

## MOLEKÜLER HAREKETLİLİK: GIDALARIN MUHAFAZASI ve İŞLEMESİNDE YENİ BİR YAKLAŞIM

Ece Çağdaş\*, Atıf Can Seydim

Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Isparta

Geliş tarihi / Received: 24.12.2013

Düzeltilerek Geliş tarihi / Received in revised form: 04.03.2014

Kabul tarihi / Accepted: 06.03.2014

### Özet

Su aktivitesi kavramı, 1950'lerde gıdaların dayanıklılığının belirlenmesinde kullanılmış olsa da bazı kısıtlamalara sahiptir. Bu kısıtlamaların üstesinden gelebilmek amacıyla camsı geçiş kavramı önerilmiştir. Ancak günümüzde bu kavramın da tüm gıda ürünleri ve depolama koşullarında dayanıklılığın belirlenmesi için yeterli olmadığı belirtilmektedir. Yapılan araştırmalarda su aktivitesi ve camsı geçiş kavramını birlikte kullanarak bazı yaklaşımlar önerilmekte ve bu yaklaşımlar, camsı geçiş koşulları ile su miktarının su aktivitesinin bir fonksiyonu olarak çizildiği grafikler ve durum diyagramlarındaki makro ve mikro bölgelerden oluşan grafikler olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yaklaşımlara ek olarak; kullanılan engel teknolojilerini, gıdanın kalitesini etkileyen su miktarını ve dayanıklılığı tanımlamak için kritik sıcaklık terimi geliştirilmiş ve su hareketliliği kavramı ortaya atılmıştır. Bu özet çalışmasında su aktivitesi kavramı, camsı geçiş kavramı ve bunların birlikte kullanımı ile günümüzde yeni tanımlanan moleküler hareketlilik kavramının gıdaların dayanıklılığını tanımlamada nasıl kullanıldığı konuları üzerinde durulmuştur.

**Anahtar kelimeler:** Su aktivitesi, Camsı geçiş, Moleküler hareketlilik

## MOLECULAR MOBILITY: A NEW APPROACH to FOOD PRESERVATION and PROCESSING

### Abstract

Although, water activity was used for determining food stability in 1950's, it has some limitations. In order to overcome these limitations, glass transition concept was proposed. However, it was shown that this concept was also not enough to determine the stability for every food and storage conditions, as well. In few researches, combination of water activity and glass transition concepts were suggested. These concepts appear such graphs of glass transition and water content as a function of water activity and/or macro and micro regions in the state diagrams. In addition to these approaches, critical temperature concept was developed to determine the hurdle strategies, food quality, water content and stability. In this review, water activity concept, glass transition concept and combination of these concepts with how to use molecular mobility concept, which is a new approach to determine food stability, were explained.

**Keywords:** Water activity, glass transition, molecular mobility

\*Yazışmalardan sorumlu yazar / Corresponding author;

✉ ececagdas@sdu.edu.tr, ☎ (+90) 5385099220,

☎ (+90) 2462111667

## GİRİŞ

Dayanıklı bir gıda ürünü, farklı işleme teknikleri uygulanması ve bu ürünün uygun koşullarda saklanması ile geliştirilebilir. Ürünün dayanıklılığı, mikrobiyel ölüm/gelişme, fiziksel ve kimyasal bozunmalar, ürünün su içeriği, kompozisyonu, koruyucu katkıları, pH, çevresel ya da işleme kaynaklı etkenlere bağlı olarak işleme ve depolama sırasında değişim göstermektedir. Gıdanın dayanıklılığını arttırmak için sterilizasyon, aseptik ambalajlama, fermentasyon, haşlama ve su aktivitesini azaltma gibi engel teknolojileri kullanılabilir (1). Market raflarında yer alan gıda ürünlerinin pek çoğu belirtilen bu engel teknolojileri kullanılarak muhafaza edilmektedir. 1980'lerde gıda dayanıklılığının su aktivitesine bağlı olduğunu destekleyen pek çok yayın çıkarılmıştır. Bunun yanı sıra su aktivitesinin kısıtlayıcı noktalarına açıklık getirmek amacıyla camsı geçiş kavramı da ortaya atılan bir diğer teoridir. Gıdaların dayanıklılığı su aktivitesine bağlı olduğu için ve camsı geçiş sıcaklığı ( $T_g$ ) bu parametreye oldukça duyarlı olduğundan, camsı geçiş bölgesi kavramı gıda ürünlerinin işlenmesi ve raf ömrü kontrol mekanizmasının anlaşılmasında önemli parametrelerden biri haline gelmiştir. Aslında, camsı geçiş sıcaklığı referans sıcaklık olarak belirtilmektedir:  $T_g$ 'nin altındaki sıcaklıklarda gıda dayanıklı kabul edilir, bu sıcaklığın üzerindeki depolama sıcaklıklarında ( $T$ ) depolama sıcaklığı ile  $T_g$  arasındaki farkın ( $T-T_g$ ) fiziksel, kimyasal ve biyolojik değişimlerin hızını kontrol ettiği varsayılır. Camsı geçiş aynı zamanda, ürünün sert/çıtır ya da yumuşak/lastiğimsi ya da viskoz olduğu noktada suyun içeriğinin ya da sıcaklığın açıklanmasında rol oynamaktadır (2). Moleküler hareketlilik kavramı, işlenebilirlik ve depolamayla ilgili gıda muhafaza teknikleriyle ilişkilendirilen pek çok kavramı içermektedir. Bu kavram; çözgen göçü, mekanik gerilmeden kaynaklanan moleküler yer değiştirme ya da deformasyon, çözünen ya da çözgen moleküllerinin kimyasal potansiyel farkı ya da elektrik alanı nedeniyle olması, moleküler difüzyon, atom gruplarının ya da polimerik grupların kovalent bağ etrafında dönmesi ve reaktantların her birinin ürün içerisindeki yer değiştirmeleri gibi hareketleri içermektedir. Bu yer değiştirme kristalizasyona ya da kimyasal ve enzimatik reaksiyonlara neden olabilir. Bununla birlikte, moleküler hareketlilik, ürünün akış ve mekanik özelliklerine ve böylece

dokusunu kontrol altında tutan viskozite kavramına bağlıdır. Aslında su içeriği ve gıdanın diğer bileşenleri ile su arasındaki etkileşim tüm sulu faz elementlerinin dinamik ve termodinamik özelliklerinin her ikisini de kontrol altında tutmaktadır ve yüksek sıcaklık yüksek moleküler hareketlilik demektir (3).

## Su Aktivitesi Kavramı

Gıdaların muhafaza edilmesinde, gıdanın sahip olduğu toplam sudan çok aktif su daha fazla önem kazanmaktadır. Böylece, su aktivitesi kullanılarak muhafaza konusunda geliştirilmiş ilkeler ya da limitler geliştirilebilir. Örneğin, hiçbir mikroorganizmanın canlı kalamayacağı bir su aktivitesi limiti vardır. Patojenik bakteri grubu 0.85 su aktivitesi değerinin altında canlılık gösteremezken mayalar ve küfler düşük su aktivitesi değerlerine daha dayanıklıdır. Bir gıda maddesinde sabit sıcaklık ve kısmi basınçta absorpsiyon/desorpsiyon bir süre sonra dengeye ulaşır. Bu durum yüzeyde tamamen tek katman molekül yapısı oluştuğundaki durumdur ve bu anda sahip olunan nem tek katman nem içeriğidir. Bir gıda ürünü, sıcaklık gibi çevresel koşullara, gıdanın yapısına ve kimyasal kompozisyonuna bağlı olarak değişiklik gösteren tek katman nem içeriğinde en dayanıklı halindedir. Ancak, deneysel veriler bir gıdanın dayanıklılığı için en uygun nem miktarının o gıdanın çok katmanlı absorpsiyon bölgesinde gösterdiğini belirtmektedir. Enzimatik olmayan esmerleşme süreciyle ilgili yapılan bir çalışmada, jelatinize nişasta ortamında 70 °C sıcaklık için enzimatik olmayan esmerleşme reaksiyon hızının nem içeriği ve su aktivitesinin bir fonksiyonu olduğu gösterilmiş ve reaksiyon hızının tek katman değerine kadar artan su aktivitesi değerleriyle artış gösterdiği, tek katman değerinden sonra da artan su aktivitesi değerleriyle azalış gösterdiği belirtilmiştir (4). Su aktivitesi ürünün dengede olduğu varsayılarak açıklanır ancak kritik limitleri, pH, tuz, antimikrobiyel ajanlar, ısı uygulamaları, elektromanyetik radyasyon ve sıcaklık gibi diğer faktörlerin etkisiyle değişikliğe uğrayabilir. Su aktivitesi, sadece bağlı ve serbest suyun miktarı ve reaktivitesi hakkında bilgi sağlar. Kristalizasyon, topaklanma, yapışkanlık, jelatinizasyon ve difüzyon gibi pek çok fiziksel değişim sadece su aktivitesine bağlı olarak açıklanamaz (1).

### Camsı Geçiş Kavramı

Camsı geçiş, camsı bir yapının aşırı soğuk eriyik halini alana kadar ısıtıldığında gözlenen olaya verilen isimdir. Bu bölgede olan bir materyal kırılğan bir katı davranışı sergiler ve mikro yapısı, bir sıvıda olduğu gibi sadece kısa erimli düzen sergiler. Aşırı soğutulmuş eriyik, erime noktası ve camsı geçiş arasında gözlenen kristal yapılmayan durumdadır. Mekanik davranışı polimerik materyalde olduğu gibi viskoelastik ya da düşük molekül ağırlıklı materyallerde olduğu gibi viskoz olmaktadır. Isıtma boyunca, gıda materyalinin camsı geçiş durumu özgül ısıya bağlı olarak sadece bir noktada gerçekleşmez. Camsı geçiş aynı zamanda, camsı geçişin denge dışı davranış sergilemesi nedeniyle faz değişimi olarak adlandırılmak yerine durum geçişi olarak adlandırılmaktadır (5). Düşük camsı geçiş, oda sıcaklığında bir gıdanın yumuşak/plastiğimsi yapıda olduğu yüksek sıcaklıklarda ise akışkanlık kazandığı anlamına gelir. Bunun tersi olarak, yüksek camsı geçiş sıcaklığına sahip bir gıda oda sıcaklığında sert ve kırılğandır. Bu durumdaki materyal düzenli yapıda bir kristal form sergilemez ancak sıvı durumun düzensizliğini devam ettirir. Fiziksel olarak bir katıdır ancak daha çok termodinamik bir sıvı gibi davranır (6). Gıda materyalleri, camsı geçiş sıcaklığının altında amorf ya da kristal olmayan yapıdadır ve kırılğan özellik gösterir. Yapılan çalışmalar sonucunda gıdaların camsı geçiş bölgesinin altında oldukça dayanıklı olduğu gösterilmiştir, çünkü camsı geçiş sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda bozunma reaksiyonlarında yer alan bileşiklerin moleküler mesafeyi aşarak difüzlenmesi ve bir diğer bileşikle reaksiyona girebilecek kadar yaklaşması aylar ya da yıllar boyu sürebilir (7). Bu hipotez, camsı geçişin gıda dayanıklılığını oldukça etkilediğini göstermektedir çünkü yoğunlaştırılmış fazdaki su kinetik olarak hareketsiz hale gelir ve böylece reaksiyonlara katılamaz ya da destekleyemez. Buna göre, bir gıda ürünü onun camsı geçiş sıcaklığının altında ( $T_g$  ya da  $T_g$ ) en dayanıklı formundadır ve ürünün sıcaklığı ile  $T_g$  arasındaki fark ne kadar fazlaysa bozunma reaksiyonlarının hızı da o kadar yüksek olur. Bu görüşten yola çıkılarak gıdaların kristalizasyonu (8), kurutma sırasında gözenek oluşumu (9, 10) ve hidrolizi (11) sırasında dayanıklılığının belirlenmesinde camsı geçiş sıcaklığı belirleyici unsur olarak

kullanılmıştır. Camsı geçiş sıcaklığının belirlenmesinde pek çok teknik kullanılmakta olup en yaygın olanı fark tarama kalorimetresi (DSC) dir (12-16). Kalorimetrik ya da spektroskopik teknikler, örnek boyutu, şekli ve su içeriği kontrolü gibi bazı kısıtlamalara sahiptir. Sırasıyla çekirdeğin ve dönen probun hareketliliğini hesaplayan nükleer manyetik rezonans (NMR) ve elektronik paramanyetik rezonans (EPR) camsı geçişin çalışmasında potansiyele sahip tekniklerdir. Camsı geçişin uygulamaları, difüzyon, yapı, kristalizasyon, yapışkanlık ve enzim inaktivasyonu gibi süreçlerin kontrolüdür ancak tüm işleme teknikleri ve depolama koşullarında geçerliliğinin olmadığı gösterilmiştir. Bulguların pek çoğu geçerliliği test etmek için; gıdanın camsı geçiş bölgesinde dayanıklı olup olmadığı ya da camsı geçişin üzerinde ne kadar dayanıksız olduğu gibi iki ölçüt kullanılmaktadır.

### Moleküler Hareketlilik

Pek çok gıda yarı kararlı (metastabil) ya da kararlı olmayan (amorf) durumdadır; bu yüzden gıda sistemlerinin tanımlanmasında, tahmin edilmesinde ve kontrolünde termodinamik yaklaşımlardan çok kinetik yaklaşımlar üzerinde durulmalıdır. Moleküler hareketlilik uygun bir kinetik yaklaşımdır çünkü gıdalardaki difüzyon-kısıtlı olaylarla ilişkilidir (17). Son zamanlarda gıda ve farmasötik sanayideki araştırmalar amorf sistemlerdeki moleküler hareketlilik üzerine yapılmaya başlanmıştır (18, 19). Bu yöndeki bazı çalışmalarda fosforesans emisyon spektrumu ve amorf jelatin (20-22), şekerler (23-25) ve globüler proteinlerden (26, 27) oluşan ince film içerisine disperse olmuş ksantan prob eritrosin B'den azalan yoğunluğun amorf katıdaki moleküler hareketliliğinin spesifik çeşitlerine duyarlı olduğu belirlenmiştir. Fosforesans teknikleri oksijen uyarılmış üçlü yapının temas noktası olduğu için fosforesans amorf yapının oksijen difüzyonunun belirlenmesinde gösterge olarak kullanılabilir (26-30). Moleküler hareketlilik sıcaklık, bağıl nem, basınç, su aktivitesi ve çözgen konsantrasyonu gibi çevresel faktörlere duyarlıdır. Amorf gıdalarda meydana gelen bozunma süreçlerinin hızı, işlemede yer alan özel biyomoleküllere, bölgesel konfigürasyonun durumuna ve meydana gelen farklı hareket şekillerine duyarlıdır. Amorf ve plastik durumdaki moleküler hareketlilik üzerine yapılan her hangi

bir çalışmada moleküler hareketlilik ve moleküler yapı arasında oluşan karmaşık bağlantıların tanımlanması gerekmektedir (31).

### **Suyun Hareketliliği Kavramı**

Su aktivitesi ya da camsı geçiş kavramı dışında ana faktör gıda matrisindeki su moleküllerinin hareketliliğidir. Belirlenen su aktivitesinde, bazı moleküller hareketsiz iken bazıları hareketli olabilir ya da moleküller camsı geçişin hem altında hem de üzerinde hareketli olabilir. Ek olarak moleküller, tüm olarak hareket edebilir ya da bölgesel hareketler gözlenebilir. Böylece, reaktantların hareket etme yeteneği bir reaksiyonun gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini belirler. Camsı geçişin altında ve üzerinde moleküler hareketliliğin tamamıyla anlaşılabilmesi için, pek çok karışıklığı açıklayabilen diğer gevşeme tekniklerinin düşünülmesi gerekir. Gıdalardaki hareketliliğin karakterize edildiği ve dayanıklılığın tanımlandığı çalışmalarda NMR tekniği kullanılmaktadır (32-36). Hareketlilik, kullanılan metodun frekansa ya da zamana göre hesaplanmış analitik parametreleri ile tanımlanır. Nanometreden santimetreye değişim gösteren uzunluktaki gıdalarda karmaşık yapısal özelliklerin varlığı ve camsı geçiş durumunda aktive olan karmaşık titreşim hareketlerinin tanımlanması, camsı geçişin makroskopik ölçümlerinin daha da ötesine geçilmesi gerektiğini vurgulamaktadır. Amorf gıdaların moleküler hareketliliği ve yapısını araştırmada lüminesans spektroskopinin güçlü bir biyofiziksel araç olduğu gösterilmiştir (31). Global ötelenme hareketinden farklı olarak dönme hareketi ve titreşimsel hareketler, moleküler yapı ve hareketlilik hakkında direkt bilgi sağlayarak emisyon yoğunluğu, enerji ve polarizasyon hesaplanabilir. Mumlu mısır nişastası (37) ve su-maltoz çözeltisinin (38) camsı geçiş durumunda bile su moleküllerinin oldukça hareketli olduğu bulunmuştur. Nişastada olduğu gibi, nişastanın temel hareketliliğinde camsı geçiş durumu boyunca değişiklik gözlenmesine rağmen camsı geçişteki su molekülleri gibi diğerlerinin de camsı yapıda olduğu anlaşılmaz. Aslında, sistem camsı geçişin altında sıcaklık 100 °C olsa bile donmamış suyun hareketlilik gösterdiği belirtilmiştir (37). NMR hareketlilik sinyalleri mumlu mısır nişastası (39) ve glutenin (40) camsı geçiş durumunda da gözlenmiştir.

### **Camsı Yapıda Hareketlilik**

Camsı bir yapı, polimerlerin bölgesel hareketlerinde ya da gaz ya da küçük molekül halde matrisin içerisinde kalmış ötektik hareketlilik adaları oluşturan hasar, heterojenite ya da yoğunluk dalgalanmaları olarak adlandırılan hem yoğun hem de daha az yoğun bölgelerden meydana gelmektedir. Camsı geçiş durumunda hareketlilik asıl olarak bölgeseldir, atomların küçük gruplarının tekrar düzenlenmesi, bağların ya da atomların titreşimleri kısıtlanmıştır ve böylece çevre atom ve molekülleri direkt içermemektedir. Soğutma koşullarına bağlı olarak, camsı geçişte bulunan bir materyal camsı geçişin üzerindeki en dayanıklı hale karşılık gelen entalpide, entropide, hacimde ve onun en dayanıklı formunda olmayabilir. Bu durum denge dışıdır. Böylece, eğer yeterli moleküler hareketlilik varsa bu karakteristikler kendi denge değerlerine ulaşmaya çalışır. Daha düşük enerji seviyesine ulaşma kabiliyeti  $T_g$ 'ye yakın sıcaklıklarda depolama ile başarılabilir. Bu mikro yapısal değişikliğin bir sonucu olarak sıkışık moleküler düzen ve güçlü etkileşimler azalan difüzyon hızı sayesinde taşınım özelliklerinde ve artan sertlik sayesinde mekanik özelliklerde değişime neden olur. Nem miktarının artması  $T_g$ 'yi daha düşük bir değere taşır, böylece aynı sıcaklıkta ve daha düşük ( $T-T_g$ ) sıcaklığında depolanan örnekler için nem miktarının artırılmasıyla yapısal gevşeme camsı geçişte gerçekleştirilir (41). Bu hareketlere ek olarak, eğer karışım hem polimer hem de daha küçük çözünen ve gaz molekülleri içeriyorsa, daha sonra camsı yapı içerisinde ötelenme hareketleri de gözlenmiş olur. Camsı yapının içerisindeki gaz moleküllerinin ötelenme difüzyonu önemli boyutlardadır ( $10^{-10}$  ve  $10^{-16}$  m<sup>2</sup>/s) (42, 43).

### **Moleküler Hareketlilik ve $T_g$**

Moleküler hareketlilik, doku gibi fiziksel özellikleri ve kristalizasyon hızı, reaksiyon hızı, çözünenin difüzyonu gibi kimyasal süreçleri değiştirebilmektedir.  $T_g$ , gıda dayanıklılığında gösterge sıcaklığı olarak düşünülür ve camsı geçişte suyun plastikleştirici etkisini gösterir.  $T_g$ 'nin makroskopik boyuttaki fiziksel özelliklerin kontrolü ve tahmin edilmesinde kullanılabileceği düşünülürken moleküler düzeyde hangi olayların gerçekleştiğinin incelenmesi gerekmektedir (31).

$T_g$  matriksteki moleküllerin bireysel olarak gerçekleştirdiği ötelenme hareketini gösterir. Camsı geçiş sıcaklığı  $T_g$ 'nin altında katılar serttir çünkü moleküller kısıtlı dönme hareketleri ve titreşimler yapar ve  $T_g$ 'nin üzerinde, amorf katılar ötelenme hareketi sayesinde akış gösterir. Kompleks amorf matriksleri anlamak amacıyla devamlı amorf fazda olan moleküllerin bireysel ötelenme hareketlerinin incelenmesi gerektiği belirtilmektedir.  $T_g$ , gıdalarda difüzyon kısıtlı özelliklerin dayanıklılığı ve makroskopik gıda kalitesi ile güçlü bir bağlantıya sahiptir (17, 31).  $T_g$  belli difüzyon kısıtlı reaksiyonların dayanıklılığının tahmin edilmesinde kullanılmamalıdır çünkü  $T_g$ 'nin altındaki sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Bu reaksiyonlara örnek olarak, Maillard reaksiyonu, çikolatanın şekerlenmesi, kurutma sırasında gıdalarda meydana gelen topaklanma, ekmeğin bayatlaması, nem kaybı, enzimatik aktivite, yapının çökmesi ve hidroliz gösterilebilir (2, 17). Alt- $T_g$  gevşemeleri ve fiziksel değişimler alt- $T_g$  moleküler hareketliliğini inkâr edemediğimizi gösteren durumlardır. Bu inkâr örnek olarak hububat ürünlerinde  $T_g$  sonucunda meydana gelmeyen ancak dielektrik spektroskopide de gösterildiği gibi camsı geçiş durumunda moleküler hareketliliğin yeniden organize olmasından kaynaklanan çıtırılık kaybı gösterilebilir (2). Dondurularak kurutulmuş protein örneklerinin dayanıklılığının amorf farmasötiklerde  $T_g$ 'den çok moleküler hareketliliğe bağlı olduğu gösterilmiştir (44). Dinamik geçişler, moleküllerin bölgesel titreşimsel hareketlerinin göstergesi olarak sentetik polimerlerde  $T_g$ 'nin altında gözlenmiştir. Bu çalışmalar, gıda sistemlerinde önemli yere sahip kalite ölçütleri, kimyasal reaktivite, moleküler difüzyon, doku, kristalizasyon hakkında bilgi sağlamaktadır. Camsı geçişin,  $T_g$ 'de meydana gelen makroskopik boyuttaki değişikliklere odaklanması gıdadaki fiziksel ve kimyasal değişikliklerin kaynağı olan heterojen yapının önemini göz ardı ettiğini göstermektedir. Amorf gıdalar homojen sıcaklık ve su aktivitesinde olsa bile farklı durumlarda (camsı, plastik kristal ya da sıvı) nanometreden santimetreye değişen farklı uzunluklarda yapısal elementlerle karmaşık bir

yapı gösterip farklı yapı ve oranlarda protein, karbonhidrat ve yağ içermektedir. Her bölge kalite, doku ve dayanıklılık gibi makroskopik gıda parametreleri üzerinde etki gösterecek farklı moleküler hareketliliğe sahiptir. Makro moleküllerin etkilediği kadar, camsı geçiş ve bağlı olan bir gevşeme pek çok onlu karbon atomunu içeren kademeli hareketlerin beraberinde gerçekleşir. Bu hareketler yaklaşık 300-500 kJ/mol görünür aktivasyon enerjisine sahip kooperatif hareketlerdir.  $T_g$ 'nin üzerinde genlik, frekans ya da hareketlerin hızı sıcaklığa duyarlılıktaki gibi artış gösterir. Moleküler zincir elastikiyetindeki bu belirgin değişiklik materyalin reolojik davranışında meydana gelen önemli değişiklikler (şekil değiştirebilme, akış davranışı ya da kırılma oluş biçimi gibi) eşliğinde oluşmaktadır. Poroz matriksin çökmesi ya da yapışkanlık gibi süreçler camsı geçişin sonuçlarıdır.

### Sonuç ve Öneriler

Su aktivitesinin bir fonksiyonu olarak çizilen su miktarı ve camsı geçiş grafikleri su aktivitesi ve camsı geçiş arasındaki ilişkinin görülmesinde kullanılabilir. Durum diyagramları aynı zamanda Brunauer-Emmet-Teller (BET) tek katman ve camsı geçiş eğrilerini içeren su aktivitesi ve camsı geçiş kavramlarını kombine etmektedir. Reaktantların hareketliliği verilen reaksiyonun gerçekleşip gerçekleşmeyeceğini belirler. Nükleer manyetik rezonans (NMR) ve elektron spin rezonans (ESR) spektroskopisi ile ölçülen su hareketliliği ilginç bir şekilde su aktivitesi ve camsı geçiş konseptinin gıdanın gerçek kompleks yapısının/doğasının sadece basitleştirilmiş birer yansımaları olabileceğini göstermektedir. Pek çok araştırmacıya göre bu hareketlilik kavramı özellikle su aktivitesi ya da camsı geçişin açıklamada yetersiz kaldığı süreçler için gıda dayanıklılığının kompleksliğini net bir şekilde açıklamada kullanılabilir. Ancak, şu ana kadar su aktivitesi ya da camsı geçiş kavramı ile hareketlilik kavramı arasında bağlantı kurmak empirik yaklaşımlar ötesinde birer zorluk oluşturmuştur.

## KAYNAKLAR

1. Rahman MS. 2010. Food stability determination by macro–micro region concept in the state diagram and by defining a critical temperature. *J Food Eng*, 99, 402-416.
2. Champion D, Le Meste M, Simatos D. 2000. Towards an improved understanding of glass transition and relaxations in foods: molecular mobility in the glass transition range. *Trends Food Sci Tech*, 11, 41-55.
3. Roudaut G, Simatos D, Champion D, Contreras-Lopez E, Le Meste M. 2004. Molecular mobility around the glass transition temperature: a mini review. *Innov Food Sci Emerg*, 5, 127-134.
4. Acevedo NC, Schebor C, Buera P. 2008. Non-enzymatic browning kinetics analysed through water–solids interactions and water mobility in dehydrated potato. *Food Chem*, 108 (3), 900-906.
5. Schmidt SJ. 2004. Water and solids mobility in foods. *Adv Food Nutr Res*, 48, 1-101.
6. Buitink J, Leprince O. 2004. Glass formation in plant anhydrobiotes: survival in the dry state. *Cryobiology*, 48, 215-228.
7. Slade L, Levine H. 1995. Glass transitions and water–food structure interactions. *Adv Food Nutr Res*, 38, 103-179.
8. McFetridge J, Rades T, Lim M. 2004. Influence of hydrogenated starch hydrolysates on the glass transition and crystallization of sugar alcohols. *Food Res Int*, 37, 409-415.
9. Rahman MS, Al-Zakwani I, Guizani N. 2005. Pore formation in apple during air drying as a function of temperature and pore size distribution. *J Sci Food Agr*, 85 (6), 979-989.
10. Rahman MS, Al-Amri OS, Al-Bulushi IM. 2002a. Pores and physico-chemical characteristics of dried tuna produced by different methods of drying. *J Food Eng*, 53, 301-313.
11. Bell LN, White KL. 2000. Thiamin stability in solids as affected by the glass transition. *J Food Sci*, 65 (3), 498-501.
12. Vasquez C, Diaz-Calderona P, Enrione J, Matiacevich S. 2013. State diagram, sorption isotherm and color of blueberries as a function of water content. *Thermochim Acta*, 570, 8-15.
13. Ostrowska-Ligeza E, Gorska A, Wirkowska M, Koczon P. 2012. An assessment of various powdered baby formulas by conventional methods (DSC) or FT-IR spectroscopy. *J Therm Anal Calorim*, 110, 465-471.
14. Xin Y, Zhang M, Adhikari B. 2013. Effect of trehalose and ultrasound-assisted osmotic dehydration on the state of water and glass transition temperature of broccoli (*Brassica oleracea L. var. botrytis L.*). *J Food Eng*, 119, 640-647.
15. Suresh S, Guizani N, Al-Ruzeiki M, Al-Hadhrani A, Al-Dohani H, Al-Kindi I, Rahman MS. 2013. Thermal characteristics, chemical composition and polyphenol contents of date-pits powder. *J Food Eng*, 119, 668-679.
16. Martin DR, Ablett S, Sutton M, Sahagian ME. 1999. Diffusion of aqueous sugar solutions as affected by locust bean gum studied by NMR. *J Food Sci*, 64, 46-49.
17. Fennema OR (ed). 1996. *Food Chemistry*. Marcel Dekker, Inc., New York, pp. 17-94.
18. Yoshioka S, Aso Y. 2007. Correlations between molecular mobility and chemical stability during storage of amorphous pharmaceuticals. *J Pharm Sci*, 96, 960-981.
19. Hill JJ, Shalaev EY, Zografu G. 2005. Thermodynamic and dynamic factors involved in the stability of native protein structure in amorphous solids in relation to levels of hydration. *J Pharm Sci*, 94, 1636-1667.
20. Lukasik KV, Ludescher RD. 2006a. Effect of plasticizer on dynamic site heterogeneity in cold-cast gelatin films. *Food Hydrocoll*, 20, 88-95.
21. Lukasik KV, Ludescher RD. 2006b. Molecular mobility in water and glycerol plasticized cold- and hot-cast gelatin films. *Food Hydrocoll*, 20, 96-105.
22. Lukasik KV, Ludescher RD. 2004. Erythrosin B phosphorescence as a probe of oxygen diffusion in amorphous gelatin films. *Food Hydrocoll*, 18, 621-630.
23. Pravinata LC, You Y, Ludescher RD. 2005. Erythrosin B Phosphorescence Monitors Molecular Mobility and Dynamic Site Heterogeneity in Amorphous Sucrose. *Biophys J*, 88, 3551-3561.

24. Shirke S, Ludescher RD. 2005. Molecular mobility and the glass transition in amorphous glucose, maltose, and maltotriose. *Carbohydr Res*, 340, 2654-2660.
25. You YM, Ludescher RD. 2006. Phosphorescence of erythrosin B as a robust probe of molecular mobility in amorphous solid sucrose. *Appl Spectrosc*, 60, 813-819.
26. Nack TJ, Ludescher R. 2006. Molecular Mobility and Oxygen Permeability in Amorphous Bovine Serum Albumin Films. *Food Biophys*, 3 (1), 151-162.
27. Sundaresan KV, Ludescher RD. 2008. Molecular mobility and oxygen permeability in amorphous Beta-lactoglobulin films. *Food Hydrocoll*, 22 (3), 403-413.
28. Shelke K. 2006. Tiny, Invisible, Ingredients. *Food Processing*, 42-45.
29. Tiwari RS, Ludescher RD. 2010. Vanillin phosphorescence as a probe of molecular mobility in amorphous sucrose. *J Fluoresc*, 20 (1), 125-133.
30. Rahman MS. 2004. State diagram of date flesh using differential scanning calorimetry (DSC). *Int J Food Prop*, 7 (3), 407-428.
31. Ludescher RD, Shah NK, McCaul CP, Simon KV. 2001. Beyond T<sub>g</sub>: optical luminescence measurements of molecular mobility in amorphous solid foods. *Food Hydrocoll*, 15, 331-339.
32. Huang Y, Davies E, Lillford P. 2011. Effect of Solutes and Matrix Structure on Water Mobility in Glycerol- Agar-Water Gel Systems: A Nuclear Magnetic Resonance Approach. *J Agric Food Chem*, 59, 4078-4087.
33. Picouet PA, Sala X, Garcia-Gil N, Nolis P, Colleo M, Parella T, Arnau J. 2012. High pressure processing of dry-cured ham: Ultrastructural and molecular changes affecting sodium and water Dynamics. *Innovat Food Sci Emerg Tech*, 16, 335-340.
34. Aschenbrenner M, Kulozik U, Först P. 2011. The role of the glassy state in production and storage of freeze-dried starter cultures. *Procedia Food Sci*, 1, 347-354.
35. Carini E, Curti E, Littardi P, Luzzini M, Vittadini E, 2013. Water dynamics of ready to eat shelf stable pasta meals during storage. *Innovat Food Sci Emerg Tech*, 17, 163-168.
36. Baranowska HM. 2011. Water Molecular Properties in Forcemeats and Finely Ground Sausages Containing Plant Fat. *Food Biophys*, 6, 133-137.
37. Li S, Dickinson LC, Chinachoti P. 1998. Mobility of "unfreezable" and "freezable" water in waxy corn starch by 2H and 1H NMR. *J Agr Food Chem*, 46, 62-71.
38. Hills BP, Pardoe K. 1995. Proton and deuterium NMR studies of the glassy transition in a 10% water-meltose solution. *J Mol Liq*, 63, 229-237.
39. Tanner SF, Hills BP, Packer R. 1991. Interactions of sorbed water with starch studied using proton nuclear magnetic resonance spectroscopy. *J Chem Soc, Faraday Trans*, 87, 2613-2621.
40. Cherian G, Chinachoti P. 1996. 2H and 17O nuclear magnetic resonance study of water in gluten in the glassy and rubbery state. *Cereal Chem*, 73, 618-624.
41. Perera DY. 2002. Effect of thermal and hygroscopic history on physical ageing of organic coatings. *Prog Org Coat*, 44 (1), 55-62.
42. Tiemblo P, Guzman J, Riande E, Mijangos C, Reinecke H. 2001. Effect of physical aging on the gas transport properties of PVC and PVC modified with pyridine groups. *Polymer*, 42 (11), 4817-4824.
43. Schoonman A, Ubbink J, Bisperink C, Le Meste M, Karel M. 2002. Solubility and diffusion of nitrogen in maltodextrin protein tablets. *Biotechnol Prog*, 18, 139-154.
44. Champion D, Hervet H, Blond G, Le Meste M, Simatos D. 1997. Translation diffusion in sucrose solutions in the vicinity of their glass transition. *J Phys Chem B*, 10, 10674-10679.