalı	0.52	0.84	2240	20
Buz	2.25	2.10	920	0
Polietilen	0.55	2.30	950	20
Polistiren köpük	0.036	-	24	0
Poliüretan köpük	0.026	-	32	0
Polivinil klorür	0.29	1.30	1400	20
Odun talaşı	0.09	2.5	700	30

Tablo 4.1.b: Sıvıların bazı temel fiziksel ve termal özellikleri.

Sıvılar	**Termal iletkenlik** $(J/m \cdot s \cdot {}^0C)$	**Özgül ısı** $(kJ/kg \cdot {}^0C)$	**Yoğunluk** (kg/m^3)	**Sıcaklık** **(°C)**
Su	0.57	4.21	1000	0
Sakaroz:%20 çöz.	0.54	3.8	1070	20
Sakaroz:%60 çöz.	-	-	-	20
NaCl:%22 çöz.	0.54	3.4	1240	2
Asetik Asit	0.17	2.2	1050	20
Etil Alkol	0.18	2.3	790	20
Gliserin	0.28	2.4	1250	20
Zeytinyağı	0.17	2.0	910	20
Kolza yağı	-	-	900	20
Soya yağı	-	-	910	30
Parafin	-	-	900	65
Süt	0.86	3.9	1030	20
Yağsız süt	-	-	1040	25
Krema: %20 yağlı	-	-	1010	3
%30 yağlı	-	-	1000	3

Tablo 4.1.c: Gazların bazı temel fiziksel ve termal özellikleri (Atmosfer Basıncında).

Gazlar	**Termal iletkenlik** $(J/m \cdot s \cdot {}^0C)$	**Özgül ısı** $(kJ/kg \cdot {}^0C)$	**Yoğunluk** (kg/m^3)	**Sıcaklık** (°C)
Hava	0.024	1.005	1.29	0
	0.031	1.005	0.94	100
Karbon dioksit	0.015	0.80	1.98	0
	0.022	0.92	0	-
Refrigerant 12	0.0083	0.92	0	-
(diklorodiflorometon)	0.014	-	-	100
Azot	0.024	1.05	1.3	0
	0.031	-	-	100

Gıda maddelerini kalite kayıplarının önlenmesinde ve muhafazasında, su ve su ile ilgili parametrelerin önemli etkisi bulunmaktadır. Bu parametreler, gıda maddelerinin işleme ve muhafaza süresince kalitelerinin korunmasında, su miktarı, bağıl nem dengesi, su aktivitesi, kuru madde ve ozmotik basınçtır.

Su, gerek hayvansal, gerekse bitkisel besin maddelerinde bulunmaktadır. Pek çok gıdanın temel bileşeni sudur ve gıdanın özellikleri sudan önemli ölçüde etkilenmektedir. Su gıdalarda bozulma reaksiyonlarını yönlendiren en önemli faktördür. Besinlerin su içerikleri büyük farklılıklar göstermektedir.

Bazı besin maddeleri için ortalama su içerikleri (Telefoncu,1993) kaynağından alınmış ve Tablo 4.2’ de verilmiştir.

Tablo 4.2: Bazı besinlerin ortalama su içerikleri.

Besin maddesi	Su %	Besin maddesi	Su %
Domates	95	Peynir	37
Lahana	92	Reçel	28
Bira	90	Bal	20
Portakal, elma, süt	87	Margarin	16-18
Meyve-sebze	70-90	Buğday unu, pirinç	12
Patates	78	Kuru kahve	5
Tavuk eti	70	Süt tozu	4
Sığır eti	65	Yemeklik yağ (sıvı)	0

Suyun gıdadan uzaklaştırılması, tuz veya şeker ilavesiyle suyun bağlanması, birçok reaksiyonun oluşumunu ve mikroorganizmaların gelişimini engellemekte ve böylece gıdanın raf ömrünü arttırmaktadır.

Su ve hava besinin kimyasal ve mikrobiyal bozunmasında oldukça etkin bir rol oynar. Bu nedenle gıda maddelerindeki suyun özellik ve davranışlarının yanı sıra havanınkinin de iyi bilinmesi gerekir.

Suyun termal özellikleri dondurma ve kurutma gibi işlemler açısından çok önemlidir. Ayrıca su ile buz arasındaki yoğunluk farkı dondurulduğunda besinin yapısında bozulmalara neden olur. Buzun yoğunluğunun sıcaklıkla değişmesi dondurulmuş besinlerin sertliğinin sürekli değişmesi nedeniyle yapının zorlanması sonucunu doğurur. Bu durum özellikle donma noktası çevresinde çok etkin olduğundan soğukta saklanması gereken besin maddeleri için depolama sıcaklığı seçiminde bu nokta mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Önceden de belirtildiği gibi su besinin kimyasal ve mikrobiyal bozunmasında etkin bir rol oynadığından besindeki su aktivitesininin çeşitli yöntemlerle (kurutma, dondurma, tuzlama, şekerleme v.b) düşürülmesi gerekir. Su aktivitesi üründeki suyun buhar basıncının aynı sıcaklıktaki saf suyun buhar basıncına oranı olarak tanımlanmaktadır.

Tablo 4.3’ de hava ve suyun fiziksel özelliklerinin bazılarına (Gürses,1986) kaynağından yararlanılarak verilmiştir.

Tablo 4.3: Hava ve suyun bazı fiziksel ve termal özellikleri.

Sıcaklık (°C)	**Termal iletkenlik ($J/m \cdot s \cdot {}^0C$)**	**Özgül ısı ($kJ/kg \cdot {}^0C$)**	**Yoğunluk (kg/m^3)**
HAVA			
-73	0.0189	0.0996	1.76
-18	0.0230	1.000	1.38
0	0.0242	1.005	1.29
38	0.0267	1.005	1.14
93	0.0301	1.009	0.96
149	0.0334	1.017	0.83
204	0.0367	1.026	0.74
SU			
0	0.57	4.23	1000
4	0.57	4.23	1000
16	0.59	4.19	1000
27	0.61	4.19	998
38	0.62	4.19	992
66	0.66	4.19	977
93	0.68	4.19	965

Suyun besin maddesinin saklanmasında bu ölçüde önemli bir faktör olması nedeniyle fiziksel özelliklerinin çok iyi bilinmesi kaçınılmaz olmaktadır.

Gıda maddelerinin termal özellikleri kimyasal ve mikrobiyal bozulmasında oldukça rol oynadığı için gıda maddelerinin termal özelliklerinin ve davranışlarının bilinmesi gerekmektedir.

Tablo 4.4 de bazı gıdalar için termal değerler (Gürses,1986) kaynağından alınmıştır.

Tablo 4.4: Bazı gıdalar için termal değerler.

Gıdalar	Donma Noktası (°C)	% Su	ÖZGÜL ISI		Erime Gizli Isısı (kJ/kg)
			Donma Noktası üzerinde (kJ/kg°C)	Donma Noktası altında (kJ/kg°C)	
1.Meyveler					
Elma	-2	84	3.60	1.88	280
Muz	-2	75	3.35	1.76	255
Greyfurt	-2	89	3.81	1.93	295
Şeftali	-2	87	3.78	1.93	295
Ananas	-2	85	3.68	1.88	285
Karpuz	-2	92	4.06	2.01	306
2.Sebzeler					
Kuşkonmaz	-1	93	3.93	2.01	310
Taze fasulye	-1	89	3.81	1.97	297
Kabak	-1	92	3.93	1.97	306
Havuç	-1	88	3.60	1.88	293
Mısır	-1	76	3.35	1.80	251
Bezelye	-1	74	3.31	1.76	247
Domates	-1	95	3.98	2.01	310
3.Etler					
Sığır eti	-2	75	3.22	1.67	255
Balık	-2	70	3.18	1.67	276
Koyun eti	-2	70	3.18	1.67	276
Domuz eti	-2	60	2.85	1.59	197
Dana eti	-2	63	2.97	1.67	209
4.Çeşitli		92	4.10	2.01	301
Bira	-2	32-37	2.93	1.42	109-121
Ekmek	-2	-	3.20	1.67	276
Yumurta	-3	55-66	3.30	1.88	222
Dondurma	(-3)-(-18)	87.5	3.90	2.05	289
Süt	-1	100	4.19	2.05	335
Su	0				

Sonuç olarak birçok gıda ürünü üretim, taşıma, depolama, hazırlama ve tüketim aşamalarında sıcaklık değişimlerine tabi tutulur. Sıcaklık değişimi gıda bileşenlerinin fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişime sebep olur. Bu değişim tüm işlemler sonucun da elde edilen ürünü etkiler (örneğin tat, koku, görünüm ve saklama ömrü). Hidroliz, oksidasyon ve arıtma gibi kimyasal değişimler ile buharlaşma, erime, kristalleşme, kümelenme, pelteleşme gibi fiziksel değişimler görülebilir. Sıcaklığın gıdalar üzerinde etkisi daha iyi anlaşıldığında elde edilen ürünün kalitesi artacak ve üretim aşamaları optimize edilebilecektir.

KAYNAKLAR

Atwater W.O., Benedict F.G., 1902, "An experimental inquiry regarding the nutritive value of alcohol" , Government Printing Office, Washington DC

Atwater W.O.,Woods C.D.,1898, "The chemical composition of American food materials", US Office of Experiment Stations, Experiment Stations Bulletin, 28

Ehrenfest P., 1933, "Phase changes classified according to singularities of the thermodynamic Potentia", l. Proc Acad Sci Amsterdam, 36,153

Figura L.O., Teixeira A.A.,2007, "Food Physics: Physical Properties – Measurement and Applications", Springer, 41-72, 257-327

Grigull U., 1979, "Properties of Water and Steam in SI-Units", Springer, Berlin

Gürses Ö.L., 1986, "Gıda İşleme Mühendisliği – II", Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları Ders Kitabı, 963, 127 – 129

Hayes G.D., 1987, "Food Engineering Data Handbook. Longman Scientifc and Technical" , Harlow

Haycock G. B**.,** Schwartz G.J. , Wisotsky D.H. , 1978, "Geometric method for measuring body surface area, A height–weight formula validated in infants, children and adults" , J. Pediatr, 93,62–66

http://europa.eu.int/ eur-lex/hu/dd/docs/1999R2718-HU.doc

Kessler H.G., 2002, "Food and Bioprocess Engineering-Dairy Tecnolology. ", Freising.

Kress-Rogers E., Brimelow C.J.B. , 2001, "Instrumentation and Sensors fort he Food Industry", CRC Press, Boca Raton

Kurzhals H.A., 2003, "Lexikon der Lebensmitteltechnik", Behr's. Hamburg

Lewis M.J., 1996, "Physical Properties of Foods and Food Processing Systems", Woodhead Publishing, Cambridge

Lide D.R., 2006, “Handbook of Chemistry and Physics 87th edn. CRC Press”, Boca Raton

Mohsenin N.N., 1986, “Physical Properties of Plant and Animal Materials”. Gordon and Breach Publishers, Amsterdam

Nesvadba P., 1982, “A new transient method for the measurement of temperature dependent thermal diffusivity”, J Phys D, Appl Phys, 15, 725-738

Nielsen S.S., 2003, “ Food Analysis”, Kluwer Academic Press, NewYork

Patazca E., Koutchma T., Balasubramaniam V. M. , 2007, “Quasi-adiabatic temperature increase during high pressure processing of seleced foods”, J. Food Engineering, 80,199-205

Rahman S., 1995, “Food Properties Handbook”, CRC Press, Boca Raton

Pham Q.T., 2006, “Modelling heat and mass transfer in frozen foods”,a review,Intern J Refrigeration, 29, 876-888

Rausher K., Engst R., Freimuth U , 1986, “Untesuchung von Lebensmitteln. VEB Fachbuchverlag”, Leipzig

Spiess W., Walz E., Nesvadba P., Morley M., van Haneghem I. A., Salmon D., 2001, “Thermal conductivity of food materials at elevated temperatures”, ECTP European Conference on Thermophysical Properties No 15, Würzburg, Germany, 05/09/1999, vol 33, 631-723

Telefoncu A., 1993, “Besin Kimyası”, Ege Üniversitesi Fen Fakültesi Yayınları, 1

Tscheushner H. D., 1996, “Grundzüge der Lebenmitteltechnik”, Behr’s, Hamburg

ÖZGEÇMİŞ

19.02.1969 tarihinde İstanbul' da doğdu. İlkokulu, İstanbul Alaadin Gövsa İlköğretim Okulu'nda, ortaokulu İstanbul Çapa Ortaokulu'nda ve lise öğrenimini İstanbul Şehremini Lisesinde tamamladı. Üniversite öğrenimine, Eylül 1986 yılında Trakya Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Fizik Bölümünde başladı. Bu bölümden Temmuz 1990 yılında mezun oldu.

1992 yılında lise öğretmenliğine atandı. Halen Süloğlu Çok Programlı Lisesi'nde Fizik öğretmenliği ve idarecilik görevini yapmaktadır.