

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

KURU DUTUN SORPSİYON
İZOTERMLERİNİN MODELLENMESİ

Resmiye Nur ŞENTÜRK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE
2009

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ

KURU DUTUN SORPSİYON
İZOTERMLERİNİN MODELLENMESİ

Resmiye Nur ŞENTÜRK
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Doç. Dr. Murat ÖZDEMİR

GEBZE
2009



**GEBZE YÜKSEK
TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

**MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
JÜRİ ONAY FORMU**

JÜRİ

ÜYE (BAŞKAN) : Doç. Dr. Alp Er KONUKMAN

ÜYE : Doç. Dr. Murat ÖZDEMİR

ÜYE : Yrd. Doç. Dr. Mahmut ŞEKER

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 15./01/2009 tarih ve 2009/02. sayılı kararı ile yukarıdaki öğretim elemanlarından oluşmuş jüri tarafından düzenlenen 29./02./2009 tarihli Tez Savunma Tutanağı neticesinde Yüksek Lisans öğrencisi Resmiye Nur Şentürk'ün çalışması GYTE Mühendislik ve Fen Bilimleri Yönetim Kurulu/...../..... tarih ve/..../..... sayılı kararıyla Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak onaylanmıştır.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : Kuru dutun sorpsiyon izotermlerinin modellenmesi

YAZAR ADI : Resmiye Nur ŞENTÜRK

Beyaz dutun (*Morus Alba*) taze, kurutulmuş veya hazır gıda formülasyonlarda bir bileşen olarak tüketilmesi dolayısıyla 10, 20 ve 30°C sıcaklıklardaki adsorpsiyon ve 10°C sıcaklıktaki desorpsiyon izotermi deneysel olarak belirlenmiş ve literatürde verilmiştir. Ancak beyaz kuru duta ait bu deneysel veriler sorpsiyon izoterm eşitlikleri ile modellenmemiştir. Bu çalışmada BET, GAB, Oswin ve Halsey modelleri kullanılarak kuru dutun sorpsiyon izotermi modellenmiştir. Modelleri kıyaslamak için kalanların karesinin ortalaması hesaplanmış (RMS) ve bu modellere ait kalanlar grafikleri çizilmiştir. BET modelinin 0-0.65 su aktivitesi aralığında en uygun model olduğu, tüm sıcaklık (10-30°C) ve su aktivitesi (0-0.92) aralıklarında ise GAB modelinin en uygun model olduğu belirlenmiştir.

SUMMARY

TITLE OF THE THESIS : Modelling of Sorption Isotherms of Mulberry

AUTHOR : Resmiye Nur ŞENTÜRK

Since White Mulberry (*Morus Alba*) is consumed as fresh, dried and as an ingredient in prepared food formulations, its adsorption isotherms at 10, 20 and 30°C and desorption isotherms at 10°C were determined experimentally and reported in literature. However, these experimental data for white mulberry were not modelled with sorption isotherm equations. In this research, sorption isotherm data for the white mulberry were modelled with BET, GAB, Oswin and Halsey equations. In order to compare the models, residuals mean square (RMS) was calculated and residuals graphs corresponding to the models were plotted. It was determined that BET model was found to be the best equation within the water activity range of 0-0.65 while GAB model was found to be the best equation within the water activity range of 0-0.92 throughout the temperature range of 10-30°C.

TEŞEKKÜR

Tez konusunu belirlemede ve bütün çalışmalarım sırasında her konuda yardımlarını esirgemeyen başta tez danışmanım Doç. Dr. Murat ÖZDEMİR'e, tez savunmamdaki jüri üyeleri Doç. Dr. Alp Er KONUKMAN ve Yrd. Doç. Dr. Mahmut ŞEKER'e, istatistik dersini aldığım Yrd. Doç. Dr. Pınar KUŞ'a, makale konusundaki katkılarından dolayı arkadaşım Yrd. Doç. Dr. Neslihan AKDENİZ'e, araştırmam boyunca hep yanımda olan kız kardeşime, kuzenime ve desteklerinden dolayı annem ve babama teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLOLAR DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Hipotez	2
1.1. Amaç	2
2. SORPSİYON İZOTERMLERİ	3
2.1. Sorpsiyon İzotermlerinin Bölümleri	3
2.2. Sorpsiyon İzotermlerinin Sınıflandırılması	4
2.3. Su Aktivitesi ve Denge Bağlı Nemi	6
2.4. Histerisis ve Histerisis Teorileri	10
2.5. Sorpsiyon İzoterm Eşitlikleri	11
2.5.1. Langmuir İzoterm Eşitliği	11
2.5.2. BET İzoterm Eşitliği	13
2.5.3. GAB İzoterm Eşitliği	15
2.5.4. Oswin İzoterm Eşitliği	17
2.5.5. Halsey İzoterm Eşitliği	17
3. GIDALARIN SORPSİYON İZOTERMLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR	19
4. MATERYAL ve METOT	21
4.1. Materyal	21
4.2. Metot	23
5. SONUÇLAR	24
5.1. BET Modeli	24
5.2. GAB Modeli	28
5.3. Oswin Modeli	32

5.4. Halsey Modeli	34
6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	36
KAYNAKLAR	37
ÖZGEÇMİŞ	41

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

A	Halsey eşitliğine ait sabit
A'	Halsey eşitliğine ait sabit
A_0	Sabit
C_I	Oswin eşitliğine ait sabit
K	Langmuir sabiti
M	Denge nem miktarı (g su/g kuru madde veya g su/100 g kuru madde)
$M_{deneysel}$	Deneysel denge nem içeriği (g su/g kuru madde veya g su/100 g kuru madde)
M_m	Tek tabaka nem değeri (g su/g kuru madde veya g su/100 g kuru madde)
$M_{tahmini}$	Eşitlikten elde edilen denge nem içeriği (g su/g kuru madde veya g su/100 g kuru madde)
N	Gözlem sayısı
P_A	A bileşeninin T sıcaklıktaki kısmi buhar basıncı
P_A^0	A bileşeninin T sıcaklıktaki buhar basıncı
P_A	Suyun T sıcaklıktaki kısmi buhar basıncı
P_W^0	Saf suyun T sıcaklıktaki buhar basıncı
Q_S	Sorpsiyon ısısı
R	İdeal gaz sabiti
T	Mutlak sıcaklık
a_A	A bileşeninin aktivitesi
a_W	Su aktivitesi
b	Adsorpsiyon katsayısı
c	BET ve GAB eşitliklerinde sorpsiyon ısısı ile ilgili sabit
f	Fugasite
f_A	A bileşeninin T sıcaklıktaki fugasitesi ya da kaçma eğilimi
f_A^0	A bileşeninin standart haldeki fugasitesi ya da kaçma eğilimi
f_W	Suyun T sıcaklıktaki fugasitesi ya da kaçma eğilimi
f_W^0	Suyun standart haldeki fugasitesi ya da kaçma eğilimi

k	GAB sorpsiyon eşitliğine ait düzeltme faktörü
k_a	Adsorpsiyon için sıcaklığa bağlı oran sabiti
$k_a P_A (1 - \theta)$	Yoğunlaşma hızı
k_d	Desorpsiyon için sıcaklığa bağlı oran sabiti
$k_d \theta$	Buharlaştırma hızı
n	Oswin eşitliğine ait sabit
p	Parametre sayısı
r	Halsey eşitliğine ait sabit
x_A	A bileşeninin mol kesri
μ_A	Sistemin kimyasal potansiyeli, maddenin molü başına düşen enerji ya da termodinamik aktivite
μ_A^0	T sıcaklıktaki saf materyalin kimyasal potansiyeli
$\mu_A^{\text{çözeltili}}$	Çözelti içindeki A bileşenin kimyasal potansiyeli
μ_A^{buhar}	Buhar fazdaki A bileşeninin kimyasal potansiyeli
$\mu_A^{\text{gıda}}$	Gıda içindeki A bileşeninin kimyasal potansiyeli
γ_{fA}	A bileşeninin fugasite katsayısı
γ_{fW}	Suyun fugasite katsayısı
θ	Langmuir izoterminde adsorplanan moleküllerle kaplanan yüzey alan kesri
$(1 - \theta)$	Boş alan kesri
ΔH_v	Suyun buharlaşma ısısı
RMS	Kalanların karesinin ortalaması

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Sorpsiyon izotermi ve bölümleri	3
2.2. Sorpsiyon izoterm tipleri	5
2.3. Histerisis gösteren gıda maddelerinin sorpsiyon izotermi	10
2.4. Langmuir izotermi	11
5.1. 10 ⁰ C sıcaklıkta BET adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	25
5.2. 20 ⁰ C sıcaklıkta BET adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	25
5.3. 30 ⁰ C sıcaklıkta BET adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	25
5.4. 10 ⁰ C sıcaklıkta BET desorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	25
5.5. Kuru dutun 10, 20 ve 30 ⁰ C sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi	26
5.6. 10 ⁰ C sıcaklıkta BET adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	27
5.7. 20 ⁰ C sıcaklıkta BET adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	27
5.8. 30 ⁰ C sıcaklıkta BET adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	28
5.9. 10 ⁰ C sıcaklıkta BET desorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	28
5.10. 10 ⁰ C sıcaklıkta GAB adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	29
5.11. 20 ⁰ C sıcaklıkta GAB adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	29
5.12. 30 ⁰ C sıcaklıkta GAB adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	30
5.13. 10 ⁰ C sıcaklıkta GAB desorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	30
5.14. 10 ⁰ C sıcaklıkta Oswin adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	33
5.15. 20 ⁰ C sıcaklıkta Oswin adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	33
5.16. 30 ⁰ C sıcaklıkta Oswin adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	33
5.17. 10 ⁰ C sıcaklıkta Oswin desorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	33
5.18. 10 ⁰ C sıcaklıkta Halsey adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	35
5.19. 20 ⁰ C sıcaklıkta Halsey adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	35

5.20.	30 ⁰ C sıcaklıkta Halsey adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	35
5.21.	10 ⁰ C sıcaklıkta Halsey desorpsiyon izotermi kalanlar grafiği	35

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
4.1. Kuru dutun 10°C sıcaklıktaki adsorpsiyon ve desorpsiyon izoterm verileri	21
4.2. Kuru dutun 20°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izoterm verileri	22
4.3. Kuru dutun 30°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izoterm verileri	22
5.1. 0-0.92 a_w arasındaki deneysel veriler kullanılarak hesaplanan M_m ve c parametreleri ile RMS değerleri	24
5.2. 0-0.65 a_w arasındaki deneysel veriler kullanılarak hesaplanan M_m ve c parametreleri ile RMS değerleri	27
5.3. 0-0.92 a_w arasındaki tüm deneysel veriler kullanılarak hesaplanan M_m , c ve k parametreleri ile RMS değerleri	29
5.4. 0-0.92 a_w arasındaki tüm deneysel veriler kullanılarak hesaplanan C_I ve n parametreleri ile RMS değerleri	32
5.5. 0-0.92 a_w arasındaki tüm deneysel veriler kullanılarak hesaplanan A' ve r parametreleri ile RMS değerleri	34

1. GİRİŞ

Hasat sırasında yüksek nem içeriğine sahip olan taze dutun kısa hasat dönemi ve depolamaya hassasiyeti nedeniyle bazı formlarda muhafaza edilmesi gerekir. Dut, hazır gıda ve bazı gıda formülasyonlarının içinde bir bileşen olarak tüketildiği gibi kurutulularak da tüketilir. Dut, besin değeri yüksek bir gıda maddesidir. Özellikle içerdiği yüksek lif oranıyla kan şekerini düzene sokarken aynı zamanda zararlı maddelerin bağırsakta kalma süresini kısalttığı için kanserden korunmaya da yardımcı olur. Ayrıca yüksek miktardaki potasyum içeriğiyle başta kalp kasları olmak üzere tüm kasların ve sinirlerin iyi çalışmasını sağlar. Kalsiyumca da zengin olan dut, kemikleri ve dişleri güçlendirir.

Gıdalarda sorpsiyon izoterm eşitlikleri, denge nem içeriği ve su aktivitesi arasındaki matematiksel ilişkiyi vermektedir. Sorpsiyon izoterm denklemleriyle sorpsiyon ısısı ve tek sıra su seviyesi parametreleri elde edilir. Tek sıra su içeriği ve sorpsiyon ısısı kurutulmuş gıdaların fiziksel, kimyasal ve mikrobiyolojik kararlılığı açısından bir indikatör olarak kullanılmaktadır. Gıda sanayinde sorpsiyon izoterm denklemleri önemli bir yere sahiptir. Sorpsiyon izoterm denklemleri, genel depolama tahminlerinde, kuru bileşenlerin karıştırılmasında, orta nemli gıdalar için nem çekici seçiminde, paketlemede raf ömrünün tahmini ve kurutma süresinin tahmininde kullanılmaktadır. Türkiye’de bol miktarda üretilen ve ülkemize özgü birçok gıdanın sorpsiyon izotermi deneysel olarak belirlenmiş ve bazıları da modellenmiştir. Örneğin, Göğüş et al. (1998) tarafından Türk lokumunun, Ertugay et al. (2000) ile Ibanoğlu et al. (1998) tarafından tarhananın, Kaya and Kahyaoglu (2007) tarafından safranin sorpsiyon izotermi modellenmiştir. Sağlık üzerine faydaları bakımından yeni farkına varılan bir gıda olan kuru dutla ilgili olarak sadece Maskan and Göğüş (1998) tarafından kuru dutun deneysel sorpsiyon izotermi çıkarılmış ancak herhangi bir modelleme çalışması yapılmamıştır.

Bu çalışmada kuru dutun farklı sıcaklıklardaki deneysel sorpsiyon izotermi belli matematiksel fonksiyonlarla modellenecek ve en uygun matematiksel model belirlenerek kuru dut için denge nem verileri belirlenecektir. Böylece, ülkemiz için ekonomik değeri olan kuru dutun kurutulması ve muhafazası için gerekli optimum muhafaza şartları belirlenerek ürün kayıpları önlenecektir.

1.1. Hipotez

Kuru dutun 10, 20 ve 30⁰C sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi ile 10⁰C sıcaklıktaki desorpsiyon izoterminin denge nem içeriği belirli matematiksel modellerle tahmin edilebilir.

1.2. Amaç

Bu tez çalışmasının amacı, kuru dutun farklı sıcaklıklarda deneysel olarak belirlenmiş sorpsiyon izotermi'nin BET GAB, Oswin, ve Halsey eşitlikleriyle modellenerek lineer olmayan regresyon analiziyle deneysel verilerle matematiksel modeller arasında nasıl bir uygunluğun olduğunu istatistiksel olarak belirlemektir.

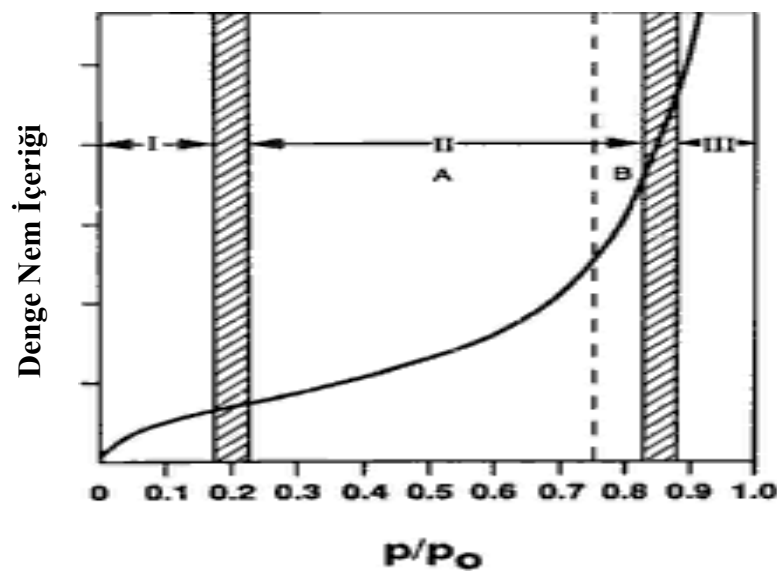
2. SORPSİYON İZOTERMLERİ

Bir gıda maddesiyle onu çevreleyen hava arasındaki su buharı hareketi hem gıdanın nem içeriği ve kompozisyonuna hem de havanın bağıl nemine ve sıcaklığına bağlıdır. Sabit bir sıcaklıkta gıdanın nem içeriği, onu çevreleyen havanın içindeki su buharıyla denge haline gelene kadar değişir. Gıda bu koşullar altında, ne ağırlık kazanır ne de kaybeder. Buna gıdanın denge nem içeriği denir. Gıdayı çevreleyen havanın bağıl nemi gıdanın denge bağıl nemi olarak bilinir (Hamm, 1992).

Denge bağıl nemine karşı denge nem miktarının grafiksel gösterimi sorpsiyon izotermini verir. Eğer ürünün su buharı basıncı havanın kısmi buhar basıncından büyükse gıda nem kaybederek dengeye ulaşır, buhar basınçlarının tersi olması durumunda ise gıda nem kazanarak dengeye ulaşır. Bunlardan birincisi desorpsiyon işlemi ikincisi ise adsorpsiyon işlemi olarak adlandırılır (Heldman, 2003).

2.1. Sorpsiyon İzotermelerinin Bölümleri

Hipotetik bir gıda sistemi için genelleştirilmiş nem sorpsiyon izotermi üç ana bölgeye ayrılır (Şekil 2.1). Birinci bölümden (nem miktarı düşük) üçüncü bölüme (nemce zengin) doğru, suyun özellikleri de önemli ölçüde farklılık gösterir.



Şekil 2.1. Sorpsiyon izotermi ve bölümleri

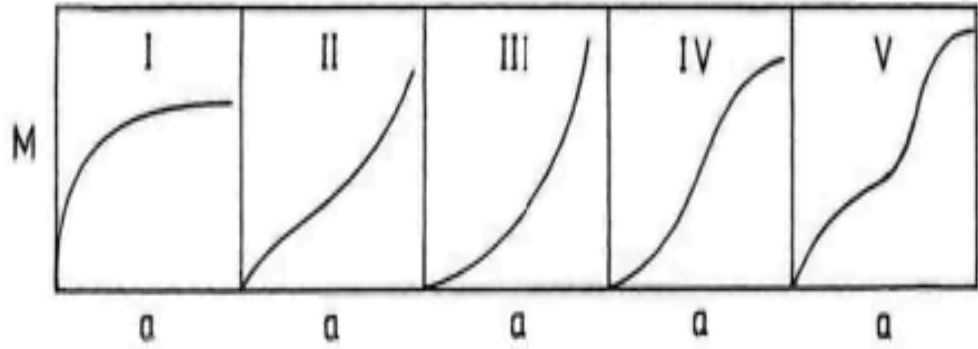
İzotermin ilk bölümü, buharlaşma entalpisi saf suyunkinden oldukça büyük olan kuvvetle bağlı suyu gösterir. Proteinler ve polisakkaritler gibi yüksek hidrofilik biyopolimerler üzerine suyun sorpsiyonu tipik bir durumdur. Teorikte nem içeriği su moleküllerinin ilk tabakasının adsorpsiyonunu gösterir. Genellikle bu bölgedeki su molekülleri dondurulamaz ve kimyasal reaksiyonlar için veya plastikleştirici olarak kullanılamaz. Birinci bölgenin sonunda ulaşılan nem değeri tek tabaka değeridir. Çoğu kurutulmuş gıda ürünleri deneysel olarak incelendiğinde en büyük kararlılığı tek sıra nem içeriğinde göstermiştir.

İzotermin ikinci bölümündeki su molekülleri, gevşek olarak bağlıdır. Başlangıçta tek sıra tabakanın üzeri çoklu tabakalar gibidir. Bu bölgede, su kapiler kondensasyon tarafından katı matriksin içinde tutulur. Bu su, düşük molekül ağırlıklı çözünen maddelerin çözücüsü olarak ve bazı biyokimyasal reaksiyonlar için kullanılır. Normal donma noktasında donmayan, materyal içinde bulunan suyun çoğu bu bölgededir.

İzotermin üçüncü bölümünde, aşırı su makro kapilerler içinde ya da yüksek nemli materyallerde akışkan faz olarak bulunur. Bu su hemen hemen suyun tüm özelliklerini gösterir ve çözücü olarak davranabilir. Bu bölgede mikrobiyal gelişim gıdayı bozan en önemli etkidir (Al-Muhtaseb et al., 2002).

2.2. Sorpsiyon İzotermlerinin Sınıflandırılması

Brunauer et al. (1940) adsorpsiyon izotermelerini 5 temel tipe sınıflandırmıştır (Şekil 2.2.). Tip I Langmuir ve Tip II sigmoid adsorpsiyon izotermi olup, diğer üç tipe özel bir isim verilmemiştir. Tip II ve Tip III adsorpsiyon izotermi, gazın buhar basıncından daha düşük basınçta maksimum adsorpsiyonun oluşması dışında Tip IV ve V adsorpsiyon izotermi ile de yakından ilgilidir. Ancak, eğer iç yüzeye sahip olduğu için katı gözenekliyse; o zaman gözeneklerin duvarları üzerindeki adsorblanmış tabakanın kalınlığı gözeneklerin kalınlığı tarafından önemli derecede kısıtlanır (Al-Muhtaseb et al., 2002).



Şekil 2.2. Sorpsiyon izoterm tipleri (Brunauer et al., 1940)

Birçok gıdanın nem sorpsiyon izotermi lineer değildir, genelde sigmoidal şekildedir ve Tip II izotermi olarak sınıflandırılmıştır. Caurie (2007) taze gıdaların içindeki suyun birçoğunun saf suya yakın buhar basıncı çıkardığını ileri sürmüştür. Bu buhar basıncı seviyesi gıdanın nem içeriği yaklaşık %22 değerine düşene kadar korunur. Nem düzeyi daha da düştüğünde artık gıdanın buhar basıncı sabit kalmaz, böylece çözelti içindeymiş gibi, düşük buhar basıncı göstermeye başlar. Kurutulmuş gıdaların içindeki suyun bu son kısmının (%22) atmosferik nemle değişimleri su sorpsiyon izotermi karakteristiktir. Rowland (1980) sabit nemde artan nem içeriğinin doğrudan plastikleştirici etkisinin sabit nemde artan sıcaklığın etkisine denk olduğunu, camsı ve kısmen kristal polimerlerin amorf bölgelerindeki zincirlerin segmental hareketliliğinin artmasına sebep olduğunu öne sürmüştür (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Bununla birlikte, şeker gibi çözünebilir bileşence zengin gıdaların Tip III davranışını gösterdiği bulunmuştur. Bu da şekerin su içerisindeki çözünürlüğüne bağlıdır. Chinachoti and Rizvi (2006) nişasta jeline ilave edilen sukrozun 0.85'in üzerindeki su aktivitelerinde suyun sorpsiyonunu keskin bir şekilde arttırdığını bulmuştur (Al-Muhtaseb et al., 2002).

Birçok gıda ürününün sorpsiyon izoterm karakteristikleri deneysel olarak belirlenmiş ve Brunauer et al. (1940) sınıflandırmasına göre karakterize edilmiştir (Al-Muhtaseb et al., 2002). Sorpsiyon izotermi tanımlamak için birçok teorik ve ampirik modeller kullanılmaktadır. Van den Berg (1984) gıdaların sorpsiyon izotermi tahmin edilmesinde kullanılan en önemli matematiksel modelleri teorik, kısmen teorik ve tamamen teorik olarak üç gruba ayırmıştır. Teorik modeller

arasında en fazla kullanılan ürünün yüzeyi ve tek sıra molekül tabaka kadar buhardan yoğunlaşan su arasındaki kuvvetlere dayanan Langmuir izoterm modelidir. Langmuir'in çoklu moleküler tabakaları destekleyen düşüncesinin geliştirilmesi, sigmoidal izotermi tanımlayan gıda ve biyolojik kaynaklı diğer materyallerde olduğu gibi yaygın bir şekilde incelenen BET ve GAB izotermiyle sonuçlanmıştır. GAB izotermi 0.9 su aktivitelerine kadar başarıyla kullanılmaktadır (Al-Muhtaseb et al., 2002).

2.3. Su Aktivitesi ve Denge Bağlı Nemi

Gıdaların su sorpsiyon izotermi, sabit sıcaklık ve basınçta gıdaların nem içerikleri ile su aktiviteleri arasındaki denge ilişkisini gösterir (Iglesias and Chirife, 1982). Fizikokimyasal denge her bileşenin kimyasal potansiyeli ile karakterize edilmektedir. Kimyasal potansiyel bir maddenin kimyasal reaksiyona girip girmeyeceğine veya sistemin bir kısmından bir kısmına difüze olup olmayacağını belirler.

Bir çözelti içindeki kohesif kuvvetler uniform ise çözelti ideal bir çözelti olarak tanımlanabilir. Bu da, A ve B olmak üzere iki bileşenin varlığında A-B, A-A ve B-B arasındaki kuvvetlerin hepsinin aynı olması demektir. İdeal bir çözeltide termodinamik durum kimyasal potansiyelle aşağıdaki eşitlikle gösterilir:

$$\mu_A = \mu_A^0 + RT \ln \left(\frac{P_A}{P_A^0} \right) \quad (2.1)$$

μ_A = sistemin kimyasal potansiyeli, maddenin molü başına düşen enerji ya da termodinamik aktivite,

μ_A^0 = T sıcaklığındaki saf materyalin kimyasal potansiyeli,

R = ideal gaz sabiti,

T = mutlak sıcaklık,

P_A = A bileşenin T sıcaklıktaki kısmi buhar basıncı,

P_A^0 = A bileşenin T sıcaklıktaki buhar basıncı

Çözeltiden buhar faza kaçma eğiliminin bir ölçüsü olan, bir bileşenin kısmi buhar basıncı, çözelti için önemli bir özelliktir. Buharıyla dengede bir çözelti için aşağıdaki eşitlik geçerlidir:

$$\mu_A^{\text{çözelti}} = \mu_A^{\text{buhar}} = \mu_A^0 + RT \ln \left(\frac{P_A}{P_A^0} \right) \quad (2.2)$$

Dolayısıyla, A bileşeninin kimyasal potansiyeli, çözelti üzerindeki A'nın kısmi buhar basıncına bağlıdır. Yukarıdaki eşitlik, sadece buhar bir ideal gaz olarak davrandığında doğrudur.

Bir çözeltideki her bileşenin kaçma eğilimi bileşenlerin mol kesriyle orantılıysa çözelti ideal bir çözeltidir. A bileşeninin kısmi buhar basıncıyla ölçülebilen ideal bir çözeltiden kaçma eğilimi, saf A sıvısının buhar basıncıyla ve çözelti içindeki A bileşeninin mol kesriyle orantılıdır. Bu Raoult yasasıyla açıklanabilir:

$$P_A = P_A^0 x_A \quad (2.3)$$

x_A = A bileşeninin mol kesri

(2.3) eşitliği (2.2) eşitliğinde yerine konulduğunda aşağıdaki eşitlik elde edilebilir:

$$\mu_A = \mu_A^0 + RT \ln P_A^0 + RT \ln x_A \quad (2.4)$$

Ancak, yukarıdaki denklemler $P \rightarrow 0$ olmadıkça gerçek gazlar için geçerli değildir. Lewis (1901), bu eşitliği gerçek sistemlere uygulamak için fugasite(f) olarak adlandırılan yeni bir fonksiyon önermiştir. Fugasite çözeltideki bir bileşenin kaçma eğilimi olarak tanımlanır. Doğrulanmış kısmi basınç olarak düşünülebilir.

Boyutsuz bir parametre olan fugasite katsayısı (γ_{fA}), fugasite ve basınç arasındaki ilişkinin hesaplanması için tanımlanmıştır:

$$f_A = \gamma_{fA} P_A \quad (2.5)$$

$\gamma_{fA} = 1$ için (2.1) eşitliği aşağıdaki eşitliğe dönüşür:

$$\mu_A = \mu_A^0 + RT \ln \left(\frac{f_A}{f_A^0} \right) \quad (2.6)$$

f_A = A bileşeninin T sıcaklıktaki fugasitesi ya da kaçma eğilimi (birimsiz),

f_A^0 = A bileşeninin standart haldeki fugasitesi ya da kaçma eğilimi (birimsiz)

A bileşeninin aktivitesi (a_A), A bileşeninin fugasitesinin (f_A), standart haldeki fugasiteye (f_A^0) oranı olarak tanımlanır:

$$a_A = \frac{f_A}{f_A^0} \quad (2.7)$$

O zaman kimyasal potansiyel aktivite cinsinden aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$\mu_A = \mu_A^0 + RT \ln a_A \quad (2.8)$$

Dilüsyon arttıkça çözelti içindeki çözücü, Raoult yasası tarafından belirlenen ideal davranışa yaklaşır. Bu durum için A bileşeninin standart hali 1 atm basınçtaki saf sıvının hali olarak alınabilir ve T sıcaklığında aktivite aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$a_A = \frac{P_A}{P_A^0} \approx \frac{f_A}{f_A^0} \quad (2.9)$$

P_A^0 değeri 1 atm basınçta saf A bileşeninin buhar basıncıdır. Böylece Raoult yasası aşağıdaki eşitliğe dönüşür:

$$a_A = \frac{P_A}{P_A^0} = x_A \quad (2.10)$$

İdeal bir çözelti için x_A değeri 1'e yaklaştıkça a_A değeri de 1'e yaklaşır.

Kapalı bir kapta, tüm bileşenlerin hem adsorbe edilmiş faz hem de buhar fazı içinde birbiriyle denge durumunda olduğu bir gıda sistemi içindeki nem ve tepe boşluğundaki buharın kimyasal potansiyelleri birbirine eşittir:

$$\mu_A^{gıda} = \mu_A^{buhar} \quad (2.11)$$

Gıdalar içindeki su aktivitesi aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$a_w = \frac{f_w}{f_w^0} \quad (2.12)$$

Eğer su aktivitesi, basınç terimiyle ifade edilirse, aşağıdaki eşitlik ortaya çıkar:

$$a_w = \gamma_w \frac{P_w}{P_w^0} \quad (2.13)$$

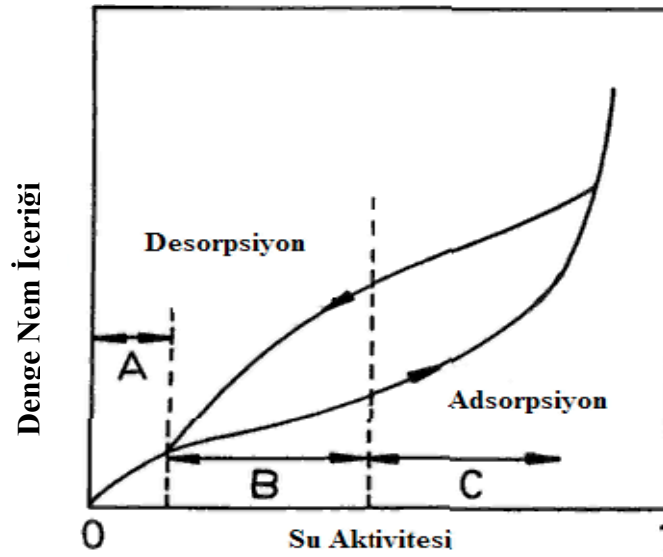
Sonuç olarak, idealden ihmal edilebilir bir sapma anlamına gelen fugasite katsayısı, yaklaşık olarak 1 kabul edilebilir. Böylece gıdalardaki su aktivitesi aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$a_w = \frac{P_w}{P_w^0} \quad (2.14)$$

Sonuç olarak, su aktivitesi, aynı sıcaklıkta sistem içindeki suyun buhar basıncının saf suyun buhar basıncına oranı olarak tanımlanır. Su aktivitesi aynı sıcaklıkta gıdayı çevreleyen havanın denge bağıl nemi olarak da tanımlanır.

2.4. Histerisis ve Histerisis Teorileri

Adsorpsiyon ve desorpsiyon eğrilerinin arasındaki denge nem miktarı farkına histerisis denir (Şekil 2.3). Sorpsiyondaki histerisis gıdalarda teorik ve pratik çıkarımlara sahiptir. Teorik çıkarımlar sorpsiyon işleminin tersinmez olduğunun ve denge termodinamik fonksiyonlara dayanılarak türetilmiş denklemlerin geçerliliğinin delilidir. Pratik çıkarımlar ise histerisisin kimyasal ve mikrobiyolojik bozunmalar üzerine etkileriyle, düşük ve orta nemli gıdalardaki önemleriyle ilgilidir (Rahman, 1999).



Şekil 2.3. Histerisis gösteren gıda maddelerinin sorpsiyon izotermi (Fortes and Okos, 1980)

Histerisisi açıklamak için birkaç teori bulunmakta olup, bunlardan en önemlileri kapiler kondensasyon ve mürekkep şişesi teorileridir. Kapiler kondensasyon esas olarak gözenekli katı yapılarıdaki histerisisi açıklar. Safsızlıkların varlığı nedeniyle (çözülmüş gaz) nem sorpsiyon izotermine adsorpsiyon bölümü boyunca kapiler kondensasyon daha yüksek bağıl buhar basıncında olacaktır. Mürekkep şişesi teorisinde ise kapillerlerin geniş gözenekli dar boğazlardan oluştuğu bir bakıma bir mürekkep şişesi gibi olduğu varsayılmıştır. Adsorpsiyonda kapiler, gözenegin daha geniş yarıçapına denk gelen su aktivitesine ulaşana kadar tamamen dolmaz. Desorpsiyon boyunca, gözenek boğazının daha küçük yarıçapı kapillerin

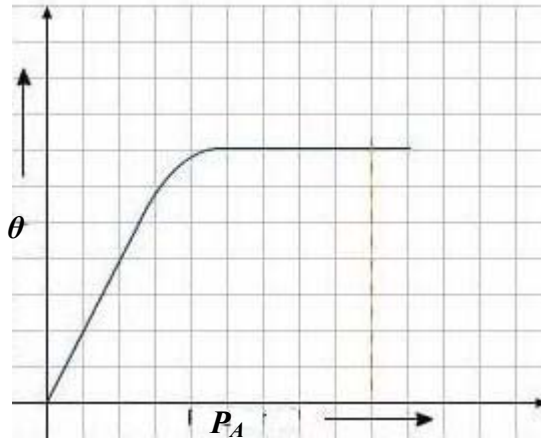
boşalmasını kontrol eder, bu yüzden aktivite epeyce azaltılır. Bu teori selüloz model sistemi için doğrulanmıştır (Labuza and Rutman, 1968).

2.5. Sorpsiyon İzoterm Eşitlikleri

İzoterm eğrisi, denge durumunda gıdanın nem miktarı ile ortamın bağıl nemi veya su aktivitesi arasındaki matematiksel ilişkiyi ifade etmektedir. Bu ilişkiyi belirleyen pek çok kuramsal ve ampirik eşitlik bulunmaktadır. İzoterm eşitlikleri konusundaki ilk yaklaşım Langmuir eşitliğidir. Gıdaların sorpsiyon izotermelerinin modellenmesinde en yaygın olarak kullanılan modeller ise BET, GAB, Oswin ve Halsey izoterm eşitlikleridir.

2.5.1. Langmuir İzoterm Eşitliği

Kinetik en eski yaklaşım olup, 1916 yılında Irving Langmuir tarafından ortaya konmuştur. Katının yüzeyine tek tabaka buharın adsorpsiyonu esas alınarak elde edilen izoterm Şekil 2.4 'de görülmektedir.



Şekil 2.4. Langmuir izotermi, θ = adsorbe olmuş uçların sayısı/mevcut adsorpsiyon uçları (adsorplanan moleküllerce kaplanan yüzey alan kesri), P_A = Gazın kısmi buhar basıncı (Atkins, 1994).

Langmuir eşitliğin türetilmesinde yapılan varsayımlar şunlardır:

Katı yüzeyinde belli sayıda aktif uç bulunmaktadır. Belli sıcaklık ve gaz basıncında ve denge halinde, θ kesri kadar olan uçlarda adsorpsiyon varken $(1 - \theta)$ kesirlik uç boştur. Langmuir izoterminin türetilmesinde aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır:

- Her aktif uca sadece bir molekül adsorplanır.
- Adsorpsiyon ısısı tüm uçlarda aynı olup, θ 'ya bağlı değildir.
- Adsorplanan moleküller arasında etkileşim yoktur. Boş bir uçta molekülün yoğunlaşma veya bu uçtan buharlaşma şansı komşu uçların boş veya dolu olmasına bağlı değildir.

İzotermin türetilmesinde gaz moleküllerinin yüzeyde yoğunlaşma ve buharlaşması esas alınmıştır. Herhangi bir anda adsorplanan moleküllerce kaplanan yüzey alan kesri θ ise, yüzeyden moleküllerin buharlaşma hızı θ ile orantılıdır. Denge halinde yoğunlaşma ve buharlaşma hızları birbirine eşittir.

$$k_d \theta = k_a P_A (1 - \theta) \quad (2.15)$$

$k_d \theta$ = Buharlaşma hızı,

k_d = Desorpsiyon için sıcaklığa bağlı oran sabiti,

$k_a P_A (1 - \theta)$ = Yoğunlaşma hızı,

k_a = Adsorpsiyon için sıcaklığa bağlı oran sabiti

Moleküllerin yüzeyde yoğunlaşma hızı, boş alan kesir $(1 - \theta)$ ve moleküllerin yüzeye çarpma hızı ile orantılıdır. Moleküllerin yüzeye çarpma hızı ise gazın kısmi basıncıyla (P_A) değişir. Eşitlik θ için çözüldüğünde,

$$\theta = \frac{k_a P_A}{k_d + k_a P_A} = \frac{b P_A}{1 + b P_A} \quad (2.16)$$

$$b = \frac{k_a}{k_d}$$

b = Adsorpsiyon katsayısı olup, izoterm aşağıdaki eşitlikle de gösterilebilir.

$$\frac{M}{M_m} = \frac{b a_w}{K + b a_w} \quad (2.17)$$

M = Denge nem miktarı (g su/g kuru madde veya g su/100 g kuru madde),

M_m = Tek tabaka nem değeri (g su/g kuru madde veya g su/100 g kuru madde),

K = Langmuir sabiti

Ancak yapılan varsayımlar nedeniyle Langmuir eşitliğinin pek çok gıdanın izotermi için uygun bir model olmadığı belirlenmiştir (Saldamlı, 1998). Gelişmiş cihazlar kullanılarak kristaller ve katalistler üzerinde gerçekleştirilen kimyasal sorpsiyon çalışmalarını takiben Langmuir izoterminin çıkarılmasındaki varsayımların oldukça yanlış olduğu bulunmuştur. Langmuir modeli adsorbant tabakasının düzenlenmesini ve onun yüzey üzerine konularak yeniden düzenlenmesini göz önünde bulundurmaz. Bununla birlikte, ilk tahmin için gerekli olan tüm parametreleri sağlaması dolayısıyla teori olarak kısıtlamalarına rağmen yüzey adsorpsiyonunun basınca bağımlılığına faydalı bir bakış getirir (Erbil, 2006).

2.5.2. BET İzoterm Eşitliği

Kuramsal modeller arasında en çok bilinenidir. Brunauer-Emmet-Teller tarafından 1938 yılında türetilmiştir. Gıda izotermelerinin modellenmesinde geniş uygulama alanı bulmuştur. Eşitliğin türetilmesinde yapılan varsayımlar aşağıda verilmiştir:

- Sorpsiyon sadece özel uçlarda ve homojen yüzeyde oluşmaktadır.
- Birinci tabakadaki su moleküllerinin sorpsiyon ısısı sabit olup, suyun buharlaşma ısısı (ΔH_v) ile uçlarla etkileşime bağlı sorpsiyon ısısının (Q_s) toplamına eşittir.
- Tek tabaka dışındaki tüm tabakalarda sorpsiyon ısısı suyun buharlaşma ısısına eşittir.
- Dengede her tabaka için yoğunlaşma oranı ve buharlaşma oranı aynıdır.
- Diğer bir tabaka tamamen bitmeden yeni bir tabaka başlayabilir.
- Tabakalar birbiriyle etkileşime girmezler.
- İkinci ve daha üst tabakalar yığın sıvıda olduğu gibi aynı potansiyel enerjiye sahiptir.

- Birinci tabakadaki moleküller katı yüzey moleküllerin etkisi nedeniyle farklı potansiyel enerjilere sahiptir.
- Adsorpsiyon enerjisi birincisi dışında bütün tabakalar için aynıdır.
- Her tabaka molekülü sırayla bir üst tabaka molekülünün potansiyel adsorpsiyon bölgesi olarak davranır.
- Adsorpsiyondan sonra adsorbant molekülleri kendi yerlerinde kalır (Erbil, 2006).

BET modeli aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$\frac{M}{M_m} = \frac{ca_w}{(1-a_w)(1-a_w+ca_w)} \quad (2.18)$$

M = Denge nem miktarı (g su/100 g kuru madde veya g su/100 g kuru madde),

M_m = Tek tabaka nem değeri (g su/100 g kuru madde veya g su/100 g kuru madde),

c = BET sorpsiyon ısısı ile ilgili sabit

Eşitlik doğrusal olmayan regresyon yöntemi ile çözülerek M_m ve c değerleri saptanabilir. BET izotermi, a_w değeri 0.1-0.5 arasında geçerlidir. Bazı araştırmacılar $a_w > 0.35$ değerinde sapmanın başladığını belirtmektedir. Bu durum eşitliğin türetilmesinde yapılan varsayımların sonucudur (Saldamlı, 1998).

BET adsorpsiyon modelinin varsayımları üzerine bazı eleştiriler yapılabilir. Eğer ikinci ve diğer tabakaların sıvı halde olduğu varsayılırsa lokalize adsorpsiyon bu tabakalar üzerinde nasıl gerçekleşebilir. Ayrıca, yığın moleküllerin birbiriyle etkileşime girmemesi gerçek dışı görünmektedir. Bu teorik zayıflıklara rağmen BET adsorpsiyon ifadesi katıların Tip II ve Tip III'üne kalitatif uygulamalar için çok yararlıdır (Erbil, 2006). İzoterm verilerinin BET eşitliğine uygulanması ile gıdaların tek tabaka nem değeri saptanabilmektedir. Tek tabaka nem değeri oksijen adsorpsiyonuna ve/veya komşu polar gruplar arasındaki etkileşimlere karşı koruyucu olarak davranmaktadır. Bu nedenle, kuru gıdaların depolamasında optimum kararlılık tek tabaka nem değerinde sağlanmaktadır.

BET eşitliği kullanılarak saptanan değerlerden birisi de sorpsiyon ısıdır. BET eşitliğindeki c değeri sorpsiyon ısı ile ilgili bir sabit olup, sıcaklıkla değişimi aşağıda eşitlikle ifade edilir:

$$c = A_0 \exp \left[\frac{-Q_s}{RT} \right] \quad (2.19)$$

Q_s = Sorpsiyon ısı,

A_0 = sabit

R = İdeal gaz sabiti,

T = Mutlak sıcaklık

(2.19) eşitliğin her iki tarafının doğal logaritması alındığında aşağıdaki eşitlik bulunur:

$$\ln c = \ln A_0 - \frac{Q_s}{R} \left(\frac{1}{T} \right) \quad (2.20)$$

Q_s değerini bulmak için, farklı sıcaklıklarda sorpsiyon izotermi çizilir. İzoterm, BET eşitliğine göre değerlendirilerek farklı sıcaklıklarda c değerleri saptanır. c değerlerinin doğal logaritması, $(1/T)$ 'ye karşı çizildiğinde eğimi Q_s/R olan bir doğru elde edilir ve buradan Q_s değeri bulunur.

2.5.3. GAB İzoterm Eşitliği

GAB sorpsiyon izotermi, Langmuir ve BET teorilerinin artırılmış bir uzantısını gösterir. GAB sorpsiyon izotermi teorik temel prensibi, yanal etkileşimsiz çoklu tabakadaki lokalize olmuş fiziksel adsorpsiyon varsayımıdır. Suyun ilk kabuğu sorbent yüzeyini eşit kaplar ve tek sıra tabakada çok sıkıca bağlıdır. Suyun sonraki tabakaları sorbent yüzeyiyle daha az etkileşime sahiptir. Çoklu tabakadaki moleküller, yığın sıvı ve tek sıra moleküller arasındaki enerji seviyeleri aralığındaki sorbentler arasında etkileşime sahiptir. Sonraki su molekülleri çok daha sıvı molekül özellikleri gösterir.

GAB modeli, bir uçtaki ilk molekülün üstüne sorbe olmuş moleküllerin nem ve çoklu tabaka özelliklerini ayırır. GAB eşitliğinin türetilmesi için yapılan varsayımlar şunlardır:

- Sorpsiyon sistemi benzer aktif uç içerir (ayrıt edilebilir ve bağımsız),
- Sorpsiyon sistemi izotermaldir,
- Sorpsiyon sistemi sorbe olan buhara açıktır.

GAB modeli aşağıdaki eşitlikle ifade edilir:

$$\frac{M}{M_m} = \frac{[cka_w]}{[(1 - ka_w)(1 - ka_w + cka_w)]} \quad (2.21)$$

M_m , c ve k , GAB parametreleridir. Eşitliğin doğrusal olmayan regresyon yöntemleri ile çözülmesiyle, GAB eşitliğindeki sabitler hesaplanır.

M_m değeri, tek tabaka nem değeri olarak adlandırılır. Materyal tarafından su sorpsiyonu için kullanılabilir aktif uçların ölçüsüdür (Quirijns et al., 2005).

c değeri, sorpsiyon ısı ile ilgili bir sabit olup bir uca sorbe olmuş ilk molekülün kısmi fonksiyonunun ilk molekülün ötesindeki çoklu tabaka içindeki moleküllerin kısmi fonksiyonuna oranı olarak tanımlanır. Birincil bağlayıcı uçlara suyun bağlanma kuvvetinin bir ölçüsüdür. c değeri arttıkça, tek sıra tabakadaki su daha kuvvetle bağlanır ve tek sıra molekül ve çoklu tabaka molekülleri arasındaki entalpi büyür. Su molekülleri çoklu tabakada hala lokalize durumda olduğu için c daha çok entalpik bir değerdir.

k değeri, yığın sıvıyla ilgili çoklu tabaka moleküllerinin özelliklerini düzelttiği için bir düzeltme faktörü olarak adlandırılır. k değeri, yığın sıvının içindeki moleküllerin kısmi fonksiyonunun çoklu tabakada sorbe olmuş moleküllerin kısmi fonksiyonuna oranı olarak tanımlanır. Entalpik kısmın yanında, k değeri çok önemli bir entropik kısım içerir. c değeri ile kıyaslandığında k değeri daha çok entropik bir değerdir. k değerinin daha yüksek entropik içeriği çoklu tabakadaki moleküllerle kıyaslandığında yığın sıvı içindeki moleküllerin artan konfigürasyon sayıları ve

hareketliliğiyle açıklanabilir. k değeri bire yaklaştığında çoklu tabaka molekülleri ve sıvı molekülleri arasında bir fark yok gibidir. Bu durumda tek sıra tabakanın ötesindeki su molekülleri çoklu tabakanın içinde yapılaşmaz, fakat yığın sıvı içindeki moleküller gibi aynı özelliklere sahiptir. O zaman GAB eşitliği sorpsiyon için BET eşitliğine indirgenir.

GAB parametrelerinin teorik yorumu, c ve k değerlerinin kombinasyonundan materyal içindeki nemin sorpsiyon davranışlarını türetmeyi mümkün kılar.

2.5.4. Oswin İzoterm Eşitliği

Bu model, Oswin (1946) tarafından, Tip II izotermine uygulanan sigmoidal eğriler için Pearson'ın seri açılımına dayandırılmıştır. Oswin eşitliği özellikle gıda izotermelerinin modellenmesinde kullanılmakta olup, aşağıda verilmiştir:

$$M = C_1 \left[\frac{a_w}{(1 - a_w)} \right]^n \quad (2.22)$$

C_1 ve n eşitliğe ait sabitlerdir.

Çeşitli gıda ve biyomateryaller için Oswin eşitliğindeki C_1 ve n değerleri Luikov (1955) tarafından derlenmiştir. Bu eşitlik, 0-0.5 su aktivitesi aralığındaki yağsız kuru süt ve dondurarak kurutulmuş çayda nem içeriğiyle bağıntı kurmak için kullanılmıştır (Rao and Rivzi, 1994).

2.5.5. Halsey İzoterm Eşitliği

Halsey (1948) tarafından çoklu tabakaların yoğunlaşmasının, molekülün potansiyel enerjisinin yüzeyden uzaklığıyla (r^{th} kuvveti kadar) ters orantılı olduğu varsayımı ile geliştirilmiş bir modeldir.

$$a_w = \exp\left(-\frac{A}{RT\theta^r}\right) \quad (2.23)$$

A ve r sabitler olup, $\theta = M/M_m$ değerine eşittir.

r parametresinin değeri, yüzeyde tutunan madde “adsorbat” ile yüzeyde tutulan madde “adsorbent” arasındaki etkileşimin tipini gösterir. Küçük r değerleri daha büyük uzaklıklarda etkili olabilen Van der Waals tipi kuvvetlerin çoğunlukta olduğunu gösterir. Büyük r değerleri, katının buhar için çekim kuvvetinin, muhtemelen çok spesifik olduğunu ve yüzeye doğru kısıtlandığını ifade eder.

RT teriminin kullanımı A ve r sabitlerinin sıcaklığa bağımlılığını yok etmediği için Iglesias and Chirife (1976) Halsey eşitliğini aşağıdaki şekilde sadeleştirmiştir.

$$a_w = \exp\left(-\frac{A'}{M^r}\right) \quad (2.24)$$

A' yeni bir sabit olup, $A' = \left(\frac{AM_m^r}{RT}\right)$ olarak ifade edilebilir.

Iglesias and Chirife (1976) Halsey eşitliğinin $0.1 < a_w < 0.8$ aralığındaki 69 farklı gıdanın deneysel sorpsiyon izotermelerinin tanımlanmasında kullanıldığını ifade etmiştir. Crapiste and Rotstein (2006) nişasta içeren gıdaların, Linko et al. (1981) kurutulmuş süt ürünlerinin sorpsiyon davranışlarının en iyi Halsey eşitliğiyle tanımlandığını göstermiştir.

3. GIDALARIN SORPSİYON İZOTERMLERİNİN MATEMATİKSEL MODELLENMESİ ÜZERİNE YAPILAN ÇALIŞMALAR

Ülkemize özgü bazı gıdaların sorpsiyon izotermi deneysel olarak belirlenmiş ve bir kısmı da sorpsiyon izoterm eşitlikleri kullanılarak modellenmiştir. Göğüş et al. (1998) Türk Lokumunun 10, 20 ve 30°C sıcaklıktaki sorpsiyon izoterm deneysel olarak belirlenmiştir. Deneysel veriler için en uygun modeli belirlemek için BET, GAB, Halsey, Henderson, Chung ve Pfoest ile Iglesias ve Chirife eşitlikleri kullanılmıştır. Sonuçta, GAB ile Iglesias ve Chirife eşitliklerinin deneysel verileri en iyi şekilde modellediği belirlenmiştir.

Ayrancı et al. (1990) kurutulmuş kayısı, kuru incir ve kuru üzümün izoterm deneysel olarak belirlenmiş, tipik yüksek şekerli gıdalarda olduğu gibi Tip I izotermi verdiğini tespit etmişlerdir. Iglesias ve Chirife, Halsey, BET ve GAB eşitlikleri kullanılmış, BET ve GAB eşitliklerinin deneysel değerleri diğer eşitliklere göre daha iyi modellediği görülmüştür.

Ibanoğlu et al. (1998) 10, 20 ve 30°C sıcaklıkta deneysel olarak tarhananın nem sorpsiyon izoterm deneysel olarak belirlenmiş, ortalama bağıl sapma kriterlerine dayanarak GAB, BET, Oswin ve Henderson eşitlikleri arasında en uygun modelin 0.08-0.58 su aktivitesi aralığında BET eşitliği, bütün sıcaklık ve su aktivitesi aralıklarında ise Oswin eşitliği olduğunu saptamışlardır. Benzer şekilde, Ertugay et al. (2000) 25 ve 35°C sıcaklıkta tarhananın nem adsorpsiyon izoterm deneysel olarak belirlenmiş, sıcaklık arttıkça 0.2-0.9 arasındaki su aktivitelerinde adsorbe edilmiş nem içeriğinin azaldığını gözlemlemişlerdir. Tarhanaya en uygun eşitliği bulmak için deneysel sorpsiyon verileri Halsey, Harkins-Jura, Smith, BET ve Freundlich eşitlikleri ile modellenmiş, regresyon analiziyle tarhanaya en uygun izoterm eşitliklerinin Freundlich, BET ve Henderson eşitlikleri olduğu bulunmuştur.

Kaya and Kahyaoğlu (2007) kurutulmuş olarak tüketildiği ve depolandığı için nem sorpsiyon izoterm deneysel olarak belirlenmiş, değerlendirilmesine ihtiyaç duyulan safran taç

yaprakları ve tarhunun 15, 25 ve 35°C sıcaklıklarda 0.08-0.95 su aktivitesi aralığında nem sorpsiyon izotermelerini belirlemişlerdir. Elde edilen deneysel sorpsiyon verileri, lineer olmayan regresyon analiziyle Halsey, Oswin, BET ve GAB modelleri ile analiz edilmiştir. Yüzde bağıl sapma ve kalanların karesinin ortalama yüzdesi kriterlerine göre 0.06-0.52 su aktivitesi aralığında her iki ürünün denge nem içeriğinin tahmininde en uygun eşitliğin BET eşitliği, bütün su aktivitesi aralıklarında ise Halsey, Oswin ve GAB eşitlikleri olduğu belirlenmiştir.

4. MATERİYAL ve METOT

4. 1. Materyal

Maskan and Göğüş (1998) tarafından kuru dut için 10, 20 ve 30°C sıcaklıklarda ve farklı bağıl nemlerde belirlenmiş olan deneysel denge nem verileri kullanılmış, veriler Tablo 4.1-4.3’de gösterilmiştir.

Tablo 4.1. Kuru dutun 10°C sıcaklıktaki adsorpsiyon ve desorpsiyon izoterm verileri

Desorpsiyon denge nem içeriği (g su/100 g kuru madde)	Adsorpsiyon denge nem içeriği (g su/100 g kuru madde)	Su aktivitesi (a_w)
9.33	6.22	0.10
11.67	7.00	0.23
12.44	8.56	0.33
17.11	11.67	0.43
21.78	17.89	0.58
33.44	30.33	0.77
41.22	37.33	0.83
55.22	45.89	0.87
63.78	53.67	0.91

Tablo 4.2. Kuru dutun 20°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izoterm verileri

Adsorpsiyon denge nem içeriği (g su/100 g kuru madde)	Su aktivitesi (a_w)
5.33	0.08
6.22	0.24
7.11	0.33
11.56	0.43
15.11	0.51
21.33	0.66
30.22	0.76
50.11	0.84
64.44	0.92

Tablo 4.3. Kuru dutun 30°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izoterm verileri

Adsorpsiyon denge nem içeriği (g su/100 g kuru madde)	Su aktivitesi (a_w)
5.33	0.09
6.22	0.10
8.00	0.32
10.67	0.43
14.22	0.53
21.33	0.63
27.56	0.72
46.22	0.83
71.11	0.92

4. 2. Metot

Gıdaların sorpsiyon izotermlerinin modellenmesinde en yaygın olarak kullanılan BET, GAB, Halsey ve Oswin izoterm eşitlikleri kullanılmıştır. Maskan and Göğüş (1998) tarafından kuru dut için 10, 20 ve 30°C sıcaklıklarda ve farklı bağıl nem değerlerinde belirlenmiş olan deneysel denge nem verileri lineer olmayan regresyon analiz programı (Matlab Release 12, MathWorks, MA, A.B.D.) kullanılarak BET, GAB, Oswin ve Halsey eşitlikleri ile tahmin edilmiştir. Deneysel ve tahmini veriler kullanılarak her eşitlik için kalanların karesinin ortalaması (RMS) hesaplanarak en uygun model belirlenmiştir.

$$RSS = \sum (M_{tahmini} - M_{deneysel})^2 \quad (2.25)$$

$$RMS = RSS / (N - p) \quad (2.26)$$

p = Parametre sayısı

N = Gözlem sayısı

En küçük kalanların karesinin ortalaması (RMS) en uygun modeli verir (Berthouex and Brown, 2002).

Çeşitli su aktivitelerinde deneysel ve tahmini denge nem içerikleri arasındaki fark, kalanlar olarak tanımlanmıştır. $(M_{tahmini} - M_{deneysel})$ değerlerine karşı a_w değerleri çizilerek kalanlar grafiği oluşturulmuştur. Kalanlar, deneysel verilerle modelden elde edilmiş veriler arasındaki farktır. Eğer model verilere uygunsa, kalanlar ölçüm hatasını göstermekte olup, ölçüm hatası rastsal bir dağılım sergiler. Kalanlar ile su aktivitesi değerlerinin arasındaki ilişki ölçüm hatasının rastsal olmamasına, dolayısıyla; modelin uygunluğunun zayıflığına işaret eder.

5. SONUÇLAR

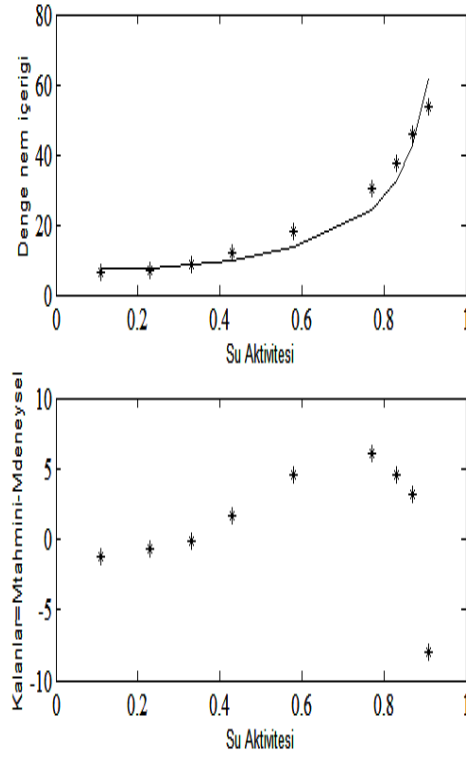
5.1. BET Modeli

Kuru dutun izotermi, kurutulmuş gıdalarda yaygın olan, tipik sigmoidal eğriyi ifade eden Tip II izotermidir (Labuza, 1984). Bu tip izoterm, düşük su aktivitesi değerlerinde denge nem içeriğinde yavaş bir artış, orta su aktivitesi (≈ 0.5) değerlerinde ise şekerin çözünmesiyle çözücü-çözünen etkileşiminin hakim etkisine bağlı olarak keskin bir artışla açıklanır. Çözücü-çözünen etkileşiminin etkisi BET modelinin kullanımını genelde 0-0.5 a_w aralığıyla sınırlandırmıştır (Moraga et al., 2004). Buna rağmen, öncelikle lineer olmayan regresyon analizi ile 0-0.92 a_w aralığındaki deneysel veriler BET eşitliği kullanılarak modellendi ve parametreler hesaplandı (Tablo 5.1). 10, 20 ve 30°C sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi ile 10°C sıcaklıktaki desorpsiyon izotermi RMS değerlerinin yüksek olması dolayısıyla BET modelinin uygun olmadığı görüldü.

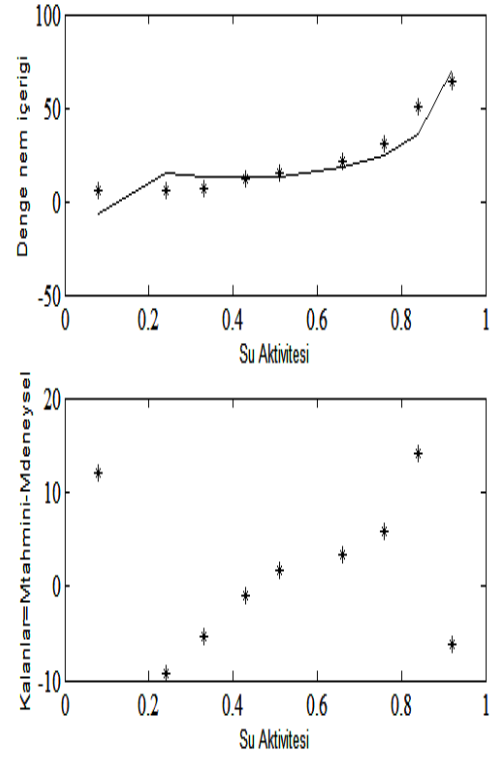
Tablo 5.1. 0-0.92 a_w arasındaki deneysel veriler kullanılarak hesaplanan M_m ve c parametreleri ile RMS değerleri

Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon
		10°C	20°C	30°C	10°C
BET	M_m	5.5397	5.5637	6.2395	6.5094
	c	-48.0880	-6.0241	222.3681	-22.5562
	RMS	4.7441	8.8270	5.2196	5.3391

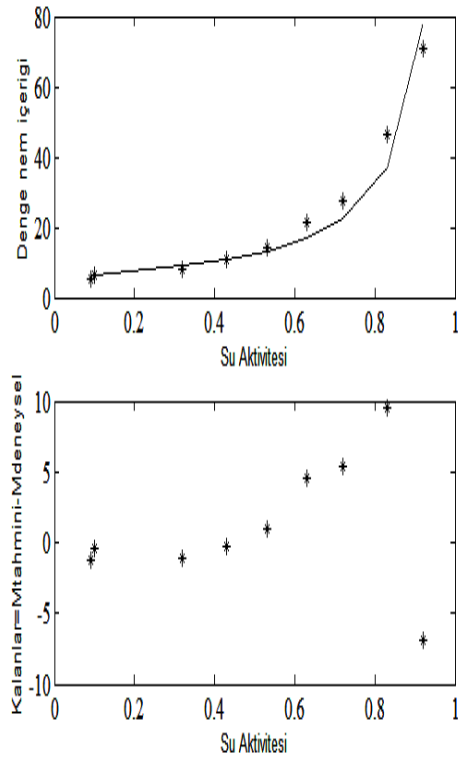
Aynı zamanda Şekil 5.1-5.4'de gösterilen BET sorpsiyon izotermine ait kalanlar grafiklerinin rastsal olmayan dağılımı ve merkezden sapmaların büyüklüğü BET modelinin bu aralıkta uygun olmadığına dair yüksek RMS değerlerini doğrular yöndedir.



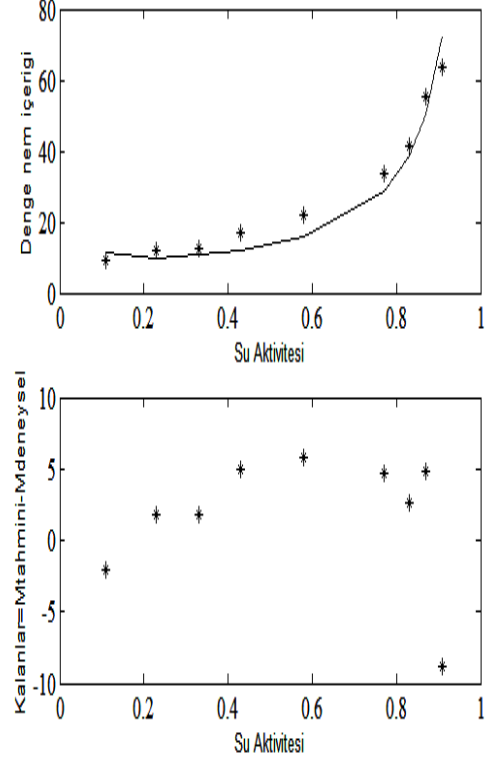
Şekil 5.1. 10⁰C sıcaklıkta BET adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği



Şekil 5.2. 20⁰C sıcaklıkta BET adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği

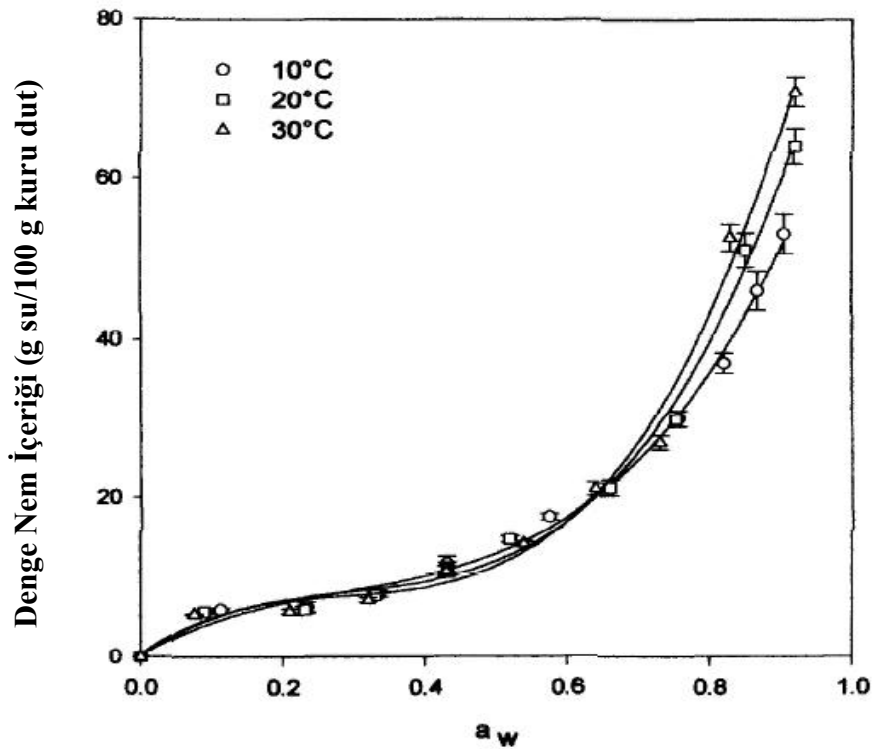


Şekil 5.3. 30⁰C sıcaklıkta BET adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği



Şekil 5.4. 10⁰C sıcaklıkta BET desorpsiyon izotermi kalanlar grafiği

Kuru dutun 10, 20 ve 30°C sıcaklıklarda adsorpsiyon izotermelerinin gösterildiği Şekil 5.5’de 0.65 a_w değerinin üzerindeki değerler için artan sıcaklıkla denge nem içeriğinde bir artış söz konusudur. Sıcaklıkla denge nem içeriğindeki artış, sıcaklık etkisiyle suyun içindeki şekerin çözünmesine bağlı olarak açıklanabilir. BET modelinin, yığın moleküllerin birbiriyle etkileşime girmemesi varsayımı üzerine kurulması sebebiyle, kuru dut için etkileşimin görüldüğü 0.65 a_w değerinin üzerinde ortaya çıkacak sapmaları elimine etmek amacıyla tek sıra nem tabaka değerini bulmak için 0-0.65 a_w aralığındaki veriler seçilerek modelleme yapıldı.



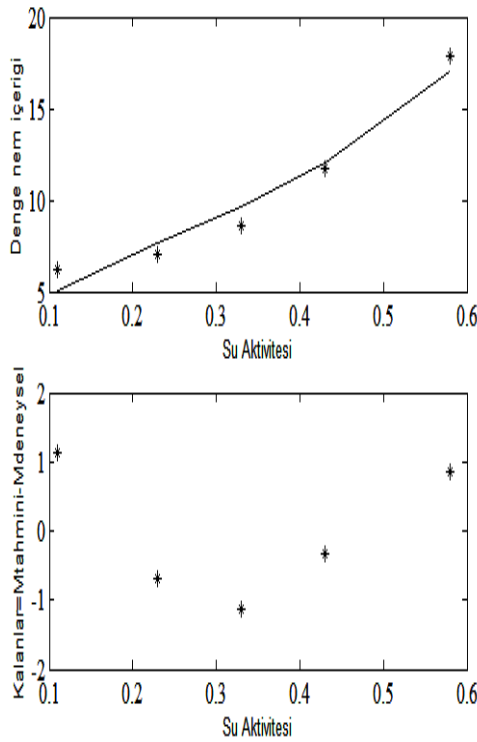
Şekil 5.5. Kuru dutun 10, 20 ve 30°C sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermeleri

Lineer olmayan regresyon analizi ile 0-0.65 a_w aralığındaki deneysel veriler BET eşitliği kullanılarak modellendi ve parametreler hesaplandı (Tablo 5.2). 10, 20 ve 30°C sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermeleri ile 10°C sıcaklıktaki desorpsiyon izotermine RMS değerlerinin küçük olması dolayısıyla BET modeli bu izotermeler için uygundur. 0-0.65 a_w aralığındaki RMS değerleri 0-0.92 a_w aralığındaki RMS değerlerinden çok daha küçüktür.

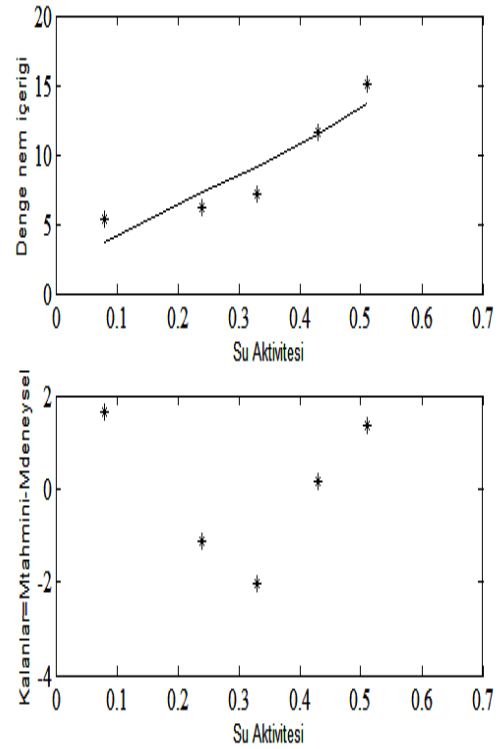
Tablo 5.2. 0-0.65 a_w arasındaki deneysel veriler kullanılarak hesaplanan M_m ve c parametreleri ile RMS değerleri

Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon
		10°C	20°C	30°C	10°C
BET	M_m	7.5936	7.4023	6.4918	9.3523
	c	11.9367	9.6451	34.2274	60.5550
	RMS	1.1349	1.8224	0.8014	0.8806

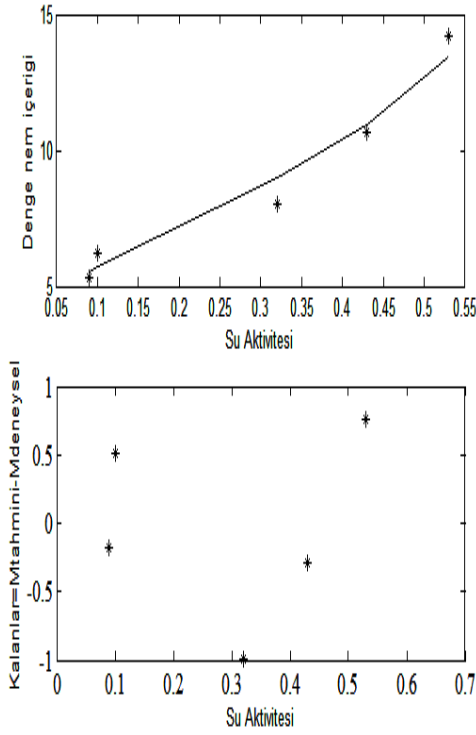
0-0.65 a_w arasındaki BET sorpsiyon izotermine ait kalanlar grafiklerinin (Şekil 5.6-5.9) rastsal olması, BET modelinin uygunluğunu göstermektedir. Sorpsiyon izoterminden lineer olmayan regresyon analizi sonucunda elde edilen RMS değerlerinden en küçük değerlerin 30°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izotermine ve en rastsal kalanlar grafiğinin de yine 30°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izotermine (Şekil 5.8) ait olması dolayısıyla BET modeli en çok uygunluğu 30°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izotermine göstermektedir.



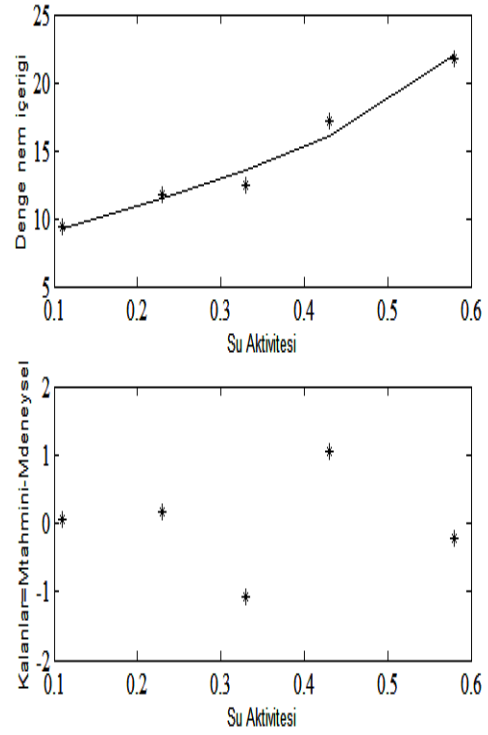
Şekil 5.6. 10°C sıcaklıkta BET adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği



Şekil 5.7. 20°C sıcaklıkta BET adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği



Şekil 5.8. 30°C sıcaklıkta BET adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği



Şekil 5.9. 10°C sıcaklıkta BET desorpsiyon izotermi kalanlar grafiği

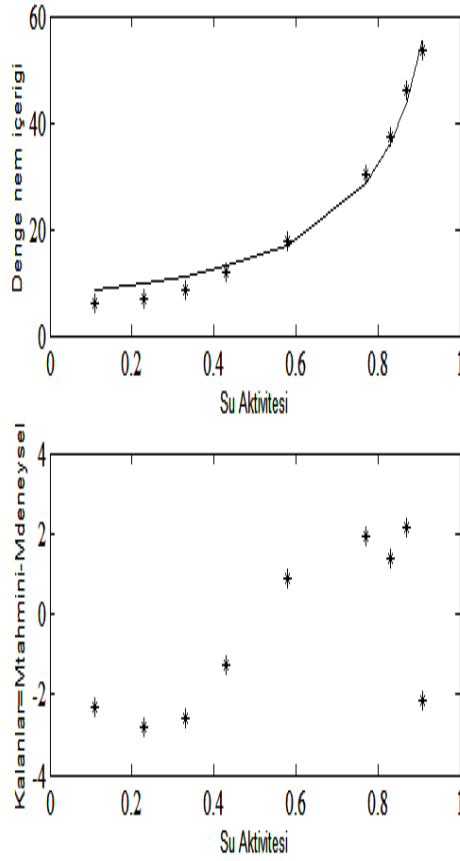
Iglesias and Chirifíe'nin (1976) 100 farklı gıdanın 300 tek sıra tabaka nem değerini incelemesi neticesinde, tek sıra nem değerinin sıcaklık artışıyla azaldığı şeklindeki teorisinde olduğu gibi bu çalışmada da M_m değerleri sıcaklık arttıkça azalmıştır. Kuru dutun 10°C sıcaklıktaki desorpsiyon izotermine ait M_m değerlerinin histerisis nedeniyle 10°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izotermine ait M_m değerlerinden yüksek olduğu görüldü.

5.2. GAB Modeli

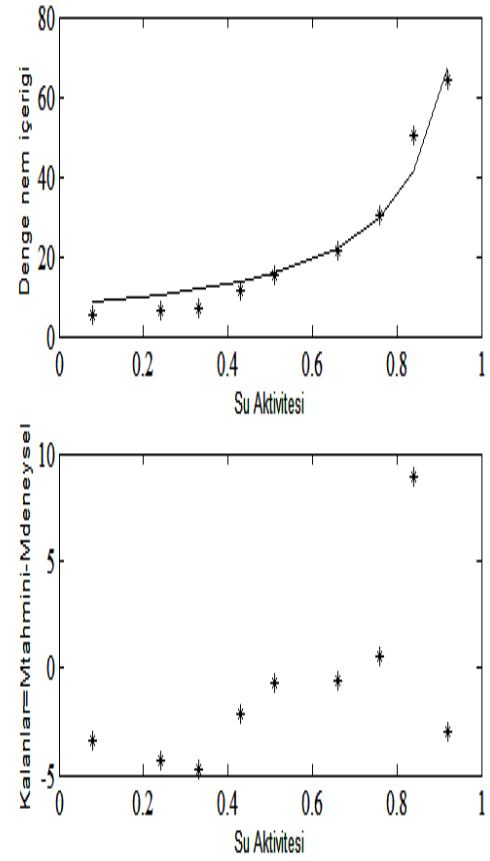
Lineer olmayan regresyon analizi ile 0-0.92 a_w aralığındaki deneysel veriler GAB eşitliği kullanılarak modellendi ve parametreler hesaplandı (Tablo 5.3). 10, 20 ve 30°C sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi ile 10°C sıcaklıktaki desorpsiyon izotermi RMS değerlerinin küçük olması dolayısıyla GAB modeli bu izotermi için uygundur. GAB sorpsiyon izotermine ait kalanlar grafikleri Şekil 5.10-5.13'de gösterildi.

Tablo 5.3. 0-0.92 a_w arasındaki deneysel veriler kullanılarak hesaplanan M_m , c ve k parametreleri ile RMS değerleri

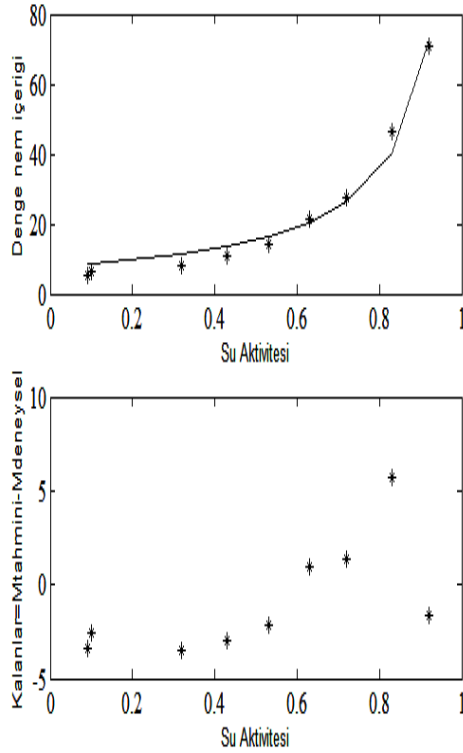
Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon
		10°C	20°C	30°C	10°C
GAB	M_m	9.7751	15.5337	10.8394	9.8233
	c	5.4691	1.3585	3.1156	48.6868
	k	0.9089	0.8698	0.9312	0.9329
	RMS	1.2396	3.0243	2.3405	1.8629



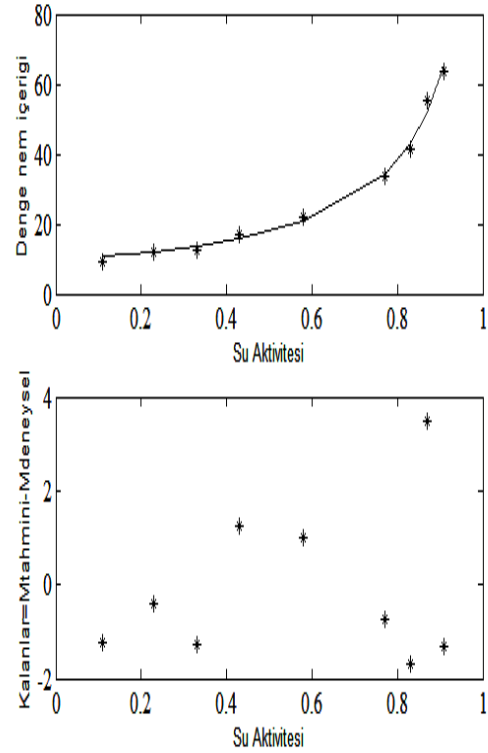
Şekil 5.10. 10°C sıcaklıkta GAB adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği



Şekil 5.11. 20°C sıcaklıkta GAB adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği



Şekil 5.12. 30°C sıcaklıkta GAB adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği



Şekil 5.13. 10°C sıcaklıkta GAB desorpsiyon izotermi kalanlar grafiği

GAB sorpsiyon izotermine ait kalanlar grafiklerinin (Şekil 5.10-5.13) rastsal olması, GAB modelinin uygunluğunu göstermektedir. Sorpsiyon izoterminden lineer olmayan regresyon analizi sonucunda elde edilen RMS değerlerinden en küçük değerlerin 10°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izotermine ve en rastsal kalanlar grafiğinin de yine 10°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izotermine (Şekil 5.10) ait olması dolayısıyla GAB modeli en çok uygunluğu 10°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izotermine göstermektedir.

Samaniego-Esquerra (1991) M_m değerinin farklı gıda maddeleri için farklı olduğunu ifade etmiştir. Samaniego-Esquerra (1991) M_m değerinin sıcaklık artışıyla arttığını belirtmiştir. Cadden (1988) buğdayın c ve M_m değerlerinin, lifsiz bileşenlerin olası çözünebilirlik farklarından dolayı; 25°C sıcaklıkta 4 ve 37°C sıcaklıktaki c ve M_m değerlerinden daha yüksek olduğunu ifade etmiştir. Ibanoglu et al. (1998) tarhananın 20°C sıcaklıktaki M_m değerinin 10 ve 30°C sıcaklıktaki M_m değerlerinden daha yüksek olduğunu bulmuştur. Kuru dutun 20°C sıcaklıktaki M_m değeri ise 10 ve

30°C sıcaklıktaki M_m değerlerinden yüksektir. M_m değerinin sıcaklıkla bu şekilde değişimi, sistem içindeki suyun konfigürasyonunun, farklı sıcaklıklardaki değişiminden kaynaklanabilir. GAB eşitliğinde M_m değeri arttıkça k ve c değerlerinin azaldığı görülmektedir. Ayrıca, 10°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izoterminden elde edilen M_m , c ve k değerleri aynı sıcaklıktaki desorpsiyon izoterminden elde edilen M_m , c ve k değerlerinden histerisis nedeniyle daha düşüktür.

Yüksek c değerleri ile 1'den küçük k değerleri, su moleküllerinin tek sıra molekül tabakanın içinde materyale sıkıca bağlı su molekülleriyle örgütlendiğini ve gıda içindeki su moleküllerinin yığın sıvı moleküllerden oldukça farklı olan çoklu molekül tabakasına işaret etmektedir (Quirijns et al., 2005). 20°C sıcaklıktaki kuru dutun tek sıra nem tabakasında bulunan su, 10 ve 30°C sıcaklıktaki tek sıra nem tabakasında bulunan sudan daha sıkı bağlı ve çoklu moleküldeki suya dönüşen yığın sıvı molekülleri ise 10 ve 30°C sıcaklıklardakinden daha azdır.

BET ve GAB modelleri M_m tek sıra nem tabaka değeri anlayışına dayanmaktadır. Diğer birçok modelin aksine bu modeller, gıda maddelerinin özellikle kurutulmuş gıdaların muhafazası boyunca güvenilir nem değeri olarak düşünülen M_m değerinin elde edilmesini sağlar. GAB eşitliği ile elde edilen tek sıra nem tabaka değerinin BET eşitliği ile elde edilen tek sıra nem tabaka değerinden büyük olduğu görüldü (Tablo 5.2-5.3). BET modelinin M_m değerleri artan sıcaklıkla azalırken, GAB modelinin M_m değerleri ise belirli bir eğilim göstermedi. Benzer sonuçlar, Kaya et al. (2002) tarafından üzüm pestili, Iguedjtal et al. (2008) tarafından kontrollü ani dekompresyonla tekstüre edilmiş patates dilimleri ile İbanoğlu et al. (1999) tarafından tarhana için elde edilmiştir.

Sonuç olarak, her iki modelin lineer olmayan regresyon analiz sonuçları karşılaştırıldığında, 0-0.92 a_w aralığında GAB modelinden elde edilen tek sıra nem tabaka değerlerinin kullanımının daha uygun olduğu ortaya çıkmaktadır.

5.3. Oswin Modeli

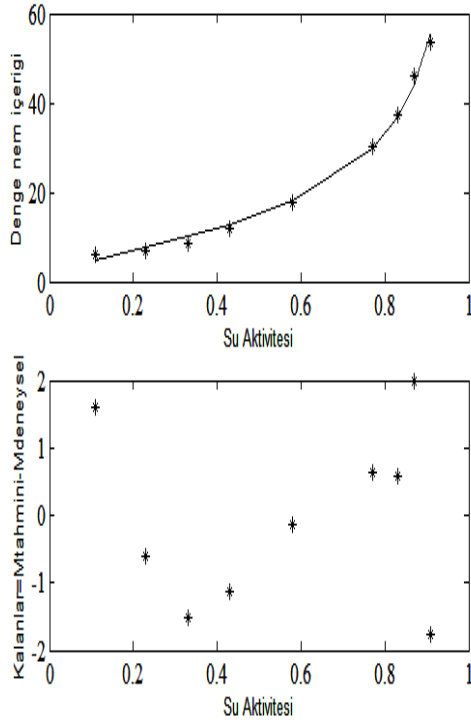
Lineer olmayan regresyon analizi ile 0-0.92 a_w aralığındaki deneysel veriler Oswin eşitliği kullanılarak modellendi ve parametreler hesaplandı (Tablo 5.4). 10, 20 ve 30°C sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi ile 10°C sıcaklıktaki desorpsiyon izotermi RMS değerlerinin küçük olması dolayısıyla Oswin modeli bu izoterm için uygundur. Oswin sorpsiyon izotermine ait kalanlar grafikleri Şekil 5.14-5.17'de gösterildi.

Tablo 5.4. 0-0.92 a_w arasındaki deneysel veriler kullanılarak hesaplanan C_I ve n parametreleri ile RMS değerleri

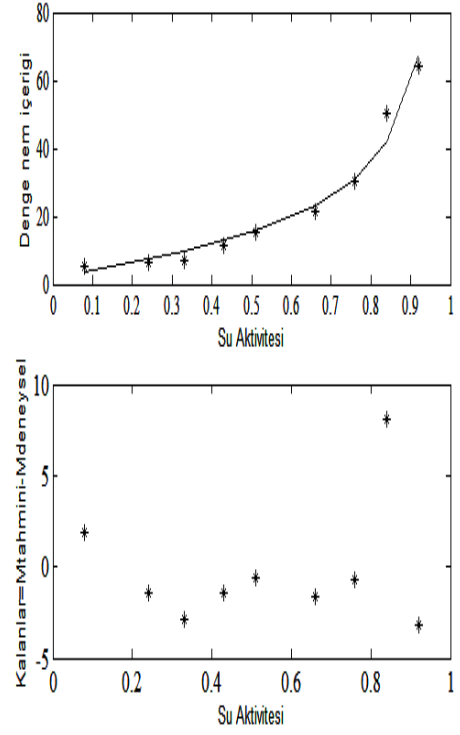
Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon
		10°C	20°C	30°C	10°C
Oswin	C_I	15.0192	15.3601	15.2901	19.0872
	n	0.5644	0.6072	0.6373	0.5224
	RMS	1.4272	3.9751	2.4212	2.3382

Oswin sorpsiyon izotermine ait kalanlar grafiklerinin (Şekil 5.14-5.17) rastsal olması, Oswin modelinin uygunluğunu göstermektedir. Sorpsiyon izoterminden lineer olmayan regresyon analizi sonucunda elde edilen RMS değerlerinden en küçük değerlerin 10°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izotermine ve en rastsal kalanlar grafiğinin de yine 10°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izotermine (Şekil 5.14) ait olması dolayısıyla Oswin modeli en çok uygunluğu 10°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izotermine göstermektedir. Ayrıca, Oswin eşitliğinde sıcaklık arttıkça n değerinin arttığı, 20°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izoterminden elde edilen C_I değerinin ise 10 ve 30°C sıcaklıktaki adsorpsiyon izoterminden elde edilen C_I değerlerinden yüksek olduğu görülmektedir.

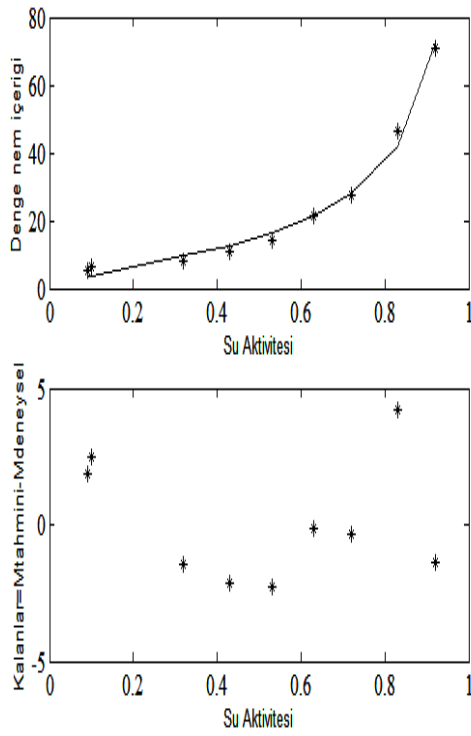
Oswin modeli, Kaya et al. (2002) tarafından üzüm pestili, Ibanoglu et al. (1998) tarafından tarhana için en uygun model olarak belirlenmiştir.



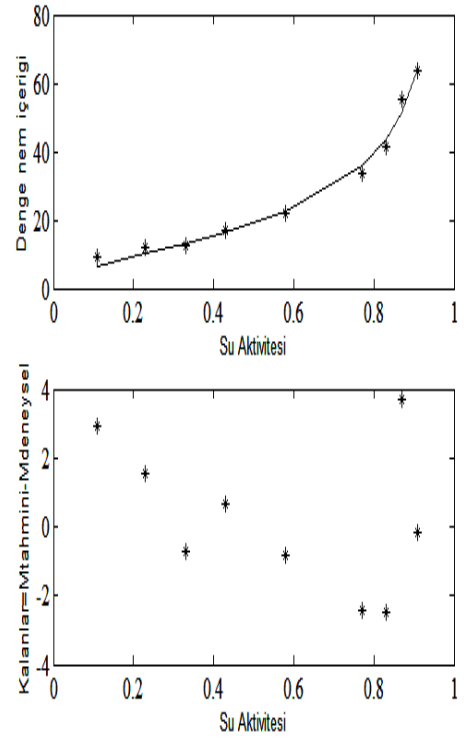
Şekil 5.14. 10°C sıcaklıkta Oswin adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği



Şekil 5.15. 20°C sıcaklıkta Oswin adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği



Şekil 5.16. 30°C sıcaklıkta Oswin adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği



Şekil 5.17. 10°C sıcaklıkta Oswin desorpsiyon izotermi kalanlar grafiği

5.4. Halsey Modeli

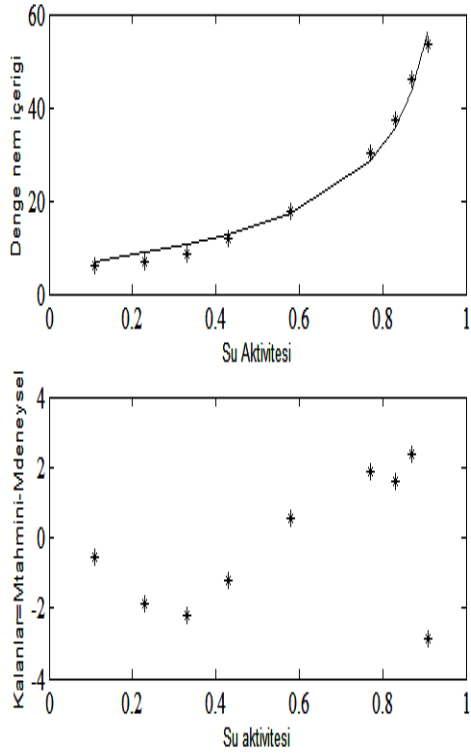
Lineer olmayan regresyon analizi ile 0-0.92 a_w aralığındaki deneysel veriler Halsey eşitliği kullanılarak modellendi ve parametreler hesaplandı (Tablo 5.5). 10, 20 ve 30°C sıcaklıklardaki adsorpsiyon izotermi ile 10°C sıcaklıktaki desorpsiyon izotermi için RMS değerlerinin küçük olması dolayısıyla Halsey modeli bu izoterm için uygundur. Halsey sorpsiyon izotermine ait kalanlar grafikleri Şekil 5.18-5.21’de gösterildi.

Tablo 5.5. 0-0.92 a_w arasındaki deneysel veriler kullanılarak hesaplanan A' ve r parametreleri ile RMS değerleri

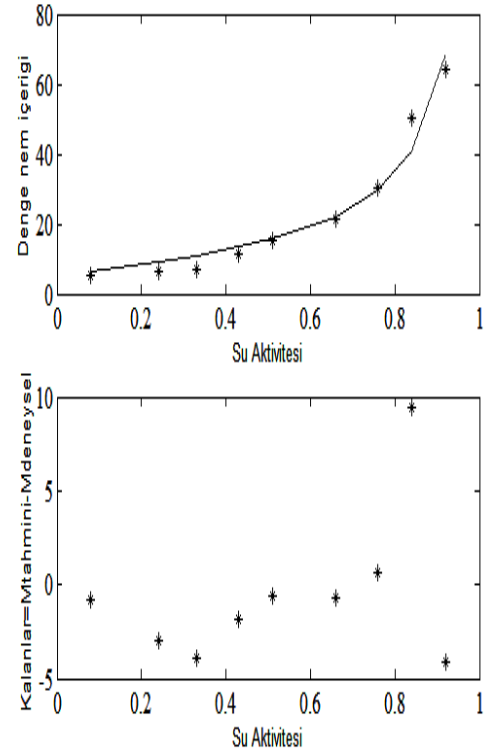
Model	Sabitler	Adsorpsiyon			Desorpsiyon
		10°C	20°C	30°C	10°C
Halsey	A'	37.5307	33.1549	27.8924	71.3582
	r	1.4834	1.4160	1.3532	1.5852
	RMS	2.093	4.3876	2.8766	1.8697

Halsey sorpsiyon izotermine ait kalanlar grafiklerinin (Şekil 5.18-5.21) rastsal olması, Halsey modelinin uygunluğunu göstermektedir. Sorpsiyon izoterminden lineer olmayan regresyon analizi sonucunda elde edilen RMS değerlerinden en küçük değerlerin 10°C sıcaklıktaki desorpsiyon izotermine ve en rastsal kalanlar grafiğinin de yine 10°C sıcaklıktaki desorpsiyon izotermine (Şekil 5.21) ait olması dolayısıyla Halsey modeli en çok uygunluğu 10°C sıcaklıktaki desorpsiyon izotermine göstermektedir. Ayrıca, sıcaklık arttıkça A' ve r parametre değerlerinin azaldığı, 10°C sıcaklıktaki desorpsiyon izoterminden elde edilen A' ve r parametrelerinin ise en yüksek değere sahip olduğu görülmektedir.

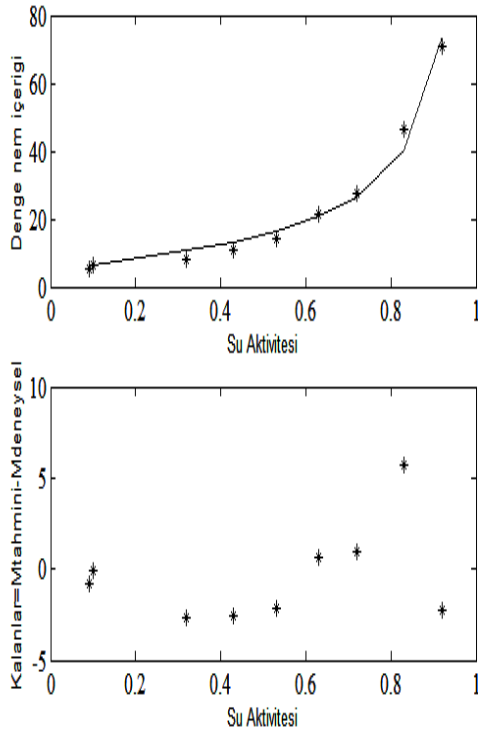
Halsey modeli, Ertugay et al. (2000) tarafından tarhana, Kaya and Kahyaoğlu (2007) tarafından safran taç yaprakları ve tarhun için en uygun model olarak belirlenmiştir.



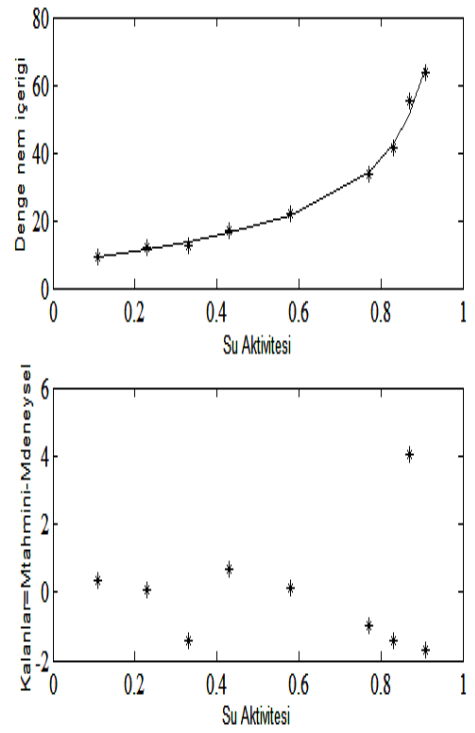
Şekil 5.18. 10⁰C sıcaklıkta Halsey adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği



Şekil 5.19. 20⁰C sıcaklıkta Halsey adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği



Şekil 5.20. 30⁰C sıcaklıkta Halsey adsorpsiyon izotermi kalanlar grafiği



Şekil 5.21. 10⁰C sıcaklıkta Halsey desorpsiyon izotermi kalanlar grafiği

6. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Dört sorpsiyon modelinin arasında, bütün sıcaklıklarda kuru dutun adsorpsiyon davranışını tanımlayan en uygun model 0-0.65 a_w aralığında BET modeli, 0-0.92 a_w aralığında ise sırasıyla GAB>Oswin>Halsey>BET modelleridir. Dört sorpsiyon modelinin arasında, bütün sıcaklıklarda kuru dutun desorpsiyon davranışını tanımlayan en uygun model 0-0.65 a_w aralığında BET modeli, 0-0.92 a_w aralığında ise sırasıyla GAB>Halsey>Oswin>BET modelleridir.

Bu sonuçlar göstermektedir ki, kuru dutun su aktivitesi ve denge nem içeriği arasındaki ilişkiyi, 0-0.92 a_w aralığında GAB modeli, 0-0.65 a_w aralığında ise BET modeli en iyi tanımlamaktadır. Bundan dolayı bu iki model kuru dutun işlenmesinde, kullanımında ve muhafazasında nem değerlerinin belirlenmesinde kullanılabilir.

Dutun kurutulması sırasında hava sıcaklığı, havanın bağıl nemi ve hava hızının taze dutun kurutulmasını nasıl etkilediği konusunda bir çalışma yapılabilir.

KAYNAKLAR

1. Al-Muhtaseb, A. H., McMinn, W. A. M. and Magee, T. R. A. 2002. Moisture sorption isotherm characteristics of food products: A Review. Food and Bioproducts Processing, 80: 118-128.
2. Atkins, P.W. 1994. Physical Chemistry. 5th edition. Oxford University Press, Oxford, UK.
3. Ayrancı, E., Ayrancı, G. and Doğantan, Z. 1990. Moisture sorption isotherms of dried apricot, fig and raisin at 20°C and 36°C. Journal of Food Science, 55(6): 1591-1593.
4. Berthouex, P. M. and Brown, L. C. 2002. Statistics for Environmental Engineers. 2nd Edition. Lewis Publishers. CRC Press, Florida, USA.
5. Cadden, A. M. 2006. Moisture sorption characteristic of several food fibers. Journal of Food Science, 53: 1150-1154.
6. Caurie, M. 2007. A practical approach to water sorption isotherms and the basis for the determination of optimum moisture levels of dehydrated foods. Journal of Food Science & Technology, 6: 85-93.
7. Chinachoti, P. and Rivzi, S. S. H. 2006. Interaction of solutes with raw starch during desorption as shown by water retention. Journal of Food Science, 51: 450-452.
8. Crapiste, G. H. and Rotstein, E. 2006. Prediction of sorptional equilibrium data for starch-containing foodstuff. Journal of Food Science, 47: 1501-1507.
9. Erbil, H. Y. 2006. Surface Chemistry Of Solid and Liquid Interfaces. Blackwell Publishing Co., Oxford, UK.

10. Ertugay, M. F., Certel, M. and Gürses, A. 2000. Moisture adsorption isotherms of Tarhana at 25°C and 35°C and the investigation of fitness of various isotherm equations to moisture sorption data of Tarhana. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 80: 2001-2004.
11. Göğüş, F., Maskan, M. and Kaya, A. 1998. Sorption isotherms of Turkish delight. *Journal of Food Processing and Preservation*, 22(5): 345-357.
12. Hamm, W. 1992. *Food Engineering in a Computer Climate: Design and Control in Food Production Processes*. Taylor and Francis, Inc., Hampshire, UK.
13. Heldman, D. R. 2003. *Encyclopedia of Agricultural, Food and Biological Engineering*. Marcel Dekker, Inc., New York, USA.
14. Bell, L.N. and Labuza, T. P. 2000. *Moisture Sorption: Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use*. 2nd edition. American Association of Cereal Chemists. Egan Press, Egan, MN, USA.
15. Ibanoglu, S., Kaya, S. and Kaya, A. 1999. Evaluation of sorption properties of Turkish tarhana powder. *Molecular Nutrition and Food Research*, 43(2): 122-125.
16. Iglesias, H. A. and Chirife, C. 1976. Isosteric heat of water vapour sorption on dehydrated foods. Part I. Analysis of the differential heat curves. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 9: 119-122.
17. Iglesias, H. A. and Chirife, J. 1982. *Handbook of Food Isotherms: Water Sorption Parameters for Food and Food Components*. Academic Press, New York, USA.
18. Iguedjtal, T., Louka, N. and Allaf, K. 2008. Sorption isotherms of potato slices dried and texturized by controlled sudden decompression. *Journal of Food Engineering*, 85: 180-190.

19. Kaya, S. and Kahyaoglu, T. 2007. Moisture sorption and thermodynamic properties of safflower petals and tarragon. *Journal of Food Engineering*, 78: 413-421.
20. Kaya, A., Göğüş, F. and Medeni, M. 2002. Moisture sorption isotherms of grape pestil and foamed grape pestil. *Molecular Nutrition and Food Research*, 46 (2): 73-75.
21. Labuza, T. P. and Rutman, M. 1968. The effect of surface active agents on sorption isotherms of model systems. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 46: 364-368.
22. Labuza, T. P. 1984. *Moisture Sorption: Practical Aspects of Isotherm Measurement and Use*. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, MN; ABD.
23. Linko, P., Pollari, T., Harju, M. and Heikonen, M. 1981. Water sorption properties and the effect of moisture on structure of dried milk products. *Lebensmittel Wissenschaft und Technologie*, 15: 26-30.
24. Maskan, M. and Göğüş, F. 1998. Sorption isotherms and drying characteristics of Mulberry (*Morus alba*). *Journal of Food Engineering*, 37: 437-449.
25. Moraga, G., Martinez-Navarette, N. and Chiralt, A. 2004. Water sorption isotherms and glass transition in strawberries: Influence of pretreatment. *Journal of Food Engineering*, 62 : 315-321.
26. Quirijns E. J., van Boxtel, A. J. B. , van Loon, W.K.P. and van Straten, G. 2005. Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 85: 1805-1814.
27. Rahman, M. S. 1999. *Handbook of Food Preservation*. Marcel Dekker, New York, USA.

28. Rao, M. A. and Rivzi S. S. H. 1994. Engineering Properties of Foods. 2nd edition. Marcel Dekker, New York, USA.
29. Rowland, S. P. 1980. Water in Polymers. American Chemical Society. Washington DC, USA.
30. Saldamlı, İ. 1998. Gıda Kimyası. Hacettepe Üniversitesi Yayınları, Ankara.
31. Samaniego-Esguerra, C. M., Boag, I. F. and Roberston, G. L. 1991. Comparison of regression methods for fitting the GAB model to the moisture isotherms of some dried fruit and vegetables. Journal of Food Engineering, 13: 115-133.
32. van den Berg, C. 1984. Description of water activity of foods for engineering purposes by means of the GAB model of sorption. Pp. 311-321. In: Engineering and Foods. Volume 1. McKenna, B.M. (Ed.). Elsevier, New York, USA.

ÖZGEÇMİŞ

1980 yılında Sinop'ta doğdum. İlköğrenimimi 1990 yılında Gazi Mustafa Kemal İlkokulu'nda, orta ve lise öğrenimimi 1998 yılında Sinop Anadolu Lisesinde tamamladım. Üniversite öğrenimime 1998 yılında Hacettepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Gıda Mühendisliği Bölümünde başladım ve 2003 yılında mezun oldum. Aynı yıl GİMA T.A.Ş.'nde müşteri temsilcisi olarak çalıştım. 2004 yılından beri Tarım ve Köyişleri Bakanlığı Kartal İlçe Tarım Müdürlüğü'nde gıda kontrolörü olarak görev yapmaktayım.