



Anadolu Reoloji Derneği

GIDALARIN YAPI-FONKSİYON İLİŞKİLERİ ve REOLOJİ ÇALIŞTAYI



Düzenleyenler:

Prof. Dr. Filiz Altay

Prof. Dr. Ömer Said Toker

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ, DAVUTPAŞA YERLEŞKESİ, KİMYA-METALURJİ FAKÜLTESİ
KONFERANS SALONU, 15 EKİM 2025

KURUMSAL ÜYEMİZ ANAMED&ANALİTİK GRUP'UN KATKILARIYLA



ANAMED & ANALİTİK GRUP
ANALİTİK ÇÖZÜMLERDE GÜVENCENİZ

Düzenleme Komitesi

Prof. Dr. Filiz Altay (İstanbul Teknik Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü)

Prof. Dr. Ömer Said Toker (Yıldız Teknik Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü)

Bilimsel Komite (alfabetik sırayla)

Prof. Dr. Filiz Altay

Prof. Dr. Ömer Said Toker

Prof. Dr. Salih Karasu (Yıldız Teknik Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü)

Prof. Dr. Tülay Özcan (Uludağ Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü)

Katılımcıların bağılı olduğı üniversite ve kuruluşlar

Akdeniz Üniversitesi, Gıda Mühendisliğı Bölümü

Akkim Kimya

Alterna Gıda (Züber)

Anamed&Analitik Grup

Ankara Üniversitesi, Gıda Mühendisliğı Bölümü

Azelis

Bezmialem Üniversitesi, Eczacılık Teknolojisi Bölümü

İstanbul Üniversitesi

İstanbul Teknik Üniversitesi, Gıda Mühendisliğı Bölümü

Lactalis-İçim Süt

Microlab Teknik Cihazlar Tic. Ltd. Şti.

Namık Kemal Üniversitesi, Gıda Mühendisliğı Bölümü

Namet Gıda

Natura Gıda (Golf dondurma)

Northstar Innovation, Yıldız Holding

Optimum Gıda

Polen Un ve Gıda Katkı Madd. San. Ve Tic. A.Ş.

Şölen Çikolata Gıda San. ve Tic. A.Ş.

Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Gıda Mühendisliğı Bölümü

Ulusal Gıda Referans Laboratuvar Müdürlüğü, Tarım ve Orman Bakanlığı

Yıldız Teknik Üniversitesi, Gıda Mühendisliğı Bölümü

GIDALARIN YAPI-FONKSİYON İLİŞKİLERİ ve REOLOJİ ÇALIŞTAYI

İÇERİK

Önsöz

Prof. Dr. M. Reza Nofar, Dernek Başkanı

Açılış Konuşması

Anadolu Reoloji Derneği'nin Kuruluşu ve Tanıtımı

Sözlü Sunumlar

Gıdalarda Temel Reoloji Uygulamaları

Prof. Dr. Filiz Altay, İstanbul Teknik Üniversitesi

Gıda Formülasyonlarında Reolojik Ölçüm Teknikleri

Özge Zambakoğlu, Anamed&Analitik Grup

Fırıncılık Dolgularında Reoloji ve Hidrokolloidlerin Rolü

Dr. Saniye Öztürk, Azelis

Gıda Reolojisi-Yenilikçi Uygulamalar

Prof. Dr. Ömer Said Toker, Yıldız Teknik Üniversitesi

Reoloji Biliminin Endüstriye Üretim, Verimlilik ve Finansal Katkıları

Cengiz Altop, Yıldız Holding Northstar Innovation

Kapanış sözü

Poster Sunumları

Çay atığı mikroenkapsülleri kullanılarak 3D yazıcı ile elde edilen sebze püresi formülasyonlarının optimizasyonları

Merve Başlı¹, Yaşar Özlem Alifakı², İrem Sude Doğru¹, Özge Şakıyan Demirkol¹, Kezban Candoğan¹ (¹Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü, ²Ulusal Gıda Referans Laboratuvar Müdürlüğü, Tarım ve Orman Bakanlığı)

Bitkisel protein konsantrelerinin bisküvi hamuru reolojisine etkisi

Ömer Faruk Çetin, Şölen Çikolata Gıda San. ve Tic. A.Ş.

Sürdürülebilir ambalajlarda “flexible” kağıt yapılar ve lak kaplamalar ile geliştirilmiş bariyer özellikleri

Mehmet Erbaş, Şölen Çikolata Gıda San. ve Tic. A.Ş.

Farklı pH düzeylerindeki kakao tozlarının bitter çikolata reolojisine duyuşal değerdendirmelere etkisi

Yaren Doğan, Polen Un ve Gıda Katkı Madd. San. Ve Tic. A.Ş

Kendini onarma (self-healing) özelliğı gösteren biyopolimerlerin reolojik yaklaşımlar ile değerdendirilmesi

Rukiye Yiğit, Elif Alakaş, Filiz Altay (İstanbul Teknik Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü)

ÖNSÖZ

Saygıdeğer Meslektaşlarım ve Değerli Çalıştay Katılımcıları,

Anadolu Reoloji Derneği (ARD) adına sizlere bu e-kitapçığın önsözünü sunmaktan büyük mutluluk duyuyorum. Derneğimizin kuruluş sürecinden bu yana, reoloji biliminin Türkiye’de tanıtılması, yaygınlaştırılması ve uygulamalı olarak güçlendirilmesi yönündeki kararlılığı hepimiz için bir pusula olmuştur. Misyonumuz, “reoloji bilimi alanındaki bilgi birikimini artırmak ve paylaşmak, sektörel uygulamalara yenilikçi çözümler sunmak ve bilimsel çalışmalara destek vererek Türkiye’nin bu konuda uluslararası alandaki yerini güçlendirmek”tir, derneğimizin vizyonu ise, “reoloji biliminin Türkiye’deki en önemli bilgi ve iş birliği platformu haline gelmek” şeklindedir.

Bu ilk çalıştayın amacı da tam olarak bu doğrultudadır: özellikle gıda sektörü ve gıda reolojisiyle yakından ilgilenen ve çalışan akademisyenleri, endüstri temsilcilerini, genç araştırmacıları ve öğrencileri bir araya getirip, bilgi paylaşımı, deneyim aktarımı ve iş-birliği fırsatlarını çoğaltmaktır. Bu e-kitapçık, çalıştayımızda ele alınacak sunumlar, tartışmalar, çıkan sonuçlar ve ileriye dönük öneriler için bir belge olarak hazırlanmıştır. Katılımcılarımızın değerli katkılarıyla, özellikle gıda sektörü ve gıda reoloji biliminin çeşitli uygulama alanlarında yaşanan gelişmeleri, karşılaşılan zorlukları ve çözüm önerilerini birlikte keşfedeceğiz. Ayrıca genç araştırmacıların vizyonlarını genişletmek, endüstrinin ihtiyaçlarını bilimsel yaklaşımlarla buluşturmak ve bu bağlamda ulusal/uluslararası düzeyde iş birliği ağlarını güçlendirmek temel hedeflerimizdendir.

Bu yolculukta emeği geçen her kese, özellikle bu çalıştayın gerçekleştirilmesinde büyük rolü olan, dernek yönetim kurulu üyemiz Sayın Prof. Dr. Filiz Altay’a ve Eğitim-Seminer ve Çalıştay Komisyonu üyemiz Sayın Prof. Dr. Ömer Said Toker’e, Northstar Innovation CEO’su Sayın Cengiz Altop’a, kurumsal üyemiz Anamed&Analitik Grup’a, konuşmacılarımıza, destek veren kurumlara ve en önemlisi katılım gösteren siz değerli çalışma arkadaşlarımıza teşekkür ederim. Hep birlikte, reoloji biliminin Türkiye’de hakkettiği yere ulaşmasına katkıda bulunacağımıza yürekten inanıyorum. Son olarak, bu e-kitapçığın yalnızca bir doküman değil; ileriye dönük çalışmalarımıza rehberlik edecek bir başvuru kaynağı olmasını temenni ediyorum. Sizlerin düşünce, öneri ve katkıları, çalışma alanımızın zenginleşmesi açısından büyük değer taşıyacaktır.

Bilimle, dayanışmayla, yenilikle...

Saygılarımla,

Prof. Dr. M. Reza Nofar

Anadolu Reoloji Derneği Başkanı

15.10.2025

SÖZLÜ SUNUMLAR

Gıdalarda Temel Reoloji Uygulamaları

Prof.Dr. Filiz Altay

İstanbul Teknik Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Maslak, 34469, Sarıyer, İstanbul

Reolojinin Tanımı ve Kapsamı

Reoloji, maddelerin **akış** ve **deformasyon** davranışlarını inceleyen bilim dalıdır. Bu disiplin hem sıvıların viskoz akış özelliklerini hem de yarı katı/katı malzemelerin gerilme altında şekil değiştirme özelliklerini kapsar. Terimin kökeni Eski Yunanca *rheos* ("akış") sözcüğüne dayanır; İ.Ö. 500'lerde yaşamış filozof Herakleitos'un ünlü "*panta rhei*" ("her şey akar") deyişi de buradan gelir. *Rheology* terimi modern anlamda ilk kez 1920'lerde Bingham tarafından bilim literatürüne kazandırılmıştır. Gıda reolojisi özellikle gıda ürünlerine uygulanan kuvvetler sonucunda meydana gelen akışkanlık ve yapısal değişimleri inceler; bu hem sıvı gıdalar hem de yarı katı sistemler için geçerlidir.

Reolojik davranışların zaman ölçeğine bağlı olarak değişebileceği unutulmamalıdır. Bu bağlamda tanımlanan **Deborah sayısı**, malzemenin karakteristik *gevşeme süresinin* (*relaxation time*) uygulanan gerilmenin gözlem süresine oranıdır. Deborah sayısı büyük olduğunda (malzemenin gevşeme süresi gözlem süresinden çok uzun ise) malzeme gözlenen zaman ölçeğinde *katı gibi davranır*; tersi durumda (De sayısı küçük ise) malzeme *sıvı gibi davranır*. Herakleitos'un "her şey akar" ifadesi de aslında yeterli süre tanındığında tüm malzemelerin akabileceğini ima eder. Kısacası, reolojik davranışın değerlendirilmesinde malzemenin iç yapısının ve gözlem süresinin önemini vurgulayan Deborah sayısı, viskoelastik malzemelerin katımsı veya akışkan gibi davranacağını öngörmemizi sağlar. Bir malzeme farklı sıcaklık, basınç ve gözlem sürelerinde farklı davranış gösterebileceğinden, malzemeler değil reolojik davranışlar sınıflandırılır.

Viskozite ve Newton'un Viskozite Kanunu

Bir akışkanın **viskozitesi** onun akmaya karşı gösterdiği direnç olup akışkanın "kıvamını" nicel olarak ifade eden bir özelliktir. Viskozitenin birimi SI sisteminde Pascal-saniye (Pa·s) olup, günlük hayattan örneklerle; su gibi düşük viskoziteli sıvılar kolay akar, bal veya tahin gibi yüksek viskoziteli sıvılar ise akmaya daha fazla direnç gösterir ve yavaş akar. Reolojide viskoz

akış, **kayma gerilmesi** (τ , birimi Pa) ve **kayma hızı** ($\dot{\gamma}$, birimi 1/s) kavramlarıyla tanımlanır. Isaac Newton, ideal akışkanlar için bu iki nicelik arasındaki ilişkiyi doğrusal olarak ifade eden viskozite kanununu tanımlamıştır. **Newton'un viskozite kanunu**'na göre kayma gerilmesi, kayma hızına bağlı olup orantı katsayısı akışkanın viskozitesidir:

$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

burada μ mutlak viskozite değerini temsil eder. Bu denkleme uyan akışkanlara **Newtonyen akışkan** denir. Newtonyen akışkanda uygulanan kayma gerilimi ile oluşan kayma hızı doğrusal bir ilişki gösterir, yani viskozite sabittir (sabit sıcaklıkta). Örneğin su, etil alkol, bitkisel yağlar ve bal gibi bazı akışkanlar ortam sıcaklıklarında Newtonyen davranış sergiler; bunlarda viskozite, akış koşullarından bağımsızdır ve yalnızca sıcaklığa bağlı olarak değişir. Newtonyen akışkanların akış eğrisi (τ - $\dot{\gamma}$ grafiği) orijinden geçen düz bir doğrudur.

Newtonyen Olmayan Akışkanlar

Gıdaların çoğu, Newtonyen modelden sapma gösterir. **Newtonyen olmayan akışkanlar**, uygulanan gerilme ile elde edilen kayma hızı (deformasyon hızı) arasındaki ilişki doğrusal olmayan veya viskozitenin sabit olmadığı sistemlerdir. Bu akışkanların viskozitesi sabit bir değer olmayıp, akış koşullarına (kayma hızına veya zamana) bağlı olarak değişkenlik gösterir. Newtonyen olmayan davranışlar iki ana gruba ayrılabilir: (1) *Zamana bağlı olmayan* akış davranışları ve (2) *zamana bağlı* akış davranışları.

Zamana bağlı olmayan Newtonyen olmayan akışkanlar için viskozite, uygulanan anlık kayma hızına bağlıdır (fakat zamanın fonksiyonu değildir). Bu gruptaki başlıca akışkan tipleri şöyledir:

- **Psödoplastik akışkan:** Uygulanan kayma hızı arttıkça viskozitesi azalan akışkan tipidir. Bir başka deyişle, akışkan hızlandıkça “incelir” ve akmaya karşı direnci azalır. Birçok polimer çözelti, polimer eriyiği ve gıda ürünleri psödoplastik davranış sergiler. Örneğin ketçap, yoğurt, tahin gibi maddeler yüksek kayma hızlarında daha akışkan hale gelir (düşük kesme hızında viskoz, fakat karıştırıldığında inceliyor). Bu davranış, moleküler yapıların veya parçacıklar arası bağların uygulanan gerilme altında kısmen çözülmesiyle ilgilidir.

- **Dilatant akışkan:** Viskozitesi kesme hızı arttıkça artan (akmaya karşı direnci artan) akışkanlardır. Seyrek rastlanan bir davranış olsa da, nişasta süspansiyonları (örn. su içinde mısır nişastası karışımı) dilatant akışa klasik örnektir: yavaş karıştırıldığında akışkan gibi davranan bu karışım, hızlı bir kuvvet uygulandığında katılaşır ve çok daha yüksek viskozite sergiler. Katı madde içeriği yüksek olan bazı hamurlar veya kum-su karışımları da dilatant özellik gösterebilir.
- **Plastik akışkan (Bingham tipi):** Belirli bir *akma gerilmesi* eşiği altında akışa direnç gösterip deformasyona uğrasa da akmaz, bu eşiğin üzerinde ise akışkan gibi akmaya başlayan malzemelerdir. **Bingham plastik** adı verilen ideal modelde, akma gerilimi aşıldıktan sonra sabit bir viskoziteyle (doğrusal bir eğimle) akış gerçekleşir. Ketçap, diş macunu, domates salçası ve bazı boyalar bu kategoriye giren örneklerdir – örneğin diş macunu tüpte dururken akmaz (bir katı gibi formunu korur) fakat yeterli basınç uygulanınca birden akmaya başlar. Gerçek sistemler Bingham modelinden sapabilir; *Herschel-Bulkley modeli* gibi modeller akma gerilimi yanı sıra kesme incelmesi davranışını da birlikte tanımlayabilir.

Newtonyen olmayan akışkanların ayrıntılı reolojik karakterizasyonu için genellikle **akış eğrileri** (τ - $\dot{\gamma}$ grafikleri) ve **viskozite eğrileri** (η - $\dot{\gamma}$ grafikleri) çizilir. Bu eğriler, akışkanın farklı deformasyon hızlarındaki viskozite davranışını ortaya koyar. Özellikle gıda sistemlerinde pek çok sos, püre, emülsiyon ve hamur, psödoplastik veya plastik davranış göstererek üretim ve uygulama süreçlerinde belirgin reolojik etkiler yaratır. Örneğin, mayonez ve salata sosu gibi emülsiyonlar düşük kayma gerilmelerde formunu korurken (örneğin salata üzerinde durabilme), karıştırma veya çalkalama ile akışkan hale gelirler; bu sayede hem raf stabilitesi sağlanır hem de kullanım sırasında istenen akışkanlık elde edilir.

Akma Gerilmesi (Yield Stress)

Bazı akışkanlar, akışa başlamadan önce belirli bir gerilme seviyesine ihtiyaç duyarlar. **Akma gerilmesi** bu malzemelerin akmaya başlaması için gerekli olan en düşük gerilme değerini ifade eder. Bir başka deyişle, malzeme üzerine uygulanan kesme gerilimi akma eşiğinin altında kaldığı sürece madde **katı gibi davranır** – şekil değiştirir ama sürekli bir akış görülmez. Gerilim bu kritik eşiği aştığında ise madde **akışkan gibi akmaya başlar**. Akma gerilmesi olgusunu günlük hayattan ketçap örneği ile açıklayabiliriz: Şişeyi ters çevirdiğimizde ketçap hemen

dökülmez. Şişeye bir vurma veya sarsma ile yeterli gerilim uygulanınca birden akmaya başlar. Ketçapın şişede durup bir anda akmaya başlaması, onun akma gerilimli bir akışkan olduğunun göstergesidir (tıpkı diş macunu gibi).

Akma gerilmesi, akışkanın mikroyapısındaki zayıf bağların bir arada tuttukları bir yapı (jel ağı gibi) oluşturmamasından kaynaklanabilir. Düşük gerilmelerde bu yapı malzemeye elastik bir katılık verir. Örneğin dinlenme halindeki ketçap veya mayonez gibi soslarda, polimer zincirleri veya parçacıklar arası etkileşimlerle oluşmuş bir ağ yapısı vardır ve bu yapı akma geriliminin altında malzemeyi jölemsi/yarı katı şekilde tutar. Uygulanan gerilim akma eşiğini aştığında ise ağ yapısı kırılır, çözülür ve sıvı gibi akış başlar.

Reolojik Davranışların Zamana Göre Sınıflandırılması

Yukarıda ele alınan Newtonyen olmayan akışkan davranışlarında, malzemenin viskozitesi sadece o andaki deformasyon hızına bağlıydı ve zamana bağlı bir etki yoktu. Oysa bazı akışkanlarda viskozite, uygulanan gerilimin süresine bağlı olarak da değişebilir. Bu durumda **zamana bağlı reolojik davranışlar** ortaya çıkar. Sabit bir kayma hızında malzemenin viskozitesi zamanla değişiyorsa, malzeme zamana bağlı bir akış davranışı sergilemektedir. Zamana bağlı davranışlar ikiye ayrılmaktadır:

- **Tiksotropi:** Malzemenin sabit bir deformasyon hızında viskozitesinin zamanla azalması ve yapı bozucu etki kalktıktan sonra viskozitenin yavaş yavaş başlangıç değerine geri dönmesidir. Bir tiksotropik akışkan, uygulanan kesme kuvvetiyle mikro yapısında kademeli bir çözülme yaşar; bu yüzden viskozitesi akış süresiyle birlikte düşmeye devam eder. Kesme kuvveti kaldırıldığında ise kırılan yapı zamanla yeniden oluşmaya başlar ve akışkan orijinal kıvamını geri kazanır. Örnek olarak ketçap, salata sosları, yoğurt, krema, jel ve çeşitli süspansiyonlar tiksotropik davranış sergiler.
- **Reopekti (anti-tiksotropi):** Tiksotropinin tersine, sabit deformasyon hızında viskozitenin zamanla artması durumudur. Akışkan, kesme kuvveti uygulanmaya devam ettikçe “kıvamlı olmaya” başlar ve akmaya karşı direnci giderek yükselir. Bu davranış oldukça nadir gözlenir. Bazı yoğun süspansiyonlar veya yapısal jeller uzun süre karıştırıldığında başlangıçta akışkan iken zamanla daha kıvamlı hale gelebilir. Reopektik akışkanlarda yapı, gerilim altında zamanla daha düzenli veya güçlü hale gelir, bu da viskozite artışı şeklinde gözlenir.

Tiksotropik ve reopektik davranışlar, gıda sistemlerinde formülasyona bağlı olarak ortaya çıkabilir. Gıdalarda en sık rastlanan zaman etkisi tiksotropidir.

Tiksotropi gıda üretiminde istenen veya istenmeyen sonuçlar doğurabilir. Örneğin salça, yoğurt gibi ürünlerde üretim sırasında uygulanan karıştırma veya pompalama gibi işlemler viskoziteyi düşürür, bu dolum ve taşıma işlemlerini kolaylaştırır; ancak son üründe raf beklemesinde ürünün yeterli kıvamı geri kazanması beklenir (akış olmadan durabilmesi için). Uygun formül ve stabilizatörler ile tiksotropik davranış kontrol edilerek proses ve nihai ürün kalitesi istenile şekilde ayarlanabilir.

Tiksotropi ve Akma Davranışı

Reolojide *akma gerilimi* (yield stress) kavramı ile *tiksotropi* bazen karıştırılabilir, ancak bunlar farklı olgulardır. **Akma gerilimi**, yukarıda belirtildiği gibi malzemenin bir gerilim eşiğine kadar akmaması olgusudur. Bu tamamen anlık ve gerilim büyüklüğüyle ilgili bir durumdur.

Tiksotropi ise akış sırasında zamanla ortaya çıkan bir yapısal gevşeme sürecidir – malzeme akmaya başladıktan sonra, akış devam ettikçe iç yapısının daha fazla çözülmesine bağlı olarak viskozitenin düşmeye devam etmesidir.

Bir malzeme akma gerilimi gösterebilir, tiksotropik olabilir ya da her ikisini birden sergileyebilir. Ketçap bu duruma iyi bir örnektir: Ketçap hem bir akma gerilimi eşiğine sahiptir hem de tiksotropiktir. Şişe içinde uzun süre bekleyen ketçap koyu ve jeldir. Önce şişeye vurularak akma eşiği aşılır, ketçap akmaya başlar; akış devam ettikçe viskozitesi daha da düşer ve incelir (tiksotropi). Ketçapı tabağa döktükten sonra bir süre beklerseniz kısmen koyulaştığını fark edebilirsiniz – dinlenme halinde yapı yeniden kurulmaya başlamıştır.

Mayonez, salça, çikolatalı krema gibi ürünler de benzer şekilde hem akma sınırı hem de zamana bağlı incelme sergileyebilir. Her iki davranışın da anlaşılması, özellikle kompleks gıda sistemlerinin formülasyonunda ve işlenmesinde kritik öneme sahiptir.

Viskoelastik Ölçümler ve Viskoelastik Gıdalar

Bir malzemenin tamamen elastik bir katı ya da tamamen viskoz bir sıvı olması reolojik uç noktalardır; gerçekte gıdalar başta olmak üzere çoğu materyal bu iki uç davranış arasında, **viskoelastik** özellikler sergiler. **Viskoelastisite**, aynı malzemenin hem elastik (katı benzeri) hem de viskoz (sıvı benzeri) özellikler gösterebilmesi anlamına gelir. Bir viskoelastik malzeme

üzerine kuvvet uygulandığında kısmen bir katı gibi depolayıcı tepki verir, kısmen de bir sıvı gibi akıcı tepki verir. Gıda maddelerinin birçoğu viskoelastiktir: örneğin yoğurt, peynir, hamur, puding, dondurma, et ürünleri gibi gıdalar ne tamamen sıvı gibi davranır ne de tamamen katı gibidir; bunların yapısında hem elastik bir yapı hem de akışkanlık mevcuttur.

Viskoelastik davranışı nicel olarak incelemek için reolojide genellikle **dinamik (osilasyon) testler** uygulanır. Bu testlerde malzemeye çok küçük genlikli, sinüs dalgası şeklinde değişen bir gerilme veya deformasyon uygulanır ve malzemenin buna verdiği tepki incelenir. Uygulanan gerilimin frekansı sabit tutularak, malzemenin vereceği cevapta **depolanan** ve **yitirilen** enerji bileşenleri ölçülür. Buradan tanımlanan iki temel reolojik parametre vardır:

- **Depolama modülü (G' , storage modulus):** Uygulanan deformasyon enerjisinin malzeme tarafından elastik olarak depolandığını gösteren parametredir. G' değeri yüksek ise malzeme daha çok **katı gibi** davranıyor demektir. Bir başka ifadeyle, elastik modül malzemenin esneklik ve yapısal sertlik derecesini gösterir. G' büyükse, malzeme üzerindeki şekil değişimi kaldırıldığında orijinal şekline önemli ölçüde geri dönebilecektir. Örneğin jel yapılı gıdalarda (jelatin jölesi, marmelat, pelte, peynir altı suyu jeli vb.) G' tipik olarak yüksektir.
- **Kayıp modülü (G'' , loss modulus):** Uygulanan deformasyon enerjisinin malzeme içinde viskoz dirençle yayılabilir olduğunu (ısıya veya iç sürtünmeye harcadığını) gösteren bir parametredir. G'' değeri yüksek ise malzeme daha çok **sıvı gibi** davranıyor demektir. G'' büyükse, malzeme uygulanan deformasyon kalktığında eski şekline pek dönemez. Örneğin bal, şurup gibi tamamen akışkan sıvılarda G'' değeri G' değerinden çok daha yüksektir; uygulanan bir şekil değişimi kalıcıdır.

Viskoelastik ölçümlerde tipik olarak malzemenin elastik ve viskoz modülleri birlikte değerlendirilir. Malzemeye küçük bir gerilim uygulanarak (doğrusal viskoelastik sınırlar içinde) **faz farkı (δ)** ölçülür: Uygulanan gerilme sinüs dalgası ile değişirken malzemenin verdiği deformasyon sinyali gerilme ile tam aynı fazda ise malzeme tamamen elastiktir ($\delta = 0^\circ$); eğer cevap 90° geride kalıyorsa tamamen viskozdur ($\delta = 90^\circ$). G' ve G'' değerleri bu faz farkından hesaplanır: örneğin δ küçükse ($\tan \delta = G''/G' < 1$) malzeme elastik karakterin baskın olduğu bir viskoelastik yapıya sahiptir; δ büyükse ($\tan \delta > 1$) viskoz karakter ağır basar. **$\tan \delta = G''/G'$** oranı, malzemenin daha katı-benzeri mi yoksa sıvı-benzeri mi olduğunun nicel bir göstergesidir. Çoğu gıdada $\tan \delta$ değeri 0 ile ∞ arasında bir yerde olup, malzemenin hem elastik hem viskoz kısımları olduğunu gösterir.

Viskoelastik gıdaların reolojik karakterizasyonunda **küçük genlikli osilasyon testleri (small amplitude oscillatory test-SAOS)** sıklıkla kullanılır. Bu testler malzemenin doğrusal viskoelastik sınırları içinde kalacak şekilde çok küçük deformasyonlar uygulanarak yapılır. Böylece malzemenin yapısını bozmadan G' ve G'' modülleri belirlenir ve ürünün viskoelastik profili ortaya konur.

Birçok gıda formülasyonu bileşenlerinin, reolojik davranışa hem elastik hem de viskoz katkıları bulunabilir. Hamur buna güzel bir örnektir: Buğday unundaki gluten proteinleri karıştırılıp su ile yoğrulduğunda esnek bir ağ yapısı oluşturur – bu ağ hamura *elastikiyet* kazandırır. Aynı hamurun içerdiği su ve diğer sıvı bileşenler ise hamurun viskoz akışkan bir faza sahip olmasını sağlar. Sonuçta hamur, hem elastik davranıp şekil verildiğinde şeklini geri kazanır, hem de yeterince uzun süre kuvvet uygulanınca akar, şekil değiştirir. Bir gıda formülasyonu için bu elastik/viskoz dengenin kontrolü ile istenen tekstür elde edilebilir: Örneğin fazla akışkan bir pudinge biraz daha jelatin veya nişasta ilave ederek elastik kısmı artırılabilir, ya da aşırı sert bir jöleye bir miktar sıvı bileşen ekleyerek viskoz kısmı artırılabilir.

Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Viskoelastik Bölgeler

Viskoelastik malzemelerin davranışı uygulanan deformasyon genliğine bağlı olarak değişebilir. **Doğrusal viskoelastik davranış**, malzemeye uygulanan deformasyonun çok küçük olduğu ve malzemenin iç yapısının bu deformasyonla bozulmadığı rejimdir. Bu bölgede malzemenin G' ve G'' modülleri uygulanan gerinim genliğinden bağımsızdır; başka bir deyişle, malzeme küçük deformasyonlara doğrusal orantılı tepki verir. Genlik ne kadar azaltılıp “küçük” tutulursa, ölçülen viskoelastik modüller malzemenin doğal (bozulmamış) halini o kadar temsil eder. Bu nedenle malzemelerin reolojik karakterizasyonunda önce uygun bir doğrusal viskoelastik bölge aralığı belirlenir.

Uygulanan deformasyon genliği arttırıldığında bir noktadan sonra malzemenin iç yapısı önemli ölçüde bozulmaya ve doğrusallık kaybolmaya başlar. Bu bölgeye **doğrusal olmayan viskoelastik (non-linear viscoelastic region)** bölge denir. Malzemelerin gerilme altında *gerinime bağımlı* hale geldiği bu durumda, G' ve G'' değerleri artık sabit kalmaz, deformasyon genliğine bağlı olarak değişir. Örneğin bir hamur örneği için düşük gerinimlerde G' ve G'' sabit iken, belirli bir kritik gerinimi aştıktan sonra G' düşmeye başlar (malzeme yumuşar), G'' ise artabilir veya farklı şekilde değişebilir – bu, yapının kırılmaya başladığının göstergesidir. Teknik

olarak, malzemelerin doğrusal olmayan bölgede verdiği tepkiyi incelemek için **büyük genlikli osilasyon testleri (large amplitude oscillatory test-LAOS)** uygulanır. LAOS testlerinde sinüzoidal deformasyon uygulanmaya devam edilir ancak genlik yüksek tutulur, böylece malzemenin yapısı bozulurken ortaya çıkan harmonikler ve karmaşık gerilme-şekil değişimi ilişkileri incelenir. LAOS analizleri, gıdaların yapısal dayanımını ve kopma davranışlarını anlamada faydalıdır.

Doğrusal ve doğrusal olmayan bölgelerin ayrımını belirlemek için tipik olarak bir **gerinim tarama testi** yapılır: Sabit bir frekansta, çok düşük deformasyonlardan başlanarak gerinim genliği kademeli artırılır ve G' ile G'' modüllerinin hangi noktada değişmeye başladığı kaydedilir. G' ve G'' 'nin sabit kaldığı aralık **doğrusal viskoelastik bölge (linear viscoelastic region-LVR)** olarak tanımlanır. Bu sınır aşıldıktan sonra modüllerin değişimi malzemenin yapısal mukavemetinin sınırlarına işaret eder. Örneğin bir peynir jeli için %0.1 deformasyona kadar G' sabit ise LVR buraya kadardır; %1 deformasyonda G' düşmeye başlıyorsa doğrusal olmayan viskoelastik bölgeye girilmiş demektir. Doğrusal olmayan bölgede malzemenin reolojik davranışı daha karmaşık olduğundan, LAOS verileri Fourier dönüşümleri ile analiz edilerek malzemenin yapısal karakteristiği (örneğin akma noktasından sonraki sertleşme veya yumuşama eğilimi, gerilme-şekil değiştirme eğrilerinin şekli vb.) incelenir. Viskoelastik davranışın doğrusal ve doğrusal olmayan rejimlerde anlaşılması, gıdaların işlenmesi sırasındaki performans tahminleri için kritiktir.

Dinamik Mekanik Testler ve Camsı Bölge

Reolojinin bir diğer uygulama alanı, malzemelerin sıcaklık değişimlerine bağlı mekanik davranışlarını incelemektir. **Dinamik mekanik analiz (dynamic mechanic analysis-DMA)** adı verilen testlerle, özellikle polimerik gıdaların ve bileşenlerin sıcaklığa bağlı viskoelastik geçişleri saptanabilir. Bu bağlamda en önemli geçişlerden biri **camsılığa geçiş sıcaklığı** (glass transition temperature- T_g)'dir. Camsılığa geçiş, şekilsiz (amorf) veya yarı kristal bir malzemenin düşük sıcaklıklarda bulunduğu sert ve kırılgan **camsı durumdan**, daha yüksek sıcaklıklarda yumuşak ve esnek **kauçuğumsu (leathery) duruma** geçiş yaptığı sıcaklık aralığını tanımlar. Bu bir ısıll yarı-hal değişimidir ve tam bir erime değildir; malzemenin yapısında moleküler hareketlilik belirli bir sıcaklık aralığında ani artış gösterir. Örneğin bir şekerleme ürünü veya cips gibi kuru gıdalar düşük sıcaklıklarda camsı halde (sert ve gevrek) bulunurken,

sıcaklık veya nem artışı ile T_g 'nin üzerine çıkarlarsa yumuşak ve bayat olarak algılanan bir duruma geçerler. Benzer şekilde dondurma, dondurulmuş gıdalar, kurutulmuş meyveler gibi ürünlerin depolama stabilitesi T_g ile yakından ilişkilidir; ürünün depolandığı sıcaklık T_g 'nin altında tutulursa gıda camsı katı halde kalarak yapışma, şekil bozulması gibi istenmeyen fiziksel değişimler engellenir.

Dinamik mekanik testlerle malzemenin G' ve G'' modüllerinin sıcaklığa bağlı değişimi ölçülerek camsılığa geçiş tespit edilebilir. Tipik olarak bir polimerik gıdanın sıcaklığı yavaş yavaş artırılırken ufak salınımlı bir gerilme uygulanır ve G' ile G'' 'nin sıcaklıkla değişimi kaydedilir. Camsı bölgede malzeme sert olduğu için G' yüksektir, G'' düşüktür; kauçuğumsu bölgeye geçerken (T_g civarında) malzeme yumuşamaya başlar, G' hızla düşer ve G'' bir pik yaparak maksimuma ulaşabilir. Örneğin şekilsiz (amorf) şekerlerden oluşan bir şekerlemeyi ısıtırken belirli bir sıcaklıkta aniden yumuşayıp yapışkan hale geçmesi camsı geçişe karşılık gelir. DMA ölçümleri, dondurma formülasyonlarında T_g tayini, ürünlerin yumuşama noktasının belirlenmesi, su aktivitesinin ürün dokusuna etkisinin incelenmesi gibi pek çok çalışmada ve Ar-Ge uygulamasında kullanılmaktadır. Ayrıca **zaman-sıcaklık süperpozisyonu** (time-temperature superposition) prensibi ile polimerik gıdaların uzun süreli davranışları yüksek sıcaklıklarda hızlandırılmış olarak incelenebilir; böylece raf ömrü veya saklama koşulları ile ilgili öngörüler yapılabilir.

Camsı bölge kavramı gıdaların kalite ve tekstürel özellikleri açısından da önem taşır. Örneğin tahıl gevrekleri üretiminde ürünün raf nemi arttıkça T_g düşer ve oda sıcaklığında gevrekleşir, camsı bölgeden çıkarak kauçuğumsu bölgeye geçer, sonuçta gevreklik kaybolup bayatlama meydana gelir. Benzer şekilde dondurma formülasyonlarında camsılığa geçiş sıcaklığına yakınlık, dondurmanın erime hızı ve kristal büyümesi gibi kalite parametrelerini etkiler. Bu nedenle gıda bileşenlerinin T_g değerlerine göre formülasyon yapılır (örneğin poliyoller veya şeker ikameleri T_g 'yi yükseltmek için kullanılabilir).

Reoloji-Triboloji İlişkisi

Geleneksel reolojik ölçümler, bir malzemenin kendi içinde akma ve deformasyon özelliklerini inceler. **Triboloji** (ince film reolojisi) ise iki yüzey arasındaki sürtünme, aşınma ve yağlama olaylarını inceleyen bilim dalıdır. Gıda biliminde triboloji, özellikle **oral triboloji** bağlamında, yiyeceklerin ağızda dil, damak ve dişler arasındaki ince film halindeki davranışlarını anlamaya

yönelik hızla gelişen bir alandır. Reolojik açıdan aynı özellikleri gösteren iki gıda, tribolojik özellikler bakımından farklılık gösterebilir; bu da ağız hissinde büyük etki yaratır. Örneğin benzer viskozitedeki iki sos, ağızda bıraktıkları kayganlık veya “yağlılık” hissi bakımından farklı olabilir. İşte triboloji bu farkları ortaya koymak için devreye girer.

Gıda tribolojisi, gıdaların ağızda tükürük varlığında iki yüzey (dil ve damak) arasındaki yağlama davranışını ve sürtünme özelliklerini ölçer. Oral işlemenin başlangıç aşamasında (ısıрма ve çiğneme anı) gıdanın reolojik/mekanik özellikleri (sertlik, kırılabilirlik, viskozite) hissedilir ve önemlidir. Ancak çiğneme ilerledikçe ve gıda parçacıkları ufalanıp tükürükle karıştıkça, dokunun algısında sürtünme ve kayganlık daha baskın hale gelir. Bu noktada reolojinin yerini tribolojik etkileşimler almaya başlar. Tribolojik ölçümlerde genellikle bir cihazda (tribometre) standart yüzeyler arasında test gıdası yağlayıcı olarak kullanılır; belirli bir normal yük altında disk belirli hızlarda döndürülerek aradaki sürtünme kuvveti ölçülür. Elde edilen **Stribeck eğrisi**, sürtünme katsayısının, yağlayıcı film parametresi olarak tanımlanan (viskozite $\times$ hız / yük) oranının fonksiyonu olarak grafiğe dökülmesiyle elde edilir. Bu eğri genellikle sürtünme davranışında üç bölge gösterir: *sınır (boundary) rejimi* – düşük hız/yüksek yük koşullarında yüzeylerin doğrudan temas ettiği ve sürtünmenin yüksek olduğu bölge; *karışık (mixed) rejim* – orta koşullarda kısmi film oluşumu ile sürtünmenin azaldığı bölge; *hidrodinamik rejim* – yüksek hız/düşük yük koşullarında akışkan filmin iki yüzeyi tamamen ayırdığı ve sürtünmenin tekrar yükselmeye başlayabildiği bölge. Gıdalar için Stribeck eğrisinin şekli, ürünün algılanan “kayganlık” hissiyle ilişkilendirilir. Örneğin krema veya yoğurt gibi yüksek yağlı bir gıda, hidrodinamik bölgede düşük sürtünme katsayıları vererek yüksek kayganlık hissi yaratabilir; buna karşın su bazlı bir içeceğin sürtünmeyi azaltma etkisi sınırlı kalır, ağızda daha “ince” bir his bırakır.

Tribolojik analizler, reolojik ölçümleri tamamlayıcı niteliktedir. Reoloji, bir gıdanın bulk (kütlesel) özelliklerini verirken triboloji, o gıdanın yüzeysel kayganlık ve tekstür hissi hakkında bilgi sağlar. Örneğin çikolata tüketilirken ilk ısırıda sertlik/kırılabilirlik (reoloji & mekanik özellik) önemlidir; eriyip dağıldıktan sonra ise dil ile damak arasındaki kayganlık ve yağlılık hissi (tribolojik özellik) ön plana çıkar.

Reoloji-Tekstür İlişkisi

Tekstür, bir gıdanın tüketici tarafından hissedilen tüm mekanik ve fiziksel özelliklerini (sertlik, kırılgenlik, yapışkanlık, kremamsılık, sulu veya kuru his, vb.) kapsayan geniş bir kavramdır. Tekstür, görme, işitme (çiğneme sesi), dokunma ve kinestetik duyularla algılanır ve bir gıdanın kalitesinde tat/aroma kadar belirleyici olabilmektedir. Reoloji ise tekstürün mekanik boyutunu sayısal olarak ölçen bilimdir denilebilir. Tekstürel özelliklerin bir kısmı doğrudan reolojik parametrelerle ilişkilidir: örneğin *sertlik* bir gıdanın deformasyona karşı direncidir ve reolojik olarak bir malzemenin elastik modülü veya akma gerilimi ile bağlantılıdır; *viskozite/kıvam* özellikle sıvı ve yarı akışkan gıdaların tekstürünü tarif eder ve reolojide viskozite ile ölçülür.

Gıdaların tekstürünü ölçmek için **duyusal analizler** (eğitilmiş panelistler ile) veya **aletsel analizler** kullanılır. Aletsel yöntemlerde reolojik prensiplere dayalı cihazlar kullanılır: Örneğin bir **tekstür analiz cihazı**, gıdayı standart bir hızla sıkıştırıp uygulanan kuvveti kaydederek *sertlik*, *yapışkanlık*, *kohezivite* gibi parametreleri belirler. Bu, esasen reolojinin bir uygulamasıdır çünkü cihaza karşı gıdanın gösterdiği direnç kuvvet-deformasyon eğrileri ile ölçülür. Nitekim tekstür analiz cihazlarından elde edilen veriler genelde Newton (N) cinsinden kuvvet, mm cinsinden deformasyon mesafesi gibi çıktılar verir – bunlar malzemenin gerilme-gerinim eğrisinden türetilen reolojik büyüklüklerdir. Örneğin bir bisküvinin kırılma kuvveti cihazda ölçüldüğünde, bu değer o bisküvinin yapısal mukavemetini (reolojik olarak gerilme dayanımını) sayısal hale getirir. Benzer şekilde bir jel şekerlemenin esnekliği, bir tekstür analiz cihazında iki plak arasında sıkıştırılıp bırakıldığında yapısını ne kadar geri kazandığı ölçülebilir; bu, reolojik olarak elastikiyetinin bir göstergesidir.

Reoloji ve tekstür arasındaki ilişki, gıda formülasyonu ve kalite kontrolünde önemli bir yol göstericidir. **Kalite kontrol** sırasında viskozite ölçümleri, penetrometre/tekstürmetre ölçümleri gibi reolojik testler kullanılarak her parti ürünün istenen tekstürel özelliklere sahip olup olmadığı kontrol edilir. **Ürün geliştirme** aşamasında hedeflenen tüketici tekstürü genellikle reolojik parametrelerle tanımlanır: örneğin “daha kremamsı bir yoğurt” isteniyorsa G’ modülü daha yüksek bir yapı hedeflenir; “daha akışkan bir çorba” isteniyorsa belli bir deformasyon hızında viskozite değeri düşürülmeye çalışılır. Bu şekilde reolojik ölçümler formülasyonda kılavuz görevi görür.

Duyusal analizler de reolojiyle paralel kullanılarak korelasyonlar kurulur. Örneğin eğitilmiş panel tadımında ölçülen “krema kıvamı” skoru ile laboratuvarında ölçülen viskozite değeri arasında çoğunlukla güçlü bir korelasyon bulunur. Yine “sertlik” puanı ile tekstür cihazında ölçülen maksimum kuvvet değerleri çoğunlukla uyum içindedir. Fakat her zaman birebir ilişki olmayabilir, çünkü insan duyusu kayganlık, sıcaklıkla erime gibi kompleks hisleri de değerlendirir. Bu yüzden tribolojik veriler de devreye sokularak, örneğin bir dondurmanın “kayganlık” hissi tribometre ile ölçülen sürtünme katsayısı verileriyle açıklanmaya çalışılır. Reoloji, triboloji ve tekstürometriden elde edilen veriler birleştirilerek gıdaların duysal profil analizi yapılır.

Endüstride reoloji-tekstür ilişkisi özellikle tüketici kabulü açısından kritik role sahiptir. Tüketiciler bir gıdayı yalnız tadına göre değil, dokusuna (tekstür) göre de değerlendirir. Doku beklentisine uymayan ürünler lezzet iyi olsa bile reddedilebilir. Bu nedenle firmalar ürünlerinin hedefledikleri tekstüre sahip olmasını sağlamak için reolojik parametreleri sınır değerler içinde tutarlar.

Gıda Endüstrisi Açısından Reolojinin Önemi

Reoloji, gıda endüstrisinde ürünlerin **kalite kontrolü**, **üretim işlemleri**, **ürün geliştirme** ve **tüketici memnuniyeti** konularında vazgeçilmez bir araç haline gelmiştir. Gıdaların reolojik özelliklerinin belirlenmesi; hammadde kalitesinin değerlendirilmesi, malzemenin işlenmesi sırasında sergileyeceği davranışların tahmin edilmesi, ürünün depolama stabilitesi ve tüketici tarafından algılanacak doku özelliklerinin kontrolü için kritik önemdedir. Aşağıda, gıda endüstrisinde reolojinin başlıca kullanım alanları özetlenmiştir:

- **Hammadde ve Kalite Kontrol:** Bir gıdanın üretimine girmeden önce hammaddelerin reolojik özellikleri kalite göstergesi olabilir. Üretim sonrasında da her parti ürünün hedeflenen reolojik değerlere uyup uymadığı izlenir. Böylece partiler arası tutarlılık sağlanır ve standart bir ürün kalitesi korunur.
- **Üretim ve İşleme Prosesleri:** Gıda reolojisi, üretim hatlarının tasarım ve optimizasyonunda merkezi rol oynar. Pompalama, karıştırma, ısıl işlem, filtreleme, doldurma gibi temel işlemlerde ürünün reolojik özellikleri işlem verimliliğini belirler. Reolojik veriler sayesinde ekipman boyutlandırmaları ve proses parametreleri doğru seçilir. Ayrıca işlemler sırasında ürünün reolojik özelliklerindeki değişimler takip

edilerek kalite sorunları erkenden tespit edilir. Üretim hattı kontrolünde çevrimiçi viskozimetreler kullanılarak sürekli izleme yapılabilmektedir.

- **Ürün Geliştirme ve Formülasyon:** Yeni bir gıda ürünü geliştirirken hedeflenen tekstür ve akış özelliklerini yakalamak, reolojik ölçümler ile mümkündür. Örneğin yeni bir “light” salata sosu geliştirirken yağ oranı azaltıldığında sosun çok ince akmaması istenir; burada eksilen viskoziteyi telafi etmek için hangi hidrokolloitten ne kadar ekleneceği reolojik testlerle belirlenir. Ara formülasyonlar hazırlanıp viskozite, akma gerilimi, G' gibi parametreleri ölçülerek hedefe yakınlık değerlendirilir. Yine bitkisel bazlı bir süt alternatifi içecek geliştirilirken tüketicide süt hissi yaratacak belli bir viskozite ve ağız kayganlığı hedeflenir; farklı stabilizerler denenip reolojik/tribolojik ölçümlerle ideal kombinasyon bulunur. Ayrıca ürün geliştirmede reoloji, ürünün stabilite ömrünü de öngörmeye yardımcı olur. Örneğin emülsiyon tipi bir salata sosunun viskozitesi ve akma gerilimi, faz ayırımına karşı direncini gösterir; depolama testlerinde viskozitede düşüş gözleniyorsa emülsiyon stabilitesinin bozulduğunu işaret eder.
- **Tüketici Kabulü ve Duyusal Kalite:** Reoloji, tüketicinin üründen beklediği tekstürel özellikleri sayısal hedefler haline getirerek ürün kalitesini güvence altına alır. Tüketiciler bir ürünün tadına bakmadan önce bile kıvamı veya dokusuyla ilgili güçlü bir izlenime sahip olabilir. Bu tür algılar, o ürünün reolojik özelliklerinin hedeflenen aralıkta tutulmasıyla yönetilir.
- **Yapı-Fonksiyon İlişkileri ve Ar-Ge:** Gıda malzemelerinin yapısal özellikleri ile fonksiyonel performansları (tekstür, stabilite, besleyicilik, işlenebilirlik) arasındaki ilişkiler reoloji kullanılarak incelenir. Bu da yenilikçi ürünlerin geliştirilmesine, mevcut ürünlerin iyileştirilmesine olanak tanır.

Sonuç olarak, gıda endüstrisinde reolojinin çok önemli birçok işlevi vardır: Her ürünün istenen reolojik profili tanımlanabilir ve bu profilin üretimden tüketime korunması hedeflenir. Kalite kontrol, reolojik ölçümler ile standardize edilebilir. Üretim süreçleri (örneğin, pompa seçiminden karıştırıcı hızına kadar), reolojik verilerle tasarlanıp optimize edilir. Ürün geliştirme, reoloji sayesinde hedeflenen tekstürlerin elde edilmesiyle başarıya ulaşır. Tüketici memnuniyeti, tekstürel beklentilerin karşılanmasıyla doğrudan ilişkilidir ve reoloji bu beklentileri nesnel veriye dönüştürür. Gıdaların yapı-fonksiyon ilişkileri de yine reolojinin evrensel diliyle anlaşılır: Malzemelerin iç yapısındaki bir değişimin ürün performansına etkisi,

reolojik ölçümlerle nicelleştirilir. Her yeni gıda formülasyonu veya süreç iyileştirmesinde, hedef doku ve akış özelliklerini sağlayabilmek için reolojik prensiplere başvurulur. Günümüzde “her lokmada aynı lezzet ve doku”yu sunabilmek, büyük ölçüde reolojinin doğru uygulanmasıyla mümkün olmaktadır

Gıda Formülasyonlarında Reolojik Ölçüm Teknikleri

Özge Zambakoğlu

Anamed & Analitik Grup, İstanbul

Giriş

Gıda ürünlerini çok geniş bir yapı ve doku çeşitliliğine sahip olduğundan, bu ürünlerin mekanik özelliklerini karakterize etmek için kullanılan reolojik yöntemlerin kapsamı da oldukça geniştir. Sıvı veya katı gıda formülasyonlarının reolojik ve tekstürel özellikleri, ürünün bütün yaşam döngüsü boyunca kritik öneme sahiptir. Üretimde parti onayı için orijinal kaplarında gerçekleştirilen basit tek nokta viskozite ölçümlerinden, kalite kontrol süreçlerinde kullanılan klasik reolojik parametreler olan kesme viskozitesi ve akma noktasının belirlenmesine kadar pek çok yöntem uygulanır.

Araştırma ve geliştirme departmanında yeni formülasyonların geliştirilmesi söz konusu olduğunda ise gıdaların mekanik testi, kapsamlı reolojik incelemeler gerektiren daha karmaşık bir düzeye ulaşır.



Şekil 1: Paralel plaka ve konik-plaka geometrileri ile kullanılabilen Peltier plakalı sıcaklık kontrolüne sahip HAAKE MARS iQ Reometre

Bazı yöntemler paralel plakalar, konik-plaka veya eşeksenli silindirler gibi klasik reometre geometrilerine dayanırken, bazı yöntemler özel rotorlar ve/veya ölçüm aparatları kullanarak belirli bir uygulamayı taklit etmeye çalışır. Bu uygulamalardan biri, tüketici beklentilerini karşılaması gereken gıda ürünlerinin dokusunun incelenmesidir. Özel olarak tasarlanmış problemler sayesinde, bir döner reometre; yumuşaklık, yapışkanlık veya yayılabilirlik gibi çeşitli önemli gıda özelliklerini test edebilir ve hatta tribolojik testlerin yapılmasında bile kullanılabilir.

Materyaller ve Yöntemler

Farklı ticari olarak temin edilebilen gıda ürünleri, mekanik yatak donanımlı Thermo Scientific™ HAAKE™ MARS™ iQ Reometre kullanılarak incelenmiştir (Şekil 1). Gerçekleştirilen testler; viskozite ve akma gerilimi ölçümlerini, eksenel bükülme, kırma ve sıkıştırma testlerini ve ayrıca tribolojik ölçümleri içermektedir.

Kesme hızı bağımlı viskozite, $0.1\text{--}100\text{ s}^{-1}$ aralığında gerçekleştirilen kararlı durum kesme hızı basamak testleri ile belirlenmiştir. Akma gerilimleri ise kesme gerilimi rampa testleri ile ölçülmüştür. Akma gerilimi değerlerini belirlemek için farklı değerlendirme yöntemleri kullanılmıştır. Tüm viskozite ve akma gerilimi testleri 60 mm paralel plaka geometrisi kullanılarak yapılmıştır. Ölçüm sırasında numunenin kaymasını önlemek için yüzeyi tırtıklı (çapraz desenli) paralel plakalar tercih edilmiştir.

Farklı gıda ürünlerinin tribolojik profillerinin incelenmesinde, sürtünme katsayıları $0.001\text{--}1000$ mm/s aralığındaki çevresel hız (kayıcı hız) fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Kullanılan tribolojik ölçüm düzeneği, bilye-üzerinde-3 plaka prensibine dayanmaktadır (Şekil 2). Hem bilye hem de üç plaka sertleştirilmiş paslanmaz çelikten üretilmiştir. Bu kurulumla ilgili detaylı bir açıklama ilgili ürün raporunda bulunabilir [1].

Bükülme ve kırılma testleri, Şekil 3'te gösterilen 3 nokta bükme aparatı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu kurulum ile belirli bir kaldırma hızı set değerinde eksenel rampa testleri yapılmış, oluşan normal kuvvetler kaydedilmiş ve analiz edilmiştir. Eksenel sıkıştırma testleri ise 35 mm çapında paralel plaka kurulumu ile yapılmıştır.



Şekil 2: Paralel plaka ve konik-plaka geometrileri ile kullanılabilen Peltier plakalı sıcaklık kontrolüne sahip HAAKE MARS iQ Reometre



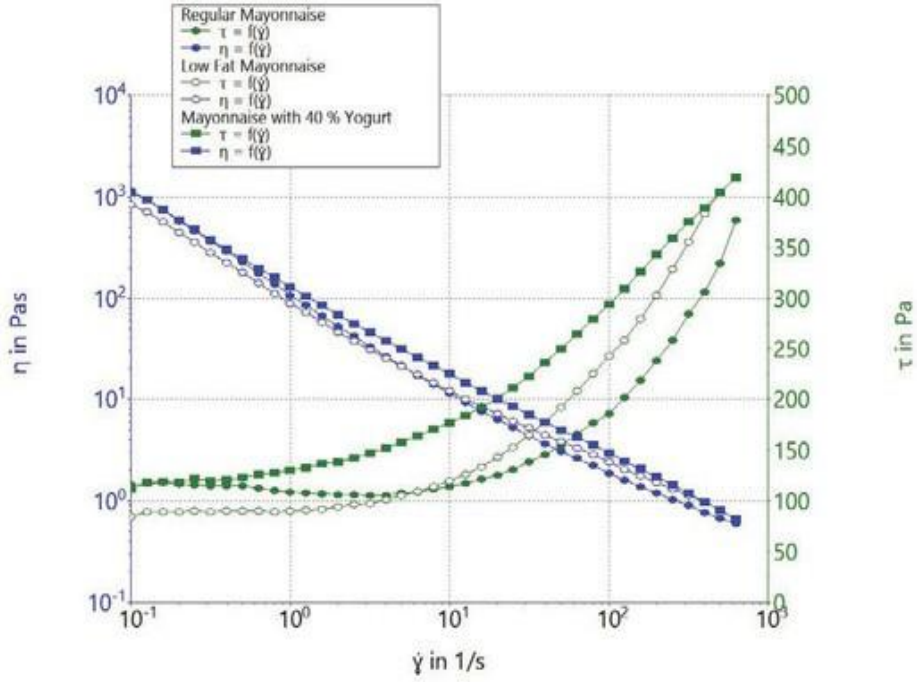
Şekil 3: 8 mm plaka rotoru ile HAAKE MARS iQ Reometre kullanılarak bükülme ve kırılma testlerinin gerçekleştirilmesi için 3 nokta bükme aparatı.

Sonuçlar ve Tartışma

Viskozite ve akma gerilimi ölçümleri

Sıvı ve yarı katı gıda formülasyonları, yaşam döngüleri boyunca çok geniş bir kesme koşulları yelpazesine maruz kalır. Örneğin depolama sırasında, yalnızca yerçekimi kuvvetleri etkili olduğunda çok düşük kesme hızları uygulanır. Üretim sürecinde (karıştırma, pompalama veya karıştırma) ve tüketim sırasında (ağızda işleme) ise orta ve yüksek kesme hızları gözlemlenir. Bu nedenle, yalnızca tek bir dönme hızında yapılan tek nokta viskozite ölçümleri, test edilen malzemenin gerçek viskozite özelliklerini yansıtmayan eksik bir profil sunar.

Sadece geniş bir kesme hızı aralığında elde edilen tam akış eğrisi, belirli bir gıda ürününün farklı kesme koşulları altında nasıl davranacağını tahmin etmek için gerekli bilgiyi sağlar. Şekil 4, üç farklı ticari mayonez ürününe uygulanan kararlı durum kesme hızı basamak testlerinin sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 4: Üç farklı mayonez ürünü için kesme hızı ($\dot{\gamma}$) fonksiyonu olarak kararlı durum viskozitesi η (mavi semboller) ve kesme gerilimi τ (yeşil semboller).

Emülsiyon bazlı gıda ürünlerinde beklendiği gibi, incelenen kesme hızı aralığında tüm mayonezler belirgin kesme incelmesi (shear thinning) davranışı sergilemiştir. $0,1 \text{ s}^{-1}$ de yaklaşık $1000 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ viskozite ile başlayan üç örnek de, 800 s^{-1} civarında $1 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 'nin altına düşmüştür. 800 s^{-1} 'den daha yüksek kesme hızlarında, örnekler geometriden dışarı atılmış ve bu durum hem viskozite hem de kesme geriliminde dramatik bir düşüşe yol açmıştır. Bu hatalı veriler Şekil 4'ten çıkarılmıştır.

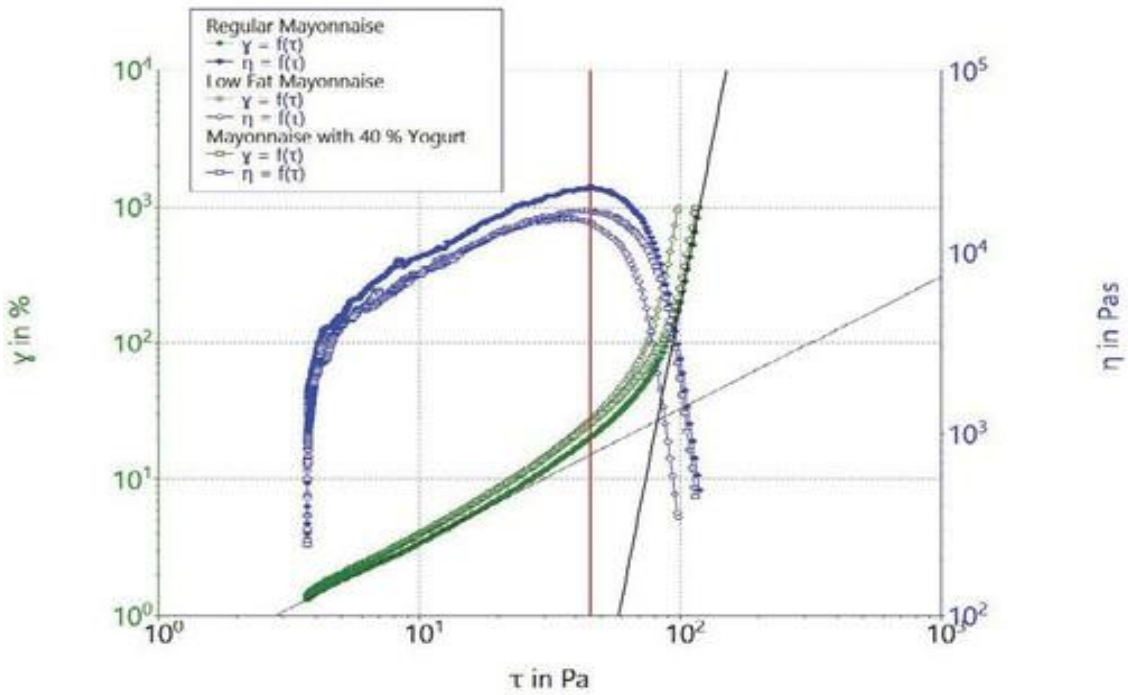
Böyle bir kesme incelmesi profili, birçok yarı katı gıda ürünü için istenen bir davranıştır. Düşük kesme hızlarında yüksek viskozite, çok bileşenli gıdaların faz ayrılmasını önler ve ürünün genel stabilitesine katkı sağlar. Ancak yüksek kesme hızlarında viskozitenin aşırı yüksek olması genellikle istenmez; çünkü uygulamada (yayılabirlik, kaşıkla alınabilirlik) ve tüketimde (çiğneme, yutma) olumsuz etkiler yaratır. Grafikte (Şekil 4), düşük kesme hızlarında tüm örneklerde kesme gerilimi sinyalinin sabit bir davranış sergilediğini de göstermektedir; bu durum akma (yielding) davranışını işaret eder.

Normal mayonez ve yoğurt içeren versiyon için plato, yaklaşık 120 Pa değerinde ortaya çıkarken, düşük yağlı versiyon daha düşük bir kesme gerilimi olan 90 Pa 'de akma göstermiştir.

Akma gerilimi (yield stress), birçok yapılı sıvı ve yarı katı gıdanın “akış” davranışını tanımlamak için hem araştırmada hem de kalite kontrolünde önemli bir parametre olarak kabul edilir. Akma gerilimi, dağıtılmış sistemlerin stabilitesini artırabilir; örneğin, bir ketçabın patateslerin içine çok fazla gömülmesini önleyerek, üstünde güzel kalın bir tabaka oluşturmasını sağlayabilir. Ayrıca, akma gerilimleri, tüketim sırasında önemli kabul edilen bazı gıda özellikleriyle, örneğin başlangıç sertliği ile de ilişkilidir [2].

Ancak, ölçülen akma gerilimi değeri, numue hazırlanışı, seçilen reolojik ölçüm yöntemi, veri değerlendirme yöntmi ve hatta test için kullanılan ölçüm geometrisine güçlü bir şekilde bağlıdır. Bir numunenin akma davranışını çok hassas bir şekilde incelemenin yaygın bir yolu, kesme gerilimi rampa testi yapmaktır; bu testte lineer olarak artan bir kesme gerilimi uygulanır ve deformasyon veya viskozite izlenir.

Şekil 5, kararlı durum kesme testlerinde kullanılan aynı mayonez örnekleri ile gerçekleştirilen gerilim rampa deneylerinin sonuçlarını göstermektedir.



Şekil 5: Üç farklı mayonez ürünü için kesme gerilimi (τ) fonksiyonu olarak deformasyon γ (yeşil semboller) ve viskozite η (mavi semboller). Kırmızı çizgi, normal mayonez için viskozitedeki maksimuma göre belirlenen akma gerilimini göstermektedir. Siyah çizgiler, deformasyonun farklı bölgelerine (elastik deformasyon ve kararlı akış) uygulanan tanjantları temsil eder. Her iki tanjantın kesişimi, akma geriliminin belirlenmesi için alternatif bir yöntem sunar.

Şekil 5'te gösterilen deformasyon-gerilim eğrileri üç ayrı bölge sergiler. İlk bölgede (akma gerilimi eşik değerinin altında düşük gerilimlerde) örnekler elastik deformasyona uğrar. Bu bölgede, çift logaritmali grafikte deformasyon-gerilim eğrisinin eğimi 1'den çok fazla büyük değildir.

Gerilim arttıkça ve örneğin akma gerilimi değerine yaklaştıkça, deformasyon daha hızlı değişmeye başlar ve eğim artar. Daha yüksek kesme gerilimlerinde, belirgin şekilde daha yüksek eğime sahip ikinci bir lineer bölge gözlenir. Bu bölgede kararlı akış meydana gelir ve mikro yapı, yüksek kesme kuvvetleri tarafından değiştirilir.

Bir deformasyon eğrisinden akma gerilimini hesaplamanın yaygın bir yolu, iki lineer bölgeye tanjantlar uygulamaktır. Akma gerilimi, tanjantların kesişimindeki gerilim değerine karşılık gelir. Şekil 5'te, bu yöntem normal mayonez örneğinin akma gerilimini belirlemek için kullanılmıştır (siyah çizgiler). Buna göre akma gerilimi 82 Pa olarak bulunmuştur. Tanjant yöntemi, akma gerilimini, elastik deformasyon ile kararlı akış arasındaki geçiş aralığının orta kısmına yerleştirir. Bir diğer alternatif yöntem ise, kesme gerilimi rampa testinden viskozitedeki maksimum değeri kullanmaktır. Bu yöntem de uygulanmış ve Şekil 5'te kırmızı çizgi ile gösterilmiştir. Buna göre akma gerilimi 45 Pa olarak belirlenmiş ve tanjant yöntemiyle elde edilen değerden açıkça daha düşüktür. Şekil 5'ten görülebileceği gibi, viskozitedeki maksimum değer, geçişin başına daha yakın meydana gelir ve deformasyon neredeyse saf elastik deformasyon bölgesini yeni terk etmiştir.

Tablo 1, farklı değerlendirme yöntemlerinden elde edilen akma gerilimi değerlerinin bir özetini sunmaktadır. Ayrıca, kararlı durum kesme hızı basamak testlerinden elde edilen kesme gerilimi plato değerleri de tabloya dahil edilmiştir. Görülebileceği üzere, bu değer görünür akma gerilimi için en yüksek değeri vermektedir; bu durum, verilerin bir dönme testi başlangıcında toplandığını ve dolayısıyla örneğin elastik ve viskoz davranış arasındaki geçişinin sonuna gelmiş olduğunu göstermektedir.

Tablo 1. Farklı reolojik testler ve değerlendirme yöntemlerinden elde edilen çeşitli mayonezlerin akma gerilimleri

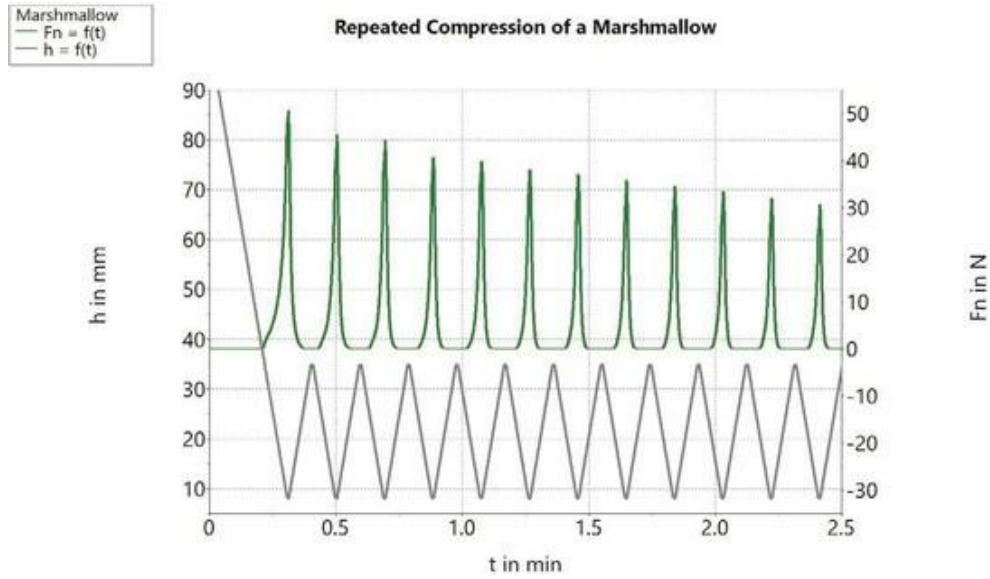
Mayonez Tipi	Testt Metodu		
	Gerilim rampa testi	Gerilim rampa testi	Kararlı durum basamak testi
Normal	45 Pa	82 Pa	116 Pa
Düşük Yağ	37 Pa	70 Pa	89 Pa
%40 yoğurt	45 Pa	83 Pa	119 Pa

Genel olarak, farklı malzemelerin akma gerilimleri, deneysel düzenek ve değerlendirme yöntemi özdeş olduğu sürece karşılaştırılabilir.

Tekstür Analizi

Yukarıda açıklanan klasik reolojik test yöntemlerinin yanı sıra, gıda formülasyonları genellikle tekstürel özellikleri açısından da karakterize edilir. Bir tekstür analizörü, bir gıdaya yapılan gerçek dünya işlemlerini (örneğin kaşıkla alma, çiğneme, yayma veya kırma) simüle etmeye çalışır. Bunu gerçekleştirmek için, bir ölçüm geometrisi tanımlı bir hızla gıda formülasyonunun üzerine veya içine hareket ettirilir ve bu sırada gerekli kuvvet kaydedilir; ya da tanımlı bir kuvvet uygulanır ve meydana gelen deformasyon ölçülür. Modern reometrelerde hassas kaldırma hareketi ve duyarlı eksenel kuvvet kontrolü doğal özelliklerdir. Bu nedenle, bir reometreyi tekstür analizi için kullanmak oldukça kolaydır. Normal ölçüm geometrilerinin (koniler, plakalar veya silindirler) uygun olmadığı durumlarda, neredeyse her türlü özel ölçüm geometrisi, evrensel adaptör aparatı kullanılarak uyarlanabilir.

Örnek olarak marshmallow (marşmelovlar) verilebilir; çiğnerken elde edilen istenen ağız hissi, ürünün başarısı için önemlidir. Çiğneme davranışını simüle etmek için marshmallows, reometre ölçüm geometrisinin alt plakasına yerleştirilmiş, 35 mm çapında bir plaka ile 5 mm/s hızında 8 mm yüksekliğe sıkıştırılmıştır. Ardından üst plaka aynı hızla yukarı kaldırılmış ve bu sıkıştırma adımı, çiğneme davranışını simüle etmek amacıyla birkaç kez tekrarlanmıştır. Bu testin sonuçları Şekil 6'da gösterilmektedir.



HAAKE RheoWin 4.85.0000

Şekil 6: Bir marshmallow'un 12 döngü sıkıştırma ve gevşeme hareketi. Siyah eğri, üst ölçüm geometrisinin aşağı ve yukarı hareketini göstermektedir. Yeşil eğri, örneği sıkıştırmak için gerekli kuvvetteki değişimleri göstermektedir.

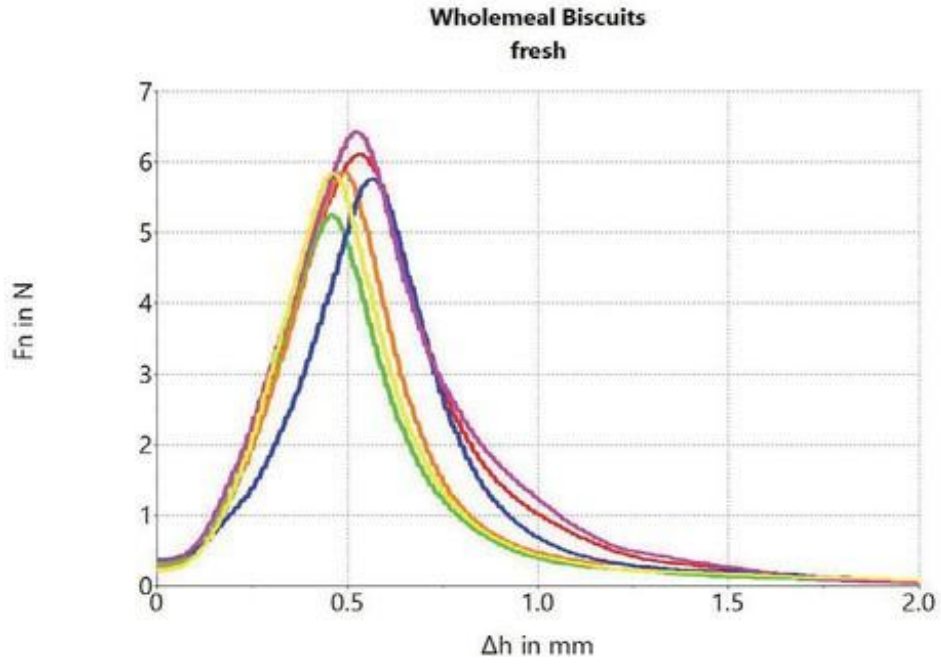
Her sıkıştırma adımında ölçülen maksimum kuvvet, döngüden döngüye azalmış ve bu durum marshmallow'un sadece tekrarlanan sıkıştırma nedeniyle yumuşadığını, sıvı (tükürük) etkisinin olmadığını göstermiştir.

Kırılma davranışı, bisküvi veya çikolata gibi belirli gıda türleri için önemli bir özelliktir. Çikolatada, bu özellik yine tüketici beklentilerini karşılamalıdır. Örneğin, sütlü çikolatanın daha yumuşak, bitter çikolatanın ise daha sert veya kırılabilir olması beklenir.

Bisküvilerin tekstürü ise daha karmaşıktır; nişasta bazlı ürünler genellikle hava neminin etkisiyle zamanla tekstürlerini değiştirir. Bu nedenle, bisküvilerin yalnızca başlangıç özellikleri değil, aynı zamanda yaşlanmaları da incelenmesi gereken bir konudur. Bu incelemelerde genellikle bisküvinin kırılması için gereken kuvvet ve kırılmadan önceki bükülme miktarı değerlendirilir.

Kırılma davranışını test etmek için, bisküviler 3 nokta bükme aparatı üzerine yerleştirilmiştir (Şekil 3). Ölçüm geometrisinin üst kısmı için 8 mm çapında bir plaka rotoru seçilmiştir. Üst geometrinin başlangıç pozisyonu, bisküvilerin rahatça yerleştirilebilmesi için yeterince yüksek tutulmuştur. Üst geometri, bisküvinin yüzeyini 0,1 N algılama kuvveti ile tespit etmek için 0,1 mm/dk hızla aşağı hareket ettirilmiştir. Bu noktadan itibaren, üst geometri 1 mm/dk hızla aşağı doğru hareket etmeye devam etmiş, bisküviyi bükmüş ve kırmıştır.

Daha sonra, Thermo Scientific™ HAAKE™ RheoWin™ Yazılımı'ndaki döngü fonksiyonu kullanılarak, bir sonraki bisküvinin yerleştirilmesi için ölçüm geometrisi tekrar yukarı kaldırılmıştır. Paketi açar açmaz test edilen taze bisküviler üzerinde yapılan çoklu testlerin sonuçları, doğal hammaddelere dayalı örneklerde beklendiği gibi, maksimum bükülme ve kırılma kuvvetlerinde bir miktar dağılım göstermiştir (Şekil 7).



HAAKE RheoWin 4.85.0000

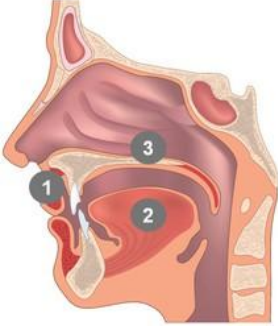
Şekil 7: Taze tam buğday bisküviler ile gerçekleştirilen çoklu kırılma testleri.

Tribolojik Testler

Triboloji, malzeme bilimi ve makine mühendisliği alanında, göreceli hareket halindeki yüzeylerin özellikleri ile ilgilenen bir disiplindir. Bu alan, sürtünme, yağlama ve aşınma prensiplerinin incelenmesi ve uygulanmasını kapsar.

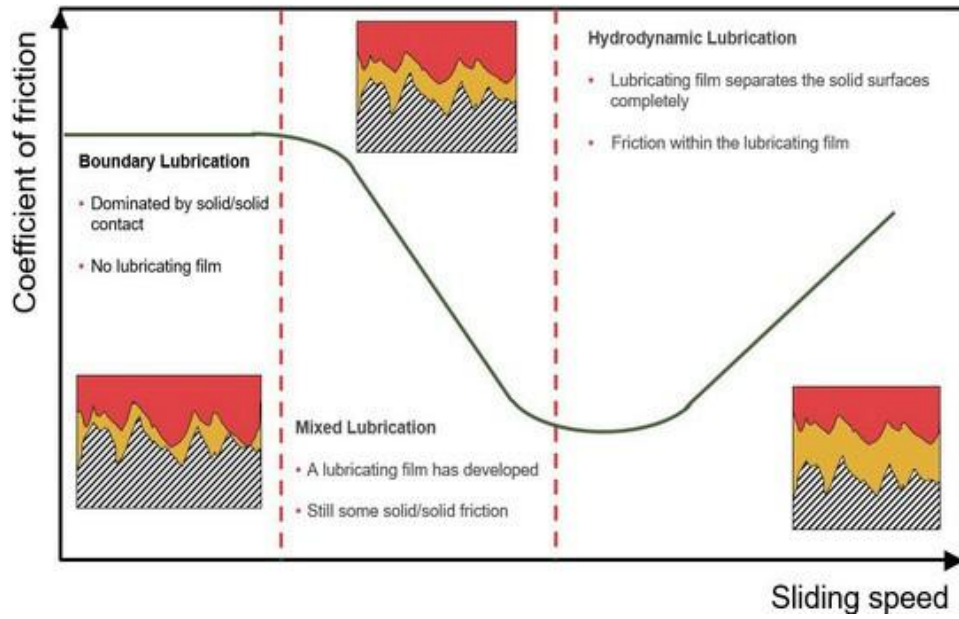
Tribolojik ölçümler, gıda bilimi alanında tekstür ve ağız hissi gibi karmaşık kavramları açıklamak için ek bir teknik olarak ilgi görmüştür.

Farklı malzemeler ve yüzey pürüzlülükleri, dil, gıda (tükürük) ve damak arasındaki karmaşık etkileşimi simüle etmek amacıyla kullanılmıştır [2]. Nihai hedef, sürtünme katsayısı gibi tribolojik parametreleri, genellikle duyu panellerden elde edilen kremamsılık veya yağlılık gibi tekstürel ağız hissi özellikleri ile ilişkilendirmektir.

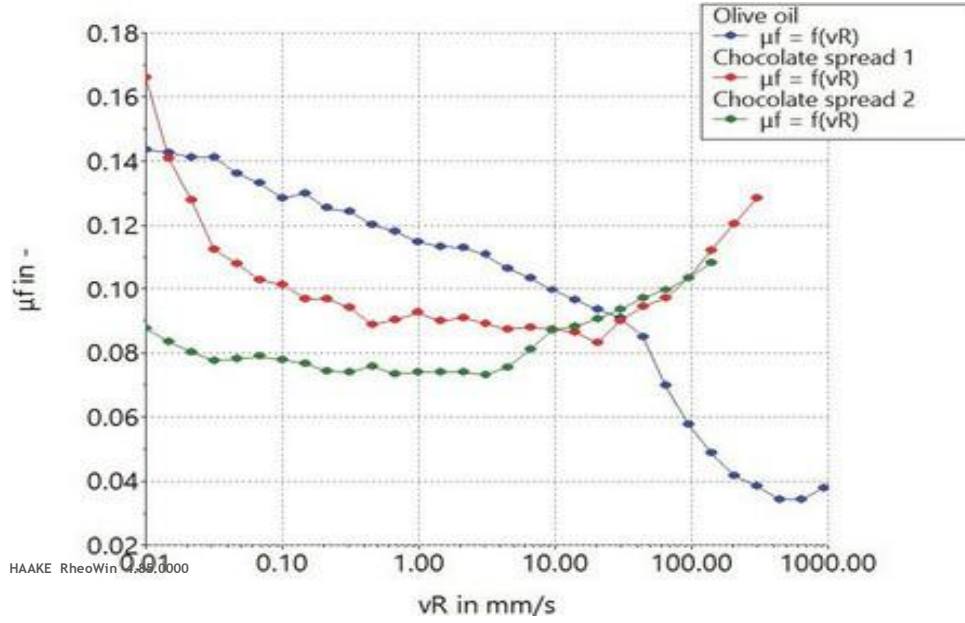


Tribolojik veriler genellikle Stribeck eğrisi şeklinde sunulur; bu grafikte sürtünme katsayısı kayma hızı fonksiyonu olarak gösterilir. Stribeck eğrisinin genel formu Şekil 9'da verilmiştir ve üç bölgeye ayrılabilir. Düşük kayma hızlarında, yağlayıcı film mevcut değildir ve davranış doğrudan katı/katı temas tarafından belirlenir. Bu bölge genellikle sınır yağlama aralığı olarak adlandırılır ve ortaya çıkan sürtünme katsayıları yüksektir.

Orta kayma hızlarında, yağlayıcı numunenin artan hidrodinamik basıncı, iki yüzey arasında bir yağlama filmi oluşumuna yol açar.



Şekil 9: Triboloji ölçümleri için Stribeck eğrisinin genel şekli ve bölgeleri.



Şekil 10: İki farklı çikolata kreması ve bir zeytinyağı için Stribeck eğrileri (sürtünme katsayısı μ_m , kayma hızı vR fonksiyonu olarak).

Grafik, zeytinyağının iki çikolata kremasına kıyasla farklı yağlama özelliklerini ortaya koymaktadır. Daha yüksek viskoziteye ve daha macunumsu bir yapıya sahip olan çikolata kremleri, daha düşük kayma hızlarında daha stabil bir yağlama filmi oluşturmuştur. Daha yüksek kayma hızlarında ise, zeytinyağının daha düşük viskozitesi açık bir avantaj sağlamış ve bu aralıkta en düşük sürtünme katsayılarıyla en iyi yağlama özelliklerini göstermiştir.

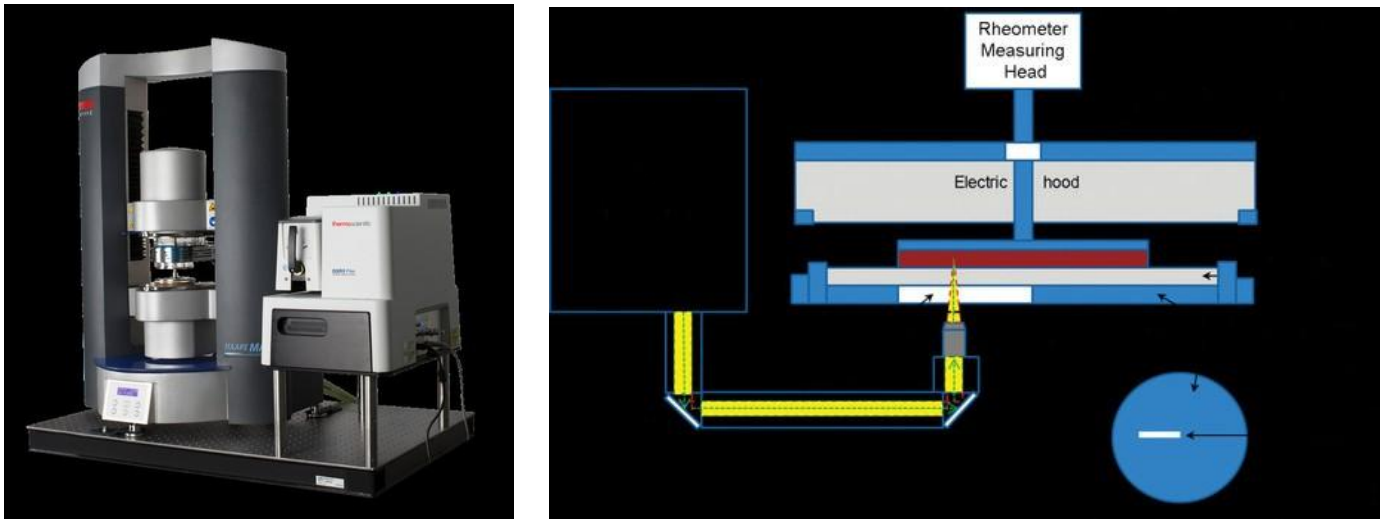
Ayrıca, Stribeck eğrileri iki çikolata kreması arasında da farklar ortaya koymuştur. Yüksek kayma hızlarında sürtünme katsayıları neredeyse aynı iken, çikolata kreması 2, düşük ve orta kayma hızlarında daha iyi yağlama özellikleri sergilemiştir.

Reoloji-Raman Spektroskopisi

Karmaşık akışkanların gerilme-gerinim tepkisi, malzeme içindeki fiziksel ve kimyasal yapı değişiklikleriyle yakından bağlantılı olduğundan, reoloji, akışı etkileyen fiziksel veya kimyasal özelliklerin eşzamanlı ölçümüyle birleştirildiğinde en yararlı olabilir. Moleküler konformasyon, bağ oluşumu, kopma ve kimyasal bileşim gibi kimyasal bilgiler de reolojik ölçümler için çok önemlidir. Raman spektroskopisi gibi titreşimsel spektroskopik araçlar, emülsiyonlar dahil olmak üzere çeşitli yumuşak madde sistemlerinde ilgi çekici kimyasal bilgileri araştırmak için noninvaziv tekniklerle güçlü olduklarını kanıtlamışlardır.

Reoloji ve Raman spektroskopisi kullanılarak kakao yağı kristalleşmesinin incelenmesi

Eşzamanlı reoloji ve Raman spektroskopisi (RheoRaman) ölçümleri, kakao yağının (CB) izotermal kristalleşmesini incelemek için kullanıldı (Şekil 11). Sonuçlar, CB'nin önce amorf bir katı haline sertleşerek kristalleştiğini göstermektedir. Daha sonra bu amorf katı, kristal bir katı oluşturmak üzere morfolojik bir dönüşüm geçirmiştir. Bu iki ayrı analitik teknik birleştirilmeden, amorf katıdan kristal katıya geçiş gözden kaçacaktı. Tekniklerin her biri tek başına sürecin tek aşamalı olduğunu düşündürürken, ancak iki teknik bir arada kullanıldığında çok aşamalı kristalleşme süreci ortaya çıkmıştır. Bu durum, reolojinin yerinde (in situ) Raman spektroskopisi ile birleştirilmesiyle elde edilen benzersiz analitik gücü açıkça göstermektedir.



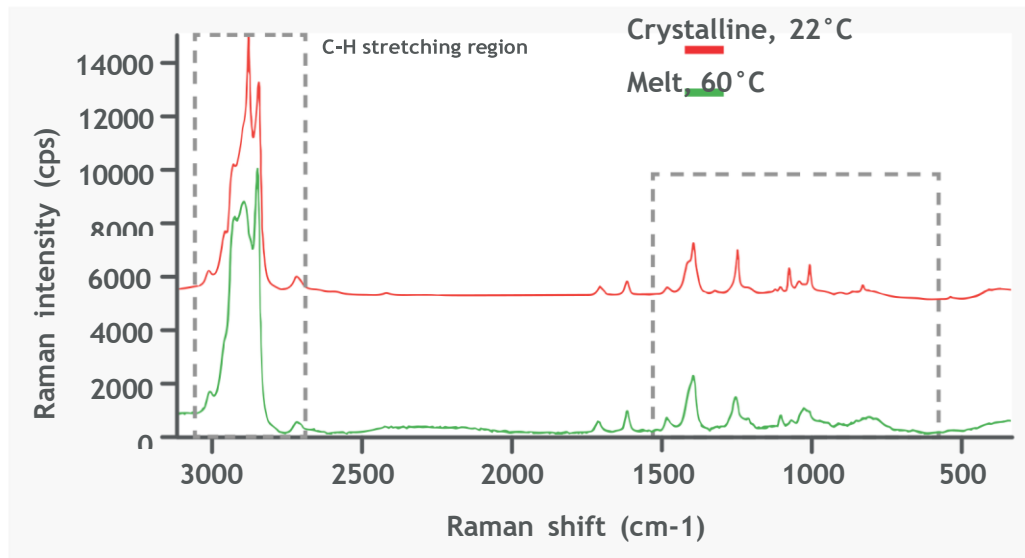
Şekil 11.

(a) Thermo Scientific HAAKE™ MARS RheoRaman Sistemi için RheoRaman modülü.

(b) MARS RheoRaman Sisteminin şematik diyagramı (reometre numune sahnesinin yandan ve üstten görünüşü). DXR3 Flex Raman Spektrometresi, lens tüpleri ve ışığı 20x objektife yönlendiren aynalar kullanarak MARS reometresine serbest-uzay bağlantısıyla bağlanmıştır. Objektif, gelen lazeri (yeşil kesikli çizgi) odaklar ve reometre sahnesinin üzerindeki numuneden çıkan geri saçılan Raman ışığını (sarı) toplar.

Sonuçlar

Sıvı fazdaki kakao yağı (CB) eriyiğine ve kristalize katı CB'ye ait Raman spektrumları, 500–3000 cm^{-1} aralığında Şekil 12'de gösterilmiştir. Hem C–H gerilme bölgesinde (2700–3050 cm^{-1}) hem de parmak izi bölgesinde (1000–1800 cm^{-1}) belirgin Raman özellikleri gözlemlenmiştir. Daha spesifik olarak, daha düşük Raman kayması özellikleri şunları içerir: karbonil (C=O).



Şekil 12. Eğitilmiş ve kristalize kakao yağına (CB) ait tam Raman spektrumları

Kakao yağının (CB) izotermal kristalleşmesini incelemek için eşzamanlı reoloji ve Raman spektroskopisi ölçümleri kullanılmıştır. Bu çok modlu analitik teknik, CB'nin kütleli mekanik özelliklerinin (G' , G'' ve $\tan(\delta)$) moleküler düzeydeki konformasyonel değişikliklerle (2882 cm^{-1} 'de $\nu_{\text{as}}(\text{CH})$ modu) doğrudan ilişkilendirilmesine olanak sağlamıştır.

Fırıncılık Dolgularında Reoloji ve Hidrokolloidlerin Rolü

Dr. Saniye Öztürk

Azelis, İstanbul

Fırıncılık ürünlerinde kullanılan dolgular; tat, doku ve görsel kaliteyi belirlemenin yanı sıra proses stabilitesi ve raf ömrü açısından da kritik bir rol oynar. Meyve dolguları, kremalar, çikolata bazlı veya fonksiyonel dolgular gibi sistemler; karıştırma, pompalama, dozajlama, pişirme ve soğutma gibi çok aşamalı proseslere maruz kalır. Bu nedenle dolguların reolojik davranışı, hem üretim hattındaki işlenebilirliği hem de nihai ürünlerdeki yapısal bütünlüğü doğrudan etkiler.

Reoloji, bir dolgunun akma davranışı, viskozite profili, elastikiyet-akış dengesi ve shear (kesme) altındaki stabilitesi hakkında bilgi verir. İdeal bir fırıncılık dolgusu; proses sırasında kolay pompalanabilir olmalı, ürün içine yerleştirildiğinde yayılmamalı, pişirme esnasında akmamalı ve soğutma sonrasında yapısını korumalıdır. Bu dengeyi sağlamak ise büyük ölçüde hidrokolloidlerin doğru seçimi ve kombinasyonuna bağlıdır.

Hidrokolloidler; düşük kullanım seviyelerinde dahi su bağlama, viskozite artırma, jel oluşturma ve partikül stabilizasyonu gibi fonksiyonlar sunarak fırıncılık dolgularının performansını optimize eder. Aynı zamanda su aktivitesinin kontrolü, pişirme stabilitesi, donma-çözünme dayanımı ve raf ömrü uzatma gibi kritik kalite parametrelerine de katkı sağlarlar. Özellikle günümüzde artan şeker azaltımı, temiz etiket ve bitki bazlı formülasyon talepleri, hidrokolloidlerin fonksiyonel önemini daha da artırmıştır.

Bu bağlamda, fırıncılık dolgularında yaygın olarak kullanılan pektin, gellan gam, ksantan gam ve citrus fiber; farklı moleküler yapıları ve reolojik mekanizmaları sayesinde birbirini tamamlayan çözümler sunar. Pektin ve gellan gam kontrollü jel yapılarıyla şekil tutma ve pişirme stabilitesi sağlarken, ksantan gam shear thinning davranışı ile proses kolaylığı sunar. Citrus fiber ise lif bazlı yapısı sayesinde hem reolojik destek hem de doğal içerik algısını güçlendirir.

Bu yazıda, fırıncılık dolgularında reolojinin önemi ele alınacak; pektin, gellan gam, ksantan gam ve citrus fiberin fonksiyonel mekanizmaları, reolojik etkileri ve uygulama avantajları teknik bir bakış açısıyla değerlendirilecektir.

Pektin

Pektin, bitkisel kaynaklı bir hidrokolloiddir. Su ile etkileşime girerek jel oluşturabilen bir karbonhidrattır. Kimyasal olarak anyonik bir polisakkarit yapısına sahiptir ve temel zinciri galakturonik asit birimlerinden oluştuğu için poligalaktan olarak da tanımlanır. Gıda endüstrisinde pektin, çok yönlü fonksiyonları sayesinde önemli bir bileşendir. Jelleştirici ve kıvam artırıcı özelliği ile pektin, özellikle meyve bazlı ürünlerde ısı ve pH koşullarına bağlı olarak jel yapısı oluşturur. Stabilizatör özelliği ile süt, meyveli ya da asitli sistemlerde faz ayrılmasını engelleyerek ürünün kararlılığını korur. Ayrıca viskozite düzenlemesi sayesinde sıvı sistemlerin akış özelliklerini kontrol eder, istenen tekstürü kazandırır. Proteinleri stabilize etmesi özelliği ile özellikle süt, içeceklerde veya asidik sistemlerde proteinlerin çökmesini önler; emülsiyon stabilitesini artırır. Doğal olarak narenciye kabukları veya elma posasından elde edilen pektinler, E440 koduyla gıda katkı maddeleri arasında yer alır. Kısacası, pektin hem doğal kökenli hem de çok fonksiyonlu bir bileşen olarak; jelleştirme, kıvam verme, stabilizasyon ve tekstür kontrolü gibi birçok amaçla kullanılmaktadır (Chan vd., 2017).

Pektin, ana omurgası α -(1→4) bağlı D-galakturonik asit birimlerinden oluşan bir anyonik polisakkarittir. Bu galakturonik asit birimleri üzerinde üç önemli fonksiyonel grup bulunur. Karboksil grubu ($-\text{COOH}$ / $-\text{COO}^-$), galakturonik asidin doğal fonksiyonel grubudur. pH'nın düşük koşullarında $-\text{COOH}$ (protonlanmış), yüksek koşullarında $-\text{COO}^-$ (anyonik) olarak bulunur. Pektinin yük taşımasını, iyonlarla (özellikle Ca^{2+}) etkileşimini, proteinlerle elektrostatik bağ kurmasını sağlar. Bu grup pektinin jel mekanizmasının temelidir. Metil ester grubu ($-\text{COOCH}_3$), karboksil gruplarının bir kısmı metanol ile esterleşmiştir. Bu metillenme derecesi, pektinin davranışını belirler. Metil grupları yük yoğunluğunu azaltır, hidrofobik etkileşimleri artırır. Metil oranı arttıkça kalsiyuma bağımlılık azalır. Amid grubu ($-\text{CONH}_2$), düşük metoksilli amidlenmiş pektinlerde bulunur. Karboksil grubunun bir kısmı amide dönüştürülmüştür. Etkileri daha kontrollü ve esnek jel, kalsiyuma karşı daha toleranslı sistem ve sineresis riskinin azalması olarak sıralanmaktadır. Özellikle düşük şekerli ve süt sistemlerinde avantaj sağlar (Seggiani vd., 2009; Pereira vd., 2016).

Esterifikasyon, pektindeki karboksil gruplarının ($-\text{COOH}$), metil alkol (CH_3OH) ile reaksiyona girerek metil ester ($-\text{COOCH}_3$) oluşturmasıdır. Basit ifade ile pektindeki asidik grupların ne kadarının metil ile birleştiğini gösterir. Esterifikasyon derecesi (DE: Degree of Esterification) toplam karboksil gruplarının yüzde kaçının esterleşmiş olduğunu ifade eder. Yüksek metoksilli pektin (HM) esterifikasyon derecesinin 50'nin üzerinde olduğu pektinlerdir. Jel mekanizması

şeker ve asitlendirmeye dayanmaktadır. Yüksek şeker oranı (minimum 55 °Brix), düşük pH (2.8–3.5) koşulları sağlandığında jel elde edilebilmektedir. Tipik uygulamaları reçel, jöle, meyve dolguları olarak sıralanabilir. Düşük metoksilli pektin (LM) esterifikasyon derecesinin 50'nin altında olduğu pektinlerdir. Jel mekanizması Ca^{2+} ile sağlanır. Tipik uygulamaları düşük şekerli reçeller, sütlü sistemler, meyveli preparatlar şeklinde sıralanabilir. Esterifikasyon derecesi arttıkça pektin şeker ve asitle jel olurken, düşük esterifikasyonlu pektinler kalsiyumla ağ yapısı kurar. LM amide pektinler, esterifikasyon derecesinin 50'nin altında olduğu ve amid gruplarının yer aldığı pektinlerdir. Amidasyon daha geniş proses toleransı sağlayarak jel esnekliğini ve proses toleransını artırır (Canteri-Schemin vd., 2005; Abid vd., 2017).

Yüksek metoksilli ve düşük metoksilli pektinler jel yapıda olduğundan dolayı her iki pektin türü de reolojik açıdan G' (storage modulus) $>$ G'' (loss modulus) davranışı göstermektedir. Yüksek metoksilli pektinler kırılğan jel oluşturduğundan dolayı düşük deformasyonda bile ağ kırılabilir. Bu sebeple kesme altında hızlı yapı kaybı meydana gelmektedir. Oluşturdukları jeller sert ancak mekanik olarak zayıftır. Düşük metoksilli pektinlerde jel ağı iyonik olduğu için daha esnektir. Elastik özelliklere sahip olduğundan dolayı yapıyı toparlaması daha başarılıdır. Kalsiyum arttıkça G' yükselir, aşırı Ca^{2+} kırılğanlığa yol açar (Naqash vd., 2017; Marić vd., 2018). Pektin, özellikle meyve bazlı fırıncılık dolgularında tercih edilen, kontrollü jel yapısı sayesinde şekil tutma ve kesilebilirlik sağlayan bir hidrokolloid çeşididir. Jel oluşturma kabiliyeti sayesinde dolgunun ürün içinde akmasını engeller; pişirme sonrası dolgunun formunu korumasını sağlar. Isıya dayanıklı jel yapısı, fırınlama sırasında dolgunun yayılmasını ve sızmasını sınırlar. Su bağlama kapasitesi ile sinerezisi azaltır, raf ömrü boyunca tekstür stabilitesini destekler. Şeker azaltılmış sistemlerde özellikle düşük metoksilli pektinler kalsiyumla çapraz bağlanarak yapı oluşturabilir.

Gellan Gam

Gellan gam, *Sphingomonas elodea* bakterisinin fermentasyonu ile üretilen, yüksek molekül ağırlıklı bir mikrobiyal polisakkarittir. Gellan gam, 1978 yılında CP Kelco tarafından keşfedilmiş, ancak FDA onayını 1992 yılında almıştır. Yapısında glukoz, rhamnoz ve glukuronik asit bulunur (tekrarlayan tetrasakkarit birimi). Yüksek açilli ve düşük açilli gellan gam olmak üzere iki ana tipi vardır. Bu iki tip, jel yapısı ve fonksiyonellik açısından oldukça farklıdır. Düşük açilli gellan gamlar asetaldehit ve gliserat gruplarından arındırılmış olup zincirin daha düzenli

katlanmasına izin verir. Sert, kırılğan, transparan jel oluşturur. Jel oluşumu için çoğunlukla kalsiyum, magnezyum gibi iyonlara ihtiyaç duyar. Termoreversible (ısındığında erir, soğuduğunda tekrar jel olur) özelliğe sahiptir. Yüksek açilli gellan gamların zincirinde asetaldehit ve gliserat grupları yer almaktadır. Düşük açilli gellan gamların aksine, yüksek açilli gellan gamlar yumuşak, elastik, opak jel oluşturur. İyon gereksinimi yoktur; su fazında ısıtmak yeterlidir. Hidre edebilmek için ısıl işleme ihtiyaç duymaktadır (Sanderson, 1990; Banik vd., 2007).

Gellan gamda jel oluşumu için ısıl işlem gerekmektedir. Isıtıldığında gellan zincirleri dağılır ve rastgele coil formuna geçer. Bu aşamada sistem akışkandır. Soğuma başladığında zincirler birbirlerine yaklaşır. İki gellan zinciri çift sarmal şeklinde organize olur. Bu yapı jel oluşumunun ilk temel adımıdır. Bu çift sarmallar bir araya gelerek heliks agregatları oluşturur. Bu agregatlar, 3D ağ iskeletini oluşturur. İyon konsantrasyonu arttıkça jel daha sert olur. Oluşan 3D heliks ağı, suyu fiziksel olarak hapseder. Ağ yoğunluğu jel sertliğini belirler. Gellan gam farklı sistemlere göre farklı bağlanma davranışları gösterir. Glukuronik asit grupları sayesinde divalent katyonlarla güçlü şekilde bağlanır (Rhein-Knudsen vd., 2015; Yuguchi vd., 2002).

Gellan gam çok düşük dozajlarda kullanıldığında bile (%0.025-%0.35) stabil bir sistem yaratabilmektedir. Gellan gam partiküllü sistemlerin çökmesini önleyerek stabiliteyi arttırmaktadır. Kullanım alanları özellikle içeceklerde partikül süspansiyonu (kakaolu süt, aloe veralı, tohumlu ya da meyve parçacıklı içecekler), tatlı jeller, sıcak servis edilen jel soslar, fırın sıcaklığına dayanıklı soslarda kullanılmaktadır (Bajaj vd., 2007).

Gellan çözeltileri tipik olarak shear-thinning davranış göstermektedir. Düşük kayma hızlarında daha viskoz, yüksek kayma hızlarında daha akışkan davranır. Bu davranış dolum hatlarında akışı kolaylaştırır. Gellan gam düşük dozda bile viskoziteyi epeyce artırabilmektedir. Viskozite artışı lineer olarak değil, konsantrasyon yükseldikçe üstel olarak artış görülür (Morris vd., 2012).

Reolojide gellan gamın davranışı $G'' > G'$ (viskoz davranışın baskın olduğu) şeklindedir. Jel oluştukça G' hızla artar ve $G' \gg G''$ olur (elastik davranış baskın). Bu durum, gellan gamın güçlü ve stabil bir 3D ağ oluşturduğunu gösterir. Yüksek açilli gellan gamlar daha elastik, esneyebilen bir jel oluşturur. G' değeri orta seviyelerde, G'' daha yüksektir. Bu sebeple daha yumuşak bir jel oluşur. Düşük açilli gellan gamlar daha yüksek G' , daha düşük G'' değeriyle sert ve kırılğan jeller oluşturur (Bajaj vd., 2007).

Gellan gamlar geniş pH aralıklarında stabil özellik gösterebilmektedir. Bu sebeple düşük pH değerine sahip meyveli içeceklerden, yüksek pH değerlerine sahip sütlü içeceklere kadar geniş pH aralıklarında kullanılabilir. Gellan gam içeceklerde jel oluşturmaz; zayıf bir elastik ağ oluşturur. Sıcaklık ve iyon kontrolüyle bir ağ oluşturur. Bu ağ partikülleri askıda tutar. Sedimentasyon oluşumunu engeller. Düşük konsantrasyonlardaki stabilite sağlama özelliği gellan gamın diğer hidrokoloidlerden fark yarattığı en önemli noktalardan biridir (Morris vd., 2012).

Gellan gam, düşük dozajda dahi güçlü yapı kazandırabilen, özellikle yüksek proses stabilitesi gerektiren dolgular için öne çıkan bir hidrokoloiddir. Termal stabil jel yapısı, fırınlama sıcaklıklarında dolgunun formunu korumasına yardımcı olur. Düşük kullanım seviyelerinde bile yüksek yapı gücü sağlayarak maliyet ve formülasyon avantajı sunar. Kontrollü jel sertliği sayesinde hem kesilebilir hem de daha elastik dolgular tasarlanabilir. Partikül süspansiyonu sağlayarak meyve parçalarının homojen dağılmasına katkıda bulunur. Düşük akma eğilimi, dolguların ürün dışına taşmasını azaltır. Dondurma-çözünme stabilitesi ile ön pişirilmiş veya dondurulmuş fırıncılık ürünlerinde avantaj sağlar.

Ksantan Gam

Xanthan gam, bir ekstrasellüler heteropolisakkarittir. Hücre dışına salgılanan karmaşık bir karbonhidrat zinciri olarak tanımlanmaktadır. Üretimi, *Xanthomonas campestris* bakterisinin enzimatik sentezi olur. Bu sistem, bakterinin hücre zarında aktif olarak çalışır ve polisakkarit zinciri hücre duvarı üzerinden dışarı salınır. Ortamda biriken bu kısım ayrıştırma, saflaştırma ve kurutma işlemleriyle gıda veya endüstri için kullanılabilir hale getirilir (Niknezhad vd., 2016).

Xanthan gam, bugün reolojide en çok bilinen ve kullanılan gamlar arasında yer almaktadır. 1950 yılında, laboratuvar ölçeğinde *Xanthomonas campestris* bakterisi üzerinde yapılan araştırmalar sırasında ilk kez ABD’de keşfedilmiştir. Daha sonra bu buluşun endüstriyel potansiyelini fark eden CP Kelco, bakteriyi kontrollü fermantasyonla üretmeyi başarmıştır. CP Kelco, 1960’ların başında bu üretim teknolojisini geliştirip xanthan gamı ticari ölçekte ilk üreten ve ticarileştiren firma olmuştur. Ürün de kısa süre içinde gıda, kozmetik ve petrol endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır (Kalogiannis vd., 2003).

Keşif süreci 1950’lerde Northern Regional Research Laboratory’de (Illinois, ABD) araştırmacılar, bitki patojeni *Xanthomonas campestris*’in ürettiği bir polisakkariti izole ederek

başlatmıştır. Bu hidrokolloid tipinin su bağlama kapasitesi ve shear-thinning davranışı fark edilince, endüstriyel potansiyeli araştırılmaya başlanmıştır. Araştırma sonuçları 1961’de CP Kelco’da lisanslanmıştır. CP Kelco firması, büyük ölçekli mikrobiyal fermentasyon sistemlerini geliştirerek üretimi stabilize etmiştir. 1964 yılında ticari olarak Kelzan® markasıyla piyasaya sürülmüştür.

Ksantan gam, pompalanma veya taşınma sırasında jellerde veya soslarda suyun ayrılmasını, yani sineresisi azaltmak için kullanılabilir. Yani ürün, borulardan geçerken veya paketlenirken viskozitesini korur, sıvı faz ayrılmaz ve ürün daha stabil görünür. Ksantan gamın yüksek viskozitesi ve shear-thinning özelliği sayesinde sistem shear altındayken akışkanlaşır, dinlenme halinde tekrar kıvam alır. Bu davranış, özellikle yüksek katılı jeller, soslar ve dolgu sistemleri için önem oluşturmaktadır. Sineresisi azaltıp, raf ömrünü arttırmaktadır. Ksantan gam akışkanlığı ve kıvamı artırır, ama ürünün ağızda hissedilen tekstürünü büyük ölçüde değiştirmez. Ksantan gam viskozite verici olarak görev yaparak tekstürü ya da elastik dokuyu yaratmak için başka hidrokolloid veya proteinlerle kombinasyon sağlanarak kullanılması gerekmektedir. Ksantan gamın moleküler yapısı uzun zincirlere sahiptir. Jel formasyonu tek başına elastik veya kırılabilir yapı oluşturmaz. Bu nedenle genellikle jel oluşturmaya başka polisakkaritler veya proteinlerle birlikte kullanılır.

Ksantan gam, güçlü shear thinning davranışı ile proses kolaylığı sağlayan bir hidrokolloiddir. Yüksek viskozite, düşük dozaj avantajı sayesinde pompalanabilir fakat stabil dolgular oluşturur. Shear altında viskozitenin düşmesi, dolum ve enjeksiyon sırasında akış kolaylığı sağlar; shear kalktığında yapı hızlıca geri kazanılır. Geniş pH ve sıcaklık aralığında stabilize sunar; asidik meyve dolgularında güvenle kullanılabilir. Partikül askıda tutma kabiliyeti ile meyve parçalarının çökmesini engeller. Diğer hidrokolloidlerle sinerjik çalışarak (pektin, gellan, guar vb.) tekstür optimizasyonu sağlar. Raf ömrü boyunca viskozite stabilitesi ile ürün standardizasyonuna katkı verir.

Narenciye Lifi

Narenciye lifleri, turuncgil grubu meyve kabuklarından elde edilen, lif bazlı ve çok fonksiyonlu bir bileşendir. Özellikle temiz etiket ve şeker/yağ azaltımı projelerinde öne çıkar. Temel olarak narenciye lifleri, hücre duvarı yapısındaki selüloz mikrofibrillerden oluşmaktadır. Ancak doğal yapısında lifler çoğunlukla bütün olduğundan yüzey alanı sınırlı olup, su tutma kapasitesi çok yüksek değildir. Mekanik olarak lifler defibrile edilirse, yani küçük lif parçalarına ayrılırsa,

gözenek boyutu küçülür ve yüzey alanı artmaktadır. Sonuç olarak lif, daha fazla su tutabilir ve ağ yapısı sayesinde daha küçük partikülleri askıda tutabilir. Daha küçük gözenek daha fazla su tutma kapasitesini arttırdığından dolayı, artan yüzey alanı viskozite ve partikül süspansiyonundaki etkiyi arttırmaktadır. Ancak buradaki lifin yüzey alanı arttıkça kendisiyle etkileşme eğilimi de artmaktadır. Bu da liflerin birbirine yapışmasına ve efektif yüzey alanının azalmasına yol açar. Sonuç olarak lifin su tutma ve süspansiyon fonksiyonu düşebilir (Huang vd., 2020).

NUTRAVA™ Citrus Fiber'in doğal pektin içeriği, liflerin birbirine yapışmasını engellemektedir. Böylece lif hem yüksek yüzey alanını korur hem de su tutma ve süspansiyon kapasitesini maksimize eder. NUTRAVA™ Citrus Fiber'deki pektinin görevi tek başına viskozite artırmak değildir. Pektin burada bir yardımcı ajan gibi davranır ve lifin viskozitesine olumlu katkı sağlar. Bu viskozite artışı, yalnızca selüloz ya da pektinin tek başına sağladığı katkının toplamından daha fazladır yani sinerjik bir etki vardır. NUTRAVA™ Citrus Fiber'in eşsizliği, selüloz ve doğal pektinin birlikte oluşturduğu ağ yapısı ve su tutma kapasitesidir. Bu kombinasyon, lifin süspansiyon ve kıvam fonksiyonlarını en üst seviyeye çıkarır. NUTRAVA™ Citrus Fiber'de doğal pektin tek başına viskozite artırıcı değildir, ama selüloz ağını sinerjik olarak güçlendirir, böylece tek başına selüloz veya pektin kullanıldığından daha yüksek viskozite ve daha iyi süspansiyon elde edilir.

Fırıncılık alanındaki başlıca faydaları yüksek su bağlama kapasitesi sayesinde dolguların akmasını ve sinerezisini azaltır. Mikrofibril yapısı ile hafif jel benzeri ağ oluşturarak dolguya doğal bir gövde kazandırır. Meyve partiküllerinin stabilizasyonuna katkı sağlar, homojen görünüm sunar. Şeker azaltılmış sistemlerde ağız dolgunluğunu ve tekstürel algıyı destekler. Narenciye lifi gibi tüketici dostu etiketleme avantajı sunar. Isıl proseslere dayanıklı yapısı ile fırınlama sırasında tekstür kaybını sınırlar.

Kaynaklar

Canteri-Schemin, M.H., Fertoni, H.C.R., Waszczyński, N., Wosiacki, G., 2005. Extraction of Pectin From Apple Pomace, Brazilian Archives of Biology and Technology, 48, 259-266.

Abid, M., Cheikhrouhou, S., Renard, C.M.G.C., Bureau, S., Cuvelier, G., Attia, H., Ayadi, M.A., 2017. Characterization of Pectins Extracted From Pomegranate Peel and Their Gelling Properties. Food Chemistry, 215, 318-325.

Naqash, F., Masoodi, F.A., Rather, S.A., Wani, S.M., Gani, A., 2017. Emerging Concepts in The Nutraceutical and Functional Properties of Pectin: A Review, *Carbohydrate Polymers*, 168, 227-239.

Marić, M., Grassino, A.N., Zhu, Z., Barba, F.J., Brnčić, M., Rimac Brnčić, S., 2018. An Overview of the Traditional and Innovative Approaches for Pectin Extraction From Plant Food Wastes and by-Products: Ultrasound-, Microwaves-, and Enzyme-Assisted Extraction, *Trends in Food Science and Technology*, 76, 28-37.

Chan, S.Y., Choo, W.S., Young, D.J., Loh, X.J., 2017. Pectin as a Rheology Modifier: Origin, Structure, Commercial Production and Rheology, *Carbohydrate Polymers*, 161, 118-139.

Seggiani, M., Puccini, M., Pierini, M., Giovando, S., Forneris, C., 2009. Effect of Different Extraction and Precipitation Methods on Yield and Quality of Pectin, *International Journal of Food Science and Technology*, 44, 574-580.

Pereira, P.H.F., Oliveira, T.Í.S., Rosa, M.F., Cavalcante, F.L., Moates, G.K., Wellner, N., Waldron, K.W., Azeredo, H.M.C., 2016. Pectin Extraction From Pomegranate Peels With Citric Acid, *International Journal of Biological Macromolecules*, 88, 373-379.

Sanderson, G. R., 1990. Gellan gum. In P. Harris (Ed.), *Food gels* (pp. 201-232). London: Elsevier.

Banik, R.M, Santhiagu, A., Upadhyay, S.N., 2007. Optimization of nutrients for gellan gum production by *Sphingomonas paucimobilis* ATCC-31461 in molasses based medium using response surface methodology. *Bioresource Technology*, 98(4), 792-797.

Rhein-Knudsen, N., Ale, M. T., Meyer, A. S., 2015. Seaweed hydrocolloid production: An update on enzyme assisted extraction and modification technologies. In *Marine Drugs*, Vol. 13, Issue 6, pp. 3340-3359.

Yuguchi, Y., Thu Thuy, T. T., Urakawa, H., Kajiwara, K., 2002. Structural characteristics of carrageenan gels: Temperature and concentration dependence. *Food Hydrocolloids*, 16(6), 515-522.

Bajaj, I. B., Survase, S. A., Saudagar, P. S. ve Singhal, R. S., 2007. Gellan gum: fermentative production, downstream processing and applications. *Food Technology and Biotechnology*, 45(4), 341.

Morris, E.R., Nishinari, K., Rinaudo, M., 2012. Gelation of gellan - A review. *Food Hydrocolloids*, 28(2), 373-411.

Huang, J.Y., Liao, J.S., Qi, J.R., Jiang, W.X., Yang, X.Q., 2020. Structural and physicochemical properties of pectin-rich dietary fiber prepared from citrus peel, *Food Hydrocolloids*, 110, 106-140.

Niknezhad, S.V., Asadollahi, M.A., Zamani, A., Biria, D., 2016. Production of xanthan gum by free and immobilized cells of *Xanthomonas campestris* and *Xanthomonas pelargonii*, *International Journal of Biological Macromolecules*, 82, 751-756.

Kalogiannis, S., Gesthimani, I., Maria, L.K., Dimitrios, A.K., George, N.S., 2003. Optimization of xanthan gum production by *Xanthomonas campestris* grown in molasses, *Process Biochemistry* 9, 249–256.

Gıda Uygulamalarında Reometre Bazlı Yenilikçi Uygulamalar

Prof. Dr. Ömer Said Toker

Yıldız Teknik Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Esenler, 34212, İstanbul

Giriş

Günümüzde reolojik analizler, gıda endüstrisinde rutin kalite kontrol süreçlerinin yürütülmesinde temel araçlardan biri olarak kullanılmaktadır. Reolojik veriler; ürün kalite değerlendirmesi, mühendislik hesaplamaları, proses tasarımı ve optimizasyonu, enerji gereksinimlerinin belirlenmesi, pompa dizaynı ve formülasyon optimizasyonu gibi üretim açısından kritik aşamalarda önemli katkılar sağlamaktadır. Bununla birlikte, reometre tabanlı ölçümler yalnızca kalite kontrol amaçlı değil, aynı zamanda çok daha geniş bir uygulama yelpazesinde değerlendirilebilmektedir.

Özellikle gelişmiş reometre cihazlarının sunduğu parametre esnekliği, bu sistemlerin farklı amaçlarla kullanılabilme potansiyelini ortaya koymaktadır. Gıda üretiminde kritik öneme sahip sıcaklık uygulamaları (ısıtma, soğutma, sıcaklık değişim hızları), karıştırma ve basınç gibi proses parametreleri, günümüzde ileri teknolojiye sahip reometre cihazları aracılığıyla yüksek hassasiyetle kontrol edilebilmektedir. Ayrıca, birbirini takip eden farklı proseslerin ardışık şekilde tasarlanarak ölçümlerin gerçekleştirilmesi, endüstriyel uygulamalar için oldukça değerli veriler sunmaktadır.

Bu cihazların sağladığı avantajlar arasında:

- Gerçek proses koşullarının laboratuvar ortamında simüle edilebilmesi,
- Formülasyon ve proses optimizasyonuna yönelik Ar-Ge ve Ür-Ge çalışmalarına doğrudan katkı sağlanması,
- Minimum örnek gereksinimi ile hızlı ve ekonomik analizlerin yapılabilmesi,
- Modüler yapı ve esnekliğin farklı ürün tipleri ve proses senaryolarına kolay uyum sağlaması

yer almaktadır.

Reometre cihazlarının bu şekilde kullanımı, Ar-Ge ve Ür-Ge çalışmalarında önemli avantajlar sunmakta; proses ve formülasyon optimizasyonlarının hızlandırılmasına, uzun vadede ortaya

çıkabilecek değişikliklerin kısa sürede gözlemlenmesine ve minimum örnek miktarı ile sürdürülebilirliğe katkı sağlanmasına olanak tanımaktadır.

Bu çalışmada, reometre cihazlarının farklı amaçlarla kullanımına ilişkin literatürde yer alan araştırmalar üç ana başlık altında özetlenecektir:

1. Proses simülasyonuna yönelik çalışmalar
2. Konvansiyonel yöntemlere alternatif yaklaşımlar
3. Yenilikçi modüler ölçüm sistemleri

1. Proses Simülasyonuna Yönelik Çalışmalar

Gelişmiş reometre cihazları, gıda üretiminde kritik öneme sahip çeşitli proses parametrelerinin hassas biçimde kontrol edilmesine olanak tanımaktadır. Bu cihazlarda;

- ✓ Başlangıç ve son sıcaklık seviyeleri,
- ✓ Sıcaklık artış ve azalma hızları,
- ✓ Mekanik deformasyon düzeyi (shear rate veya strain),
- ✓ Karıştırma hızı (rpm cinsinden),
- ✓ Basınç değerleri,
- ✓ Nem seviyeleri

gibi parametreler doğrudan ayarlanabilmektedir.

Bu parametrelerin reometre cihazları aracılığıyla kontrol edilebilmesi, gıda üretim proseslerinde karşılaşılan koşulların laboratuvar ortamında gerçeğe yakın şekilde simüle edilmesine imkân tanımaktadır. Böylece, proses optimizasyonu, ürün geliştirme ve kalite kontrol çalışmalarında daha güvenilir ve kapsamlı veriler elde edilmesi mümkün olmaktadır.

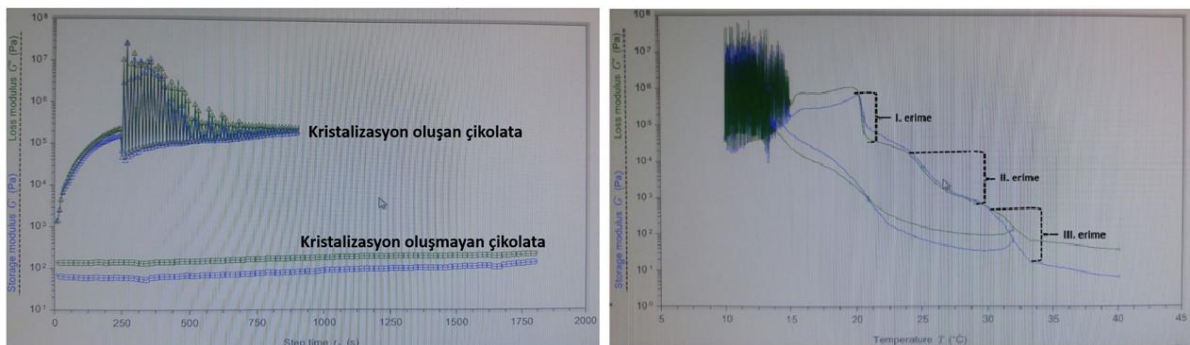
Marşmelov Üretiminin Reometre ile Simüle Edilerek Proses Parametrelerinin ve Albumin Konsantrasyonunun Marşmelov Hamuru Kalite Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi

[Mardani ve ark. \(2022\)](#) gerçekleştirdiği bu çalışma, albümin konsantrasyonu ile çırpma hızının marşmelov hamurunun reolojik özellikleri ve ürün kalitesi üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Farklı albümin seviyeleri (%0.1–%0.9) ve çırpma hızları (250–1000 rpm) kullanılarak hem reometre hem de laboratuvar ölçekli mikser sistemlerinde üretim simülasyonu yapılmış, viskozite, yoğunluk ve mikro yapı parametreleri değerlendirilmiştir. Reometre cihazında nişasta hücresi kullanılarak simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Belirlenen formülasyon nişasta hücresine konularak çırpma işlemi gerçekleştirilmiş ve eş zamanlı olarak reometre ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bulgular, en uygun çırpma hızının 750

rpm olduğunu, albümin ilavesinin viskoziteyi artırarak hava kabarcığı boyutunu küçülttüğünü ve çırpma süresi uzadıkça kabarcıkların küçülmesine rağmen aşırı çırpmanın ağ yapısını bozarak köpük stabilitesini azalttığını göstermiştir. Reometre ile elde edilen sonuçlar, gerçek sistemle uyumlu bulunmuş ve bu cihazın gıda üretiminde yalnızca kalite kontrol değil, aynı zamanda proses simülasyonu, formülasyon optimizasyonu ve Ar-Ge çalışmalarında zaman, enerji ve maliyet tasarrufu sağlayan güçlü bir araç olduğunu ortaya koymuştur.

Kakao Yağı Kristalizasyonuna Proses Etkisinin Reometre ile İncelenmesi

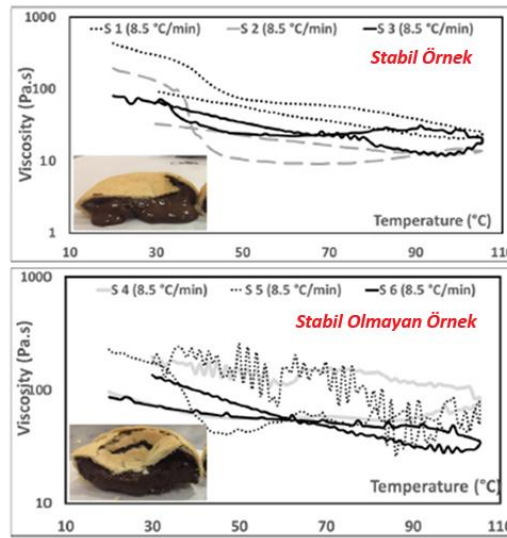
Bölük ve ark. (2024) yılında gerçekleştirdiği bu çalışmada çikolata üretimi açısından oldukça önemli olan kakao yağının kristalleşme sürecinde sıcaklık (22–30 °C) ve deformasyon (strain, %0.1–%5) parametrelerinin etkisi reometre kullanılarak incelenmiş ve elde edilen zamana bağlı depolama modülü (G') verilerini dört parametrelili Gompertz modeli ile uyumlandırarak kristalleşme kinetiğini değerlendirilmiştir. Bulgular, 26°C ve %1 strain koşulunun en yüksek büyüme hızına, en kısa lag time değerine ve çikolata endüstrisinde en çok tercih edilen β_v polimorf tipinin oluşumuna yol açtığını göstermiştir. Yüksek strain değerlerinde kristal ağ yapısının bozulduğu ve G' değerlerinin düştüğü gözlenirken, Gompertz modeli kristalleşme sürecini yüksek uyum katsayısı ($R^2 > 0.96$) ile başarılı şekilde temsil etmiştir. Ayrıca, polimorf tipleri, reometrede uygulanan sıcaklık taraması ile tespit edilmiş ve polarize ışık mikroskobu ile doğrulanmış, böylece reometrenin hem ön kristalleşme sürecini gözlemlemek hem de polimorf tiplerini belirlemek için güçlü bir araç olduğu ortaya konmuştur (Şekil 1). Bu sonuçlar, çikolata üretiminde proses optimizasyonu, formülasyon geliştirme ve Ar-Ge çalışmalarına önemli katkılar sağlamaktadır.



Şekil 1. Reometre ile kristalizasyon takibi ve polimorf çeşidinin belirlenmesi

Kakao bazlı dolgu kremasının ısıl stabilitesinin reometre ile belirlenmesi

Üniversite ve sanayi işbirliği kapsamında gerçekleştirilen bu çalışmada, kakao bazlı dolgu kremalarının bisküvi, kek ve kurabiye gibi ürünlerde pişirme sonrası akışkanlık ve kıvamlarını koruyup koruyamadığını belirlemek amacıyla reometre kullanılarak yeni bir yöntem geliştirmiştir. Piyasadan temin edilen üç stabil ve üç stabil olmayan kremada, 20–105°C ısıtma ve 105–30°C soğutma döngüleri simüle edilerek reolojik ve tekstürel analizler yapılmış, özellikle sıcaklıkla viskozite değişimi ve grafikteki dalgalanmalar değerlendirilmiştir (Şekil 2). Sıcaklık başlangıç ve bitiş değerleri ve sıcaklık artış ve azalış hızları, gerçek koşullarda denemeler yapılarak belirlenmiştir. Pişirme stabil kremaların ısıtma/soğutma sonrası viskozite değişim yüzdesinin düşük olduğunu ve dalgalanma göstermediğini, buna karşılık stabil olmayan kremaların belirgin dalgalanmalar ve yüksek viskozite değişimleri sergilediğini ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar gerçek uygulamalarla örtüşmüştür.



Şekil 2. Stabil ve stabil olmayan krema örneklerinin viskozite değerinin sıcaklığa bağlı değişimi

Gerçek uygulamada kurabiye uygulaması yapılmakta enerji ve ürün açısından kayıplar olmaktadır. Bundan dolayı da hem enerji ve girdi maliyeti azalmakta ve çok düşük örneklerle süreç tamamlanmaktadır. Sonuç olarak reometre, minimal örnek, iş gücü ve zaman gereksinimiyle dolgu kremalarının pişirme stabilitesini belirlemede etkili bir araç olarak önerilmektedir (Aktar ve ark., 2025).

2. Konvansiyonel Analiz Yöntemlerine Alternatif Olabilecek Reometre Temelli Yöntemler Geliştirilmesi

Konvansiyonel kalite analizlerinin ötesine geçen reometre tabanlı yenilikçi yöntemler, gıda sistemlerinin fiziksel davranışlarının daha hızlı, daha hassas ve daha az örnek gereksinimiyle değerlendirilmesine olanak tanımaktadır. Bu yaklaşımlar, zaman ve kaynak tasarrufu sağlamanın yanı sıra, proses koşullarına yakın simülasyonlarla daha gerçekçi verilerin elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Ayrıca formülasyon ve yapı-fonksiyon ilişkilerinin ayrıntılı biçimde incelenmesine imkân tanırken, geleneksel testlerin sınırlılıklarını aşarak ürün geliştirme süreçlerinin hızlandırılmasına ve optimizasyonuna katkı sunmaktadır. Dolayısıyla reometre destekli analizler, yalnızca konvansiyonel yöntemlere alternatif değil, aynı zamanda daha hassas ve gerçekçi bir kalite kontrol yaklaşımı olarak gıda mühendisliği ve ürün geliştirme çalışmalarında öne çıkmaktadır. Aşağıda bu alanda gerçekleştirilen bazı çalışmalara örnekler verilmiştir.

Termal Döngü Analizi Kullanılarak Reometre ile Emülsiyon Stabilesinin Belirlenmesi

Tekin ve ark. (2020) gerçekleştirdikleri bu çalışmada, yağ-su emülsiyonlarının fiziksel stabilesini hızlı ve güvenilir biçimde belirlemek amacıyla reoloji temelli termal döngü testi uygulanmıştır. Farklı konsantrasyonlarda ksantan gam içeren model emülsiyonlar, düşük sıcaklık (5–23 °C) ve yüksek sıcaklık (23–45 °C) arasında tekrarlanan ısıtma-soğutma döngülerine tabi tutulmuş ve kompüks modülü (G^*) değişimleri incelenmiştir. Sonuçlar, düşük konsantrasyonlu örneklerde G^* değerlerinde büyük dalgalanmalar ve faz ayrılması gözlenirken, orta düzeyde ksantan gam içeren örneklerin daha kararlı yapılar sergilediğini göstermiştir. Termal döngü testi ile elde edilen bulgular, görsel analiz, zeta potansiyeli, parçacık boyutu dağılımı ve polidispersite indeksleriyle uyumlu bulunmuş; böylece bu yöntem, uzun süreli depolama testlerine kıyasla çok daha kısa sürede (1–2 saat) emülsiyon stabilesini değerlendirebilen pratik ve güvenilir bir alternatif olarak önerilmiştir.

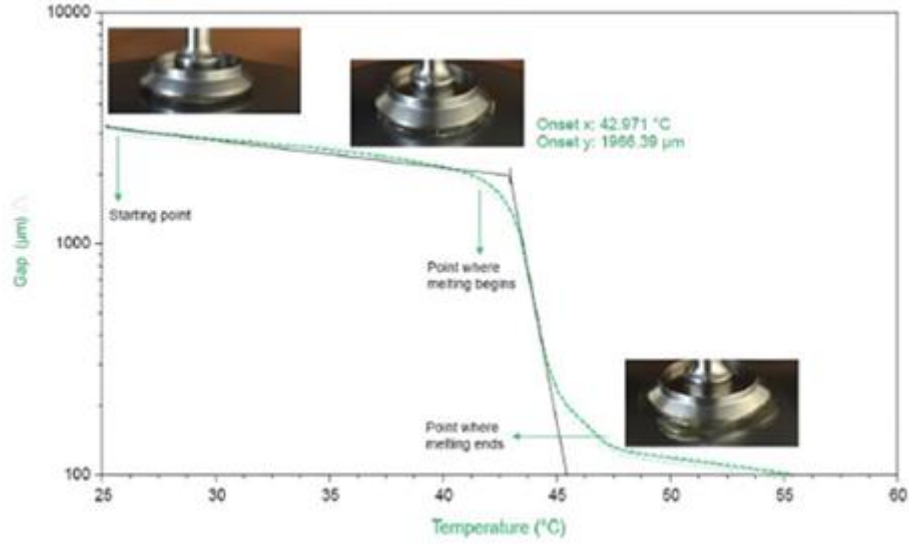
Tohumlama Tekniği ile Balda Yapılan Tağışın Reometre ile Tespit Edilmesi

Piyasada en fazla tağışe uğrayan ürünlerden birisi olan balda tağışın belirlenmesine yönelik gerçekleştirilen bu çalışma, ayçiçeği balında hileyi belirlemek amacıyla tohumlama (seeding) yöntemi ile yapılan öncü bir araştırmadır. Doğal, doğrudan ve dolaylı olarak hileli bal örnekleri ile bunların karışımları farklı oranlarda kristalize bal ilavesiyle incelenmiş; fizikokimyasal özellikler, FT-IR spektrumları, termodinamik parametreler (T_p ve ΔH), reolojik davranışlar (G'

ve G'' modülleri) ve mikroyapı analizleri değerlendirilmiştir. Bulgular, doğal ayçiçeği ballarının hileli ballara kıyasla daha hızlı ve homojen kristalleştiğini, viskoelastik davranışlarının belirgin şekilde farklı olduğunu ve mikroyapılarının daha düzenli olduğunu göstermiştir. DSC analizlerinde adulterasyonun kristalleşme derecesini ve entalpi değerlerini düşürdüğü belirlenmiş, reolojik ölçümlerde ise doğal ballarda G' değerlerinde çok daha yüksek artışlar gözlenmiştir. Sonuç olarak, balın kristalleşme davranışının reometre ile incelenmesiyle hile tespiti yapılabileceği ve bu yöntemin pahalı, zaman alıcı ve karmaşık analizlere alternatif olarak endüstride uygulanabileceği ortaya konmuştur (Kurt ve ark., 2020).

Jelly tarzı Yumuşak Şekerleme Ürünlerinin Erime Özelliklerinin Belirlenmesine Yönelik Reometre Temelli Yeni bir Yöntem Geliştirilmesi

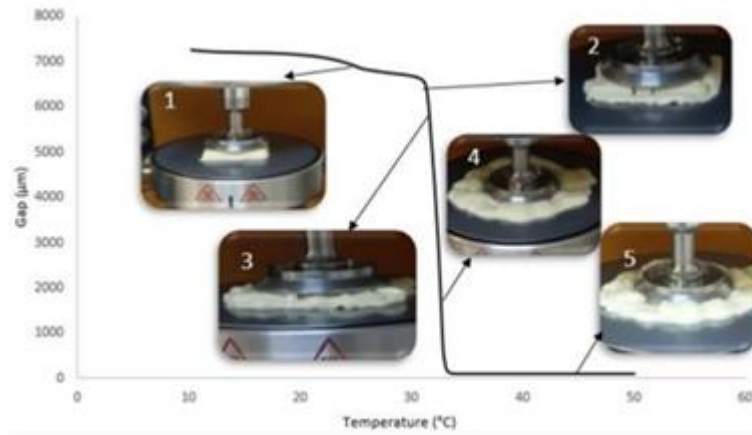
Atik ve ark. (2022) tarafından gerçekleştirilen bu çalışma, jelatin bazlı yumuşak şekerlemelerin (gummy) erime özelliklerini belirlemek için yeni bir reometre tabanlı yöntem geliştirmeyi amaçlamaktadır. Geleneksel yöntemler (DSC, fırın, su banyosu, PLM) ile karşılaştırılan bu yaklaşım, reometrede katı numunenin sıcaklık artışıyla dikey deformasyonunu ve gap–sıcaklık grafiği üzerinden erime başlangıç noktasını (onset) analiz etmeye dayanmaktadır. Bu geliştirilen yöntemin temel mantığı, jelatin bazlı gummy örneklerinin erime sıcaklığını reometre kullanarak doğrudan gözlemlemek üzerine kuruludur. Yöntem, reometrede katı haldeki numunenin sıcaklık artışıyla erimesi sonucu üst ve alt plakalar arasındaki mesafenin (gap) azalmasını takip eder. Gap–sıcaklık grafiğinde erimenin başladığı nokta “onset” olarak tanımlanır ve bu değer ürünün erime sıcaklığı olarak kabul edilir (Şekil 3). Deneylerde farklı ısıtma hızları (0.5–5 °C/dk) ve numune kalınlıkları (1000–4000 µm) kullanılmış, en doğru sonuçların 1 °C/dk ısıtma hızı ve 4000 µm kalınlıkta elde edildiği belirlenmiştir. Yöntem, ticari jelatinli gummy örneklerinde yaklaşık 45 °C erime sıcaklığını yüksek hassasiyetle (± 1 °C) saptamış ve diğer tekniklerle doğrulanarak reometrenin DSC’ye kıyasla daha iyi sonuç verdiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak geliştirilen reometre tabanlı yöntem, jelatinli şekerlemelerin erime sıcaklığını hızlı, hassas ve tekrarlanabilir biçimde belirleyerek kalite kontrol ve ürün geliştirme süreçlerine önemli katkılar sağlayabilecek pratik bir alternatif olarak öne çıkmaktadır.



Şekil 3. Geliştirilen yöntemle ait şematik gösterim

Beyaz Çikolatada Oluşan Kakao Yağı Kristal Çeşidinin Reometre ile Belirlenmesi

Bu çalışma, beyaz çikolatada bulunan kakao yağı kristal tiplerinin belirlenmesi amacıyla reometre tabanlı bir yöntem geliştirmeyi hedeflemiştir. Kakao yağı kristalizasyonu, çikolatanın tekstür, parlaklık ve erime davranışı gibi kalite özelliklerini doğrudan etkileyen kritik bir süreçtir. Araştırmada, beyaz çikolata örnekleri farklı sıcaklıklarda eritilmiş (37 °C ve 50 °C) ve ardından çeşitli koşullarda (25 °C, 4 °C, -18 °C) katılaştırılmıştır. Bu çalışmada da bir önceki çalışmada belirtilen gap yöntemi kullanılmıştır (Şekil 4). Reometre ile yapılan sıcaklık taramaları sonucunda örneklerin erime ve katılaşma davranışları incelenmiş, ancak yalnızca reolojik verilerle kristal tiplerinin net olarak belirlenemediği görülmüştür. Bu nedenle, kakao yağının yağ asidi profili (özellikle palmitik, stearik ve oleik asitlerin oranları) gibi kimyasal bileşenler de değerlendirmeye alınmıştır. Sonuç olarak, kakao yağı kristal tiplerinin doğru şekilde belirlenebilmesi için reolojik analizlerin kimyasal ve mikroyapısal verilerle desteklenmesi gerektiği vurgulanmıştır. Bu yaklaşım, çikolata üretiminde kalite kontrol ve ürün optimizasyonu açısından önemli bir katkı sunmaktadır (Yucel ve ark., 2022).



Şekil 4. Beyaz çikolatanın erime profilini, reometre boşluk mesafesindeki azalmayı ve örneğin farklı sıcaklıklardaki erime durumunu gösteren fotoğraflar

3. Yenilikçi Modüler Ölçüm Sistemleri

Her alanda olduğu gibi reometre cihazları üreticileri de ihtiyaçlar ve gelişmeler doğrultusunda reometre cihazları için modüler yenilikçi ölçüm sistemleri geliştirerek reometre cihazlarının daha kapsamlı bir şekilde kullanımına olanak sağlamaktadırlar. Bu ölçüm sistemleri sayesinde reometre cihazları çok farklı bir cihaza da dönüşebilmektedir. Reometre cihazlarına entegre edilebilen modüler ölçüm sistemleri sayesinde yalnızca reolojik veri üretmekle kalmaz; aynı zamanda gıda üretim proseslerine ve kalite analizlerine yönelik uygulamaları çok yönlü ve dinamik bir yapıya kavuşturur.

Bu amaçla geliştirilen bazı ölçüm sistemleri aşağıda özetlenmiştir.

Reo-mikroskop: Reo-mikroskop, reometre ile mikroskopun birleşimini ifade eden bir sistemdir. Bu cihaz sayesinde bir numunenin akış ve deformasyon davranışı reolojik olarak ölçülürken aynı anda mikroyapısal değişimleri mikroskop altında gözlemlenebilir. Böylece gıda, polimer veya biyolojik örneklerde kristal oluşumu, faz geçişleri ve yapı-fonksiyon ilişkileri hem nicel verilerle hem de görsel kanıtlarla eş zamanlı olarak değerlendirilebilir.

Triboloji: Yüzeyler arasındaki sürtünme, aşınma ve yağlama olaylarını inceleyen bilim dalıdır. Gıda alanında triboloji, özellikle ağızda kayma hissi, kremsilik, pürüzsüzlük veya yapışkanlık gibi duyuşal özelliklerin anlaşılmasında kullanılır.

Toz Akış Ölçüm Sistemi: Gıda endüstrisinde tozlar (kakao, un, şeker gibi toz gıdalar ve bunların karışımları) önemli ürünler arasında yer almaktadır. Reometreye entegre bir şekilde kullanılabilen Toz akış sistemi, toz halindeki gıda veya endüstriyel hammaddelerin akışkanlık özelliklerini incelemek için kullanılan sistemdir. Bu ölçüm sistemi ile tozların akış hızı, serbest düşme davranışı, sıkışma eğilimi ve topaklanma gibi özellikleri ölçülür. Bu özellikler, tozların akış davranışını karakterize edip gıda tozlarının işlenebilirliğini, paketleme ve taşıma sırasındaki akış davranışını anlamak açısından önem arz etmektedir. Gıda tozlarının akış özellikleri kalite kontrol ve proses tasarımı açısından kritik öneme sahiptir. Toz formundaki gıdaların üretim hattında sorunsuz ilerlemesi ve homojen ürün elde edilmesi için kullanılan pratik bir ölçüm yöntemidir.

Nem opsiyonu: Ölçüm ortamının nemini ayarlayarak farklı bağıl nem koşullarında gıda örneklerinin reolojik davranışlarının ölçülmesine olanak sağlamaktadır. Bu şekilde proses veya depolama koşulları gerçeğe daha yakın şekilde sağlanarak ürün reolojik özellikleri incelenmektedir. Bu nem opsiyonu normal reolojik ölçümlerde kullanılabildiği gibi toz akış sistemi ile entegre olarak da çalışabilmektedir.

Yüksek Basınç Reolojisi: Gıda üretim süreçlerinde farklı basınç koşullarında gerçekleştirilen pişirme işlemleri, ürünlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Özellikle nişasta gibi temel gıda bileşenlerinin yapısal davranışları, uygulanan ortam basıncına bağlı olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Bu nedenle, farklı basınç koşullarında gıda bileşenlerinin jelleşme davranışları ve diğer reolojik özelliklerinin ayrıntılı biçimde incelenmesi, hedeflenen kalite parametrelerine sahip ürünlerin geliştirilmesi açısından kritik bir rol oynamaktadır. Yüksek basınç reolojisi, gıda sistemlerinin işlenebilirliğini, tekstürel özelliklerini ve fonksiyonel performansını anlamada güçlü bir analitik araç olarak öne çıkmaktadır.

Sonuç

Görüldüğü gibi reolojik verileri çok çeşitli alanlarda değerlendirmek mümkündür. Reolojik analizler, gıda endüstrisinde yalnızca rutin kalite kontrol süreçlerinin yürütülmesinde değil, aynı zamanda ürün geliştirme ve proses optimizasyonuna yönelik ileri düzey araştırmalarda da kritik bir rol üstlenmektedir. Literatürde yer alan çalışmalar, reometre tabanlı yöntemlerin

farklı sıcaklık, basınç ve karıştırma koşullarını yüksek hassasiyetle simüle edebilme kapasitesine sahip olduğunu ve bu sayede gerçek üretim ortamlarının laboratuvar koşullarında yeniden oluşturulabildiğini göstermektedir. Bu durum, hem konvansiyonel yöntemlere alternatif yaklaşımların geliştirilmesine hem de yenilikçi modüler ölçüm sistemlerinin endüstriyel uygulamalara entegre edilmesine olanak tanımaktadır. Özellikle nişasta, kakao yağı, bal ve jelatin gibi gıda bileşenleri üzerinde gerçekleştirilen reometre tabanlı çalışmalar, ürünlerin jelleşme, kristalleşme, erime ve akış davranışlarının ayrıntılı biçimde ortaya konulmasını sağlamış; böylece formülasyon optimizasyonu ve proses tasarımına doğrudan katkı sunmuştur. Ayrıca, minimum örnek gereksinimi ile hızlı ve ekonomik analiz yapılabilmesi, sürdürülebilirlik açısından önemli bir avantaj olarak öne çıkmaktadır. Sonuç olarak, reometre cihazlarının sunduğu parametre esnekliği ve modüler yapı, gıda endüstrisinde hem Ar-Ge hem de Ür-Ge çalışmalarına stratejik bir değer kazandırmaktadır. Bu cihazların farklı amaçlarla kullanımına ilişkin literatür bulguları, reolojik analizlerin gelecekte gıda üretiminde daha da merkezi bir konuma yerleşeceğini ve ürün kalitesinin yanı sıra endüstriyel verimliliğin artırılmasında da belirleyici bir araç olacağını ortaya koymaktadır.

Kaynaklar

- Aktar, B. U., Karakaş İshak, A., Ozmen, D., Tuna Ağırbaş, H. E., Atıl, O., & Toker, O. S. (2025). Can rheometer be used for determination of baking stability of cocoa based filling creams. *Journal of Food Engineering*, 387, 112320.
- Bölük, E., Akdeniz, E., Gunes, R., Palabiyik, I., Konar, N., & Toker, O. S. (2024). Determination of the process effect on cocoa butter crystallization by rheometer: Kinetic modeling by Gompertz equation. *Journal of Food Science*, 89(5), 2867–2878.
- Kurt, A., Palabiyik, I., Gunes, R., Konar, N., & Toker, O. S. (2020). Determining honey adulteration by seeding method: An initial study with sunflower honey. *Food Analytical Methods*, 13, 952–961.
- Mardani, M., Kilicli, M., Toker, O. S., Yeganehzad, S., Niazmand, R., Palabiyik, I., & Konar, N. (2022). Investigation of process parameters and albumin concentration as foaming agent on quality of marshmallow dough: production simulation with rheometer. *Rheologica Acta*, 61, 339–351.

- Sözeri Atik, D., Demirci, M., Toker, O. S., & Palabiyik, I. (2022). Development of a novel rheological method for determining melting properties of gelatin-based gummies. *International Journal of Biological Macromolecules*, 209, 385–395.
- Tekin, Z. H., Avci, E., Karasu, S., & Toker, O. S. (2020). Rapid determination of emulsion stability by rheology-based thermal loop test. *LWT - Food Science and Technology*, 122, 109037.
- Yucel, E., Tirpanci Sivri, G., Palabiyik, I., & Tasan, M. (2022). A rheometer-based method to determine the crystal types of cocoa butter in white chocolate. *European Food Research and Technology*, 248, 183–192.

Reoloji Biliminin Endüstriye Üretim, Verimlilik ve Finansal Katkıları

Cengiz Altop

Yıldız Holding, Northstar Innovation, Üsküdar, İstanbul

Reoloji, maddenin akış davranışını inceleyen bilim dalıdır. Endüstrinin pek çok alanında üretim süreçleri akışkanlar üzerine kuruludur. Newton'un viskozite kanununa uyan akışkanlarla çalışan sektörler için üretim süreçleri genellikle sorunsuz ilerler. Ancak Newton'un viskozite kanununa uymayan akışkanlar, özellikle gıda, kozmetik ve kimya endüstrilerinde çeşitli üretim problemlerine neden olabilir. Bu nedenle, bu tür akışkanların reolojik özelliklerinin doğru şekilde ölçülmesi ve yorumlanması, üretimin sürekliliği ve ürün kalitesinin korunması açısından hayati önem taşır.

Newton Kanununa Uymayan Akışkanlar ve Örnekleri

Çikolata, ketçap ve ayran gibi ürünler Newton'un viskozite kanununa uymayan akışkanlara örnektir. Özellikle çikolata, karmaşık yapıda bir süspansiyondur. Bu nedenle akış davranışı, uygulanan kayma hızına bağlı olarak değişir (Tablo 1).

Tablo 1. Newton kanununa uyan ve uymayan gıdaların farklı kayma hızlarındaki viskoziteleri

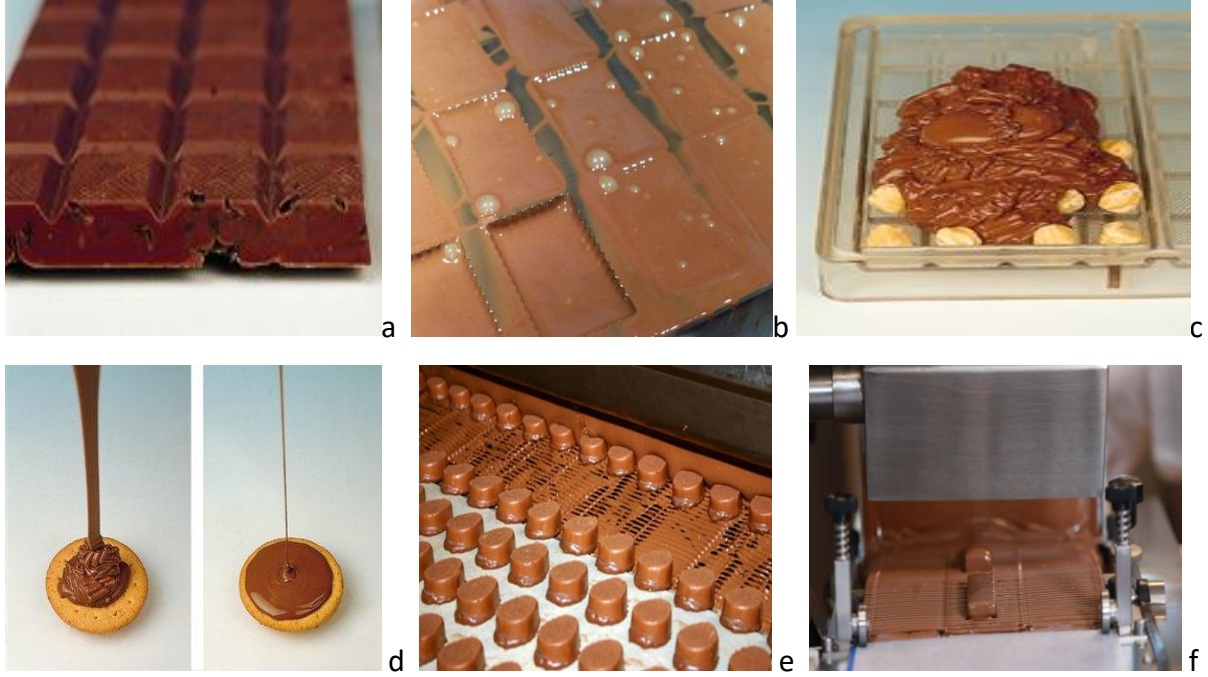
Kayma hızı	0,5 d/dak	1 d/dak	5 d/dak	10 d/dak	20 d/dak	50 d/dak	100 d/dak
Süt	120 cP	120 cP	120 cP	120 cP	120 cP	120 cP	120 cP
Çikolata	132000 cP	76000 cP	23600 cP	15000 cP	10000 cP	6480 cP	5020 cP

Newton kanuna uyan davranış = her hızda sabit viskozite
Newton kanununa uymayan davranış= her hızda farklı viskozite

Çikolatada Reolojik Problemler

Çikolata üretiminde reolojik sorunlar genellikle kalıplama, kaplama veya depozit işlemleri sırasında ortaya çıkar. Kalıplama esnasında yüzeyde delikler, mat görünüm, kalıptan zor ayrılma, hava kabarcıkları veya kalıbın tam dolmaması gibi problemler gözlenebilir (Şekil 1).

Kaplama işlemlerinde ise yanlış kaplama kalınlığı, yüzeyde dalgalanma, çapak oluşumu veya fındığın/bisküvinin tam kaplanmaması gibi hatalar meydana gelebilir (Şekil 1). Bu hatalar sonucunda kalıpları temizlemek üretime vakit kaybettirmekte, diğer reolojiyle ilgili sorunlar üretimin durmasına sebep olabilmektedir. Bu tür hataların kökeninde genellikle **akma gerilimi (yield stress)** veya **plastik viskozite** değerlerindeki dengesizlikler yatar.



Şekil 1. Çikolata üretiminde reolojik problemler: a) Tablet yüzeyinde delikler, yüzey parlak değil, b) Çikolatada hava kabarcıkları var, c) Çikolata kalıbın içine yayılmıyor ve fındıkları kaplamıyor, d) Yanlış kaplama kalınlığı, çok az veya çok fazla kaplama, e) Çapak/ayak oluşumu, f) Yüzyede dalga olmaması

Dolayısıyla çikolatanın reolojik özelliklerinin belirlenmesi doğru şekilde ölçülmesi ve ölçüm sonuçlarının doğru değerlendirilmesi çok önemlidir. Çünkü farklı kayma hızlarında farklı viskozite değerlerine sahip olan çikolata sıvı yağ fazı içinde katı partiküllerin süspansiyonundan oluşan bir yapıdadır (Şekil 2). Formülasyon, proses koşulları özellikle sıcaklık ve süspansiyon içindeki katı partiküllerin boyutu çikolatanın viskozitesini değiştirir. Çikolata üretiminde Şekil 1’de verilen sorunların yaşanmaması için hangi işlemde hangi kayma hızı kullanıldığını bilmek ve çikolatanın o kayma hızındaki viskozitesini kullanmak gereklidir.



Şekil 2. Çikolata bileşenleri

Şekil 3'te çikolata üretimindeki farklı proseslerin yavaştan hızlıya dopru farklı kayma hızlarına sahip oldukları görülmektedir. Örneğin kalıplama işleminde kayma hızı $0,5 \text{ s}^{-1}$ iken (çok yavaş), kaplama işlemindeki kayma hızları $25\text{-}30 \text{ s}^{-1}$ aralığındadır.

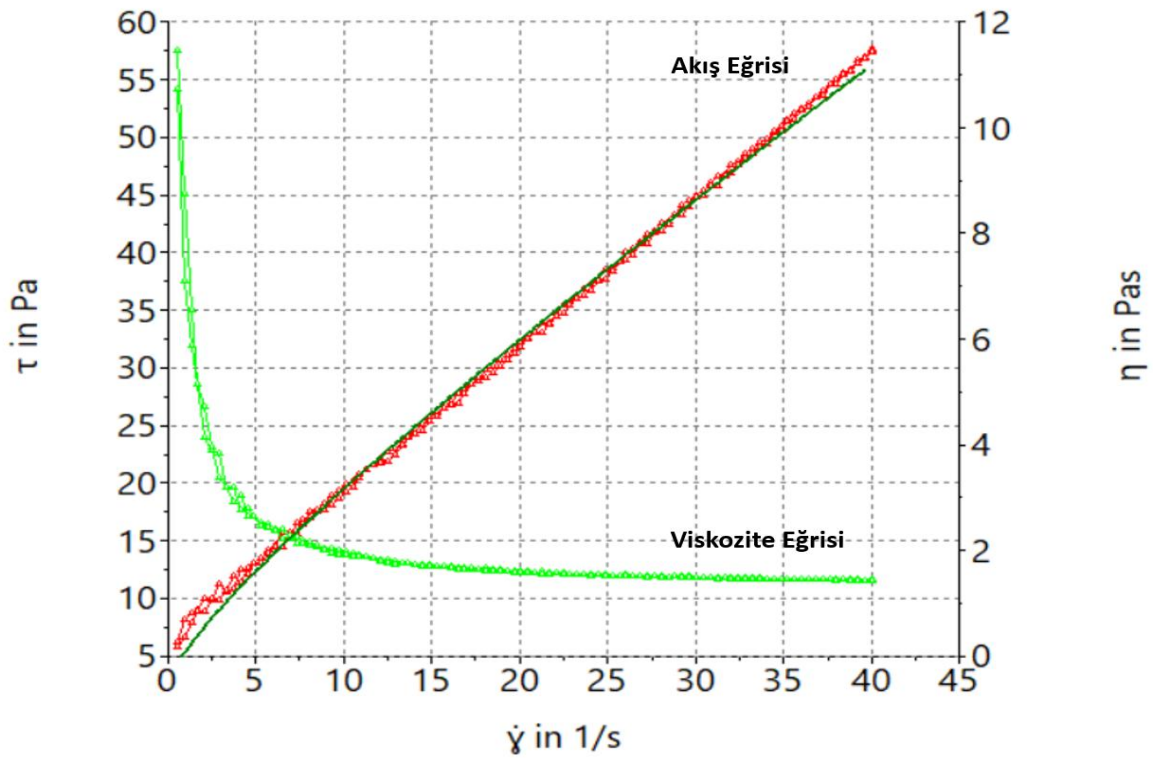
Çikolata farklı üretim makinalarında farklı hızlarda hareket eder



Şekil 3. Çikolata üretiminde farklı proseslerin kayma hızları farklıdır.

Reolojik Ölçüm Yöntemleri

Geçmişte basit viskozimetreler (örneğin Ford cup veya Brookfield cihazları) kullanılırken, günümüzde farklı hızlarda ölçüm yapabilen modern reometreler tercih edilmektedir. Bu cihazlar, çubuk ve kabın birbirine yakın çaplarda olduğu, yazılım kontrollü sistemlerdir ve akışkanın farklı kayma hızlarındaki davranışını detaylı biçimde ölçerler. Newtonyen olmayan akışkanların ayrıntılı reolojik karakterizasyonu için genellikle **akış eğrileri** (τ - $\dot{\gamma}$ grafikleri) ve **viskozite eğrileri** (η - $\dot{\gamma}$ grafikleri) çizilir (Şekil 4).



Şekil 4. Akış ve viskozite eğrileri

Çikolatanın viskozitesini değerlendirmek için üç temel yöntem vardır:

1. Tek hızda viskozite ölçümü

Eski Amerikan standardına göre 20 dev/dak hızda yapılan ölçüm yalnızca tek bir hız için bilgi sağlar. Newton'un viskozite kanununa uymayan çikolata gibi akışkanlarda bu yöntem yetersiz kalır (Şekil 5)

Şekil 5'te orta hızlara karşılık gelen tek kayma hızında yapılan ölçüm sonucunda, diğer kayma hızlarında viskozite bilgisi elde edilemediği gösterilmiştir. Bu Newtonyen olmayan bütün akışkanlar için geçerlidir, çünkü Newtonyen olmayan akışkanlar her kayma hızında farklı viskoziteye sahiptir. Dolayısıyla Newtonyen olmayan bir reolojik davranışa sahip çikolata, her kayma hızında farklı viskoziteye sahip olacağından, tek bir kayma hızı noktasında viskozite ölçümü yapılması, diğer kayma hızlarındaki viskozite bilgisinin elde edilememesine neden olacaktır.

Tek hızda viskozite ölçümü metodunun verdiği bilgi

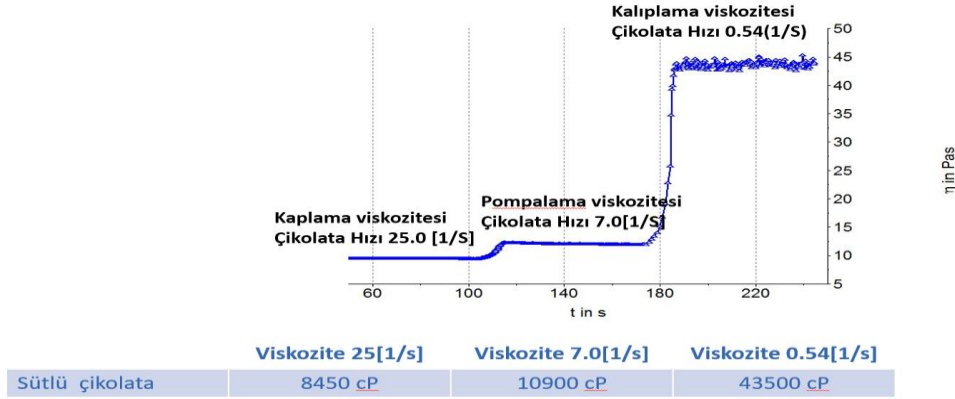


Şekil 5. Tek kayma hızında elde edilen viskozite bilgisi

2. Değişik kayma hızlarında viskozite ölçümü

Farklı hızlarda (örneğin 0.5, 7 ve 25 s⁻¹) yapılan ölçümlerle sırasıyla kalıplama, pompalama ve kaplama süreçleri için ayrı viskozite değerleri elde edilir (Şekil 6). Bu yöntem daha gerçekçi bilgiler sağlar. Bu şekilde çikolatanın kaplanmasında 8000-9000 cP, kalıplanmasında 42000-45000 cP aralığı alınabilir. Kaplama çikolatası için 25 s⁻¹ kayma hızında 12000 cP viskozite çıkıyorsa, viskozite yüksek olarak değerlendirilir ve formülasyon ona göre düzeltilir.

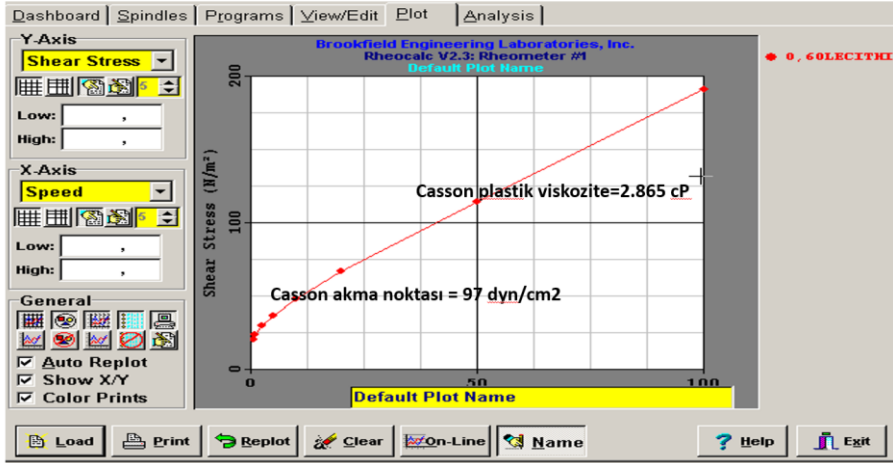
Tanımlı 3 farklı çikolata hızında viskozite ölçme metodu



Şekil 6. Üç farklı kayma hızında yapılan viskozite ölçüm sonucu

3. Akış eğrisi (flow curve) ölçüm yöntemi

En kapsamlı yöntemdir. Farklı hızlarda yapılan ölçümlerden akış eğrisi oluşturulur ve Casson modeli kullanılarak **akma gerilimi** ve **plastik viskozite** hesaplanır (Şekil 7). Bu iki parametre çikolatanın tüm üretim aşamalarındaki davranışını öngörmeye olanak verir.

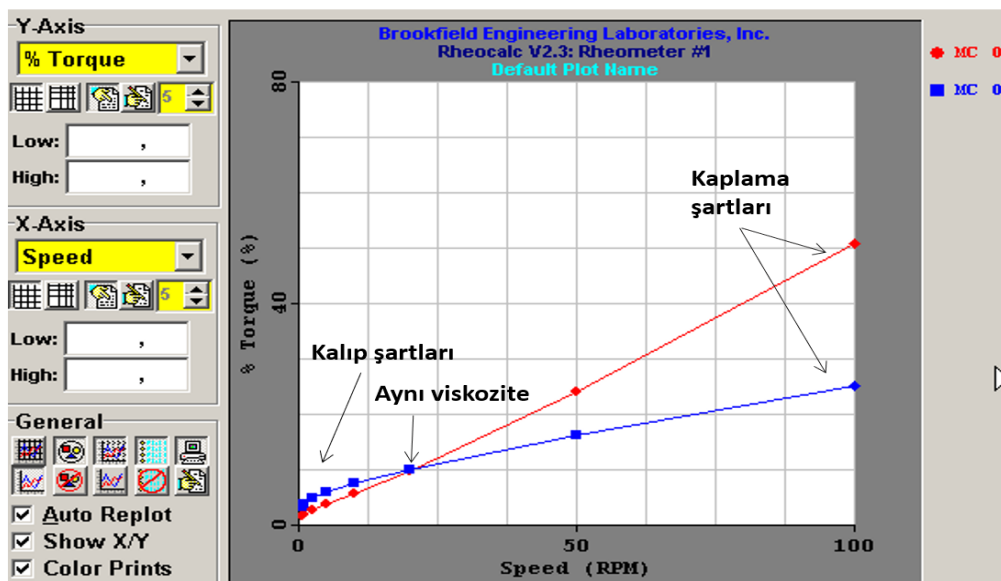


Şekil 7. Akış eğrisi çizilerek çikolata reolojisinin belirlenmesi

Akış eğrisi metodu çikolatanın farklı üretim makinalarında akabileceği tüm hızları tarayarak Casson “Yield Value” (Akma Noktası/Gerilimi) “YV” ve “Plastik Viskozite” “PV” değerlerini hesaplar. Bu metod çikolatanın düşük, orta ve yüksek tüm hızlarda nasıl bir akış davranışı sergileyeceği ile ilgili tüm bilgileri vermektedir. Eğitimli bir operatör için bu sonuçlar çikolata

hakkındaki tüm bilgiyi verir. Bu nedenle bu metod çikolata, kokolin, krema gibi ürünlerin ölçümü için uygun ve en iyi metoddur.

Şekil 8'de reolojik ölçüm sonuçları kırmızı ve mavi ile belirtilmiş iki çikolata rneği görülmektedir. lm sonuçlarına göre 20 rpm'de her iki çikolatanın viskozitesi aynıdır. Ancak, sadece bir veya iki noktada değil geniş bir kayma hızı aralığında viskozite ölçümü yapıldığında, her iki çikolata örneğinin kalıplama ve kaplama şartlarındaki viskozitelerinin çok farklı olduğu belirlenmiştir. Sadece bir noktada aynı viskozite değerine sahip bu iki farklı çikolatadan, kırmızıyla gösterileni kalıplama şartlarında mükemmel bir viskoziteye sahipken, mavi ile gösterilen çikolata rneği kaplama şartlarına çok uygun bir viskoziteye sahiptir. Eğer bir noktada aynı viskoziteye sahip bu iki farklı formülasyondan mavi renkle gösterileni kalıplamada, kırmızıyla gösterileni kaplamada problem yaratacaktır. Başka bir deyişle sadece bir noktadaki viskozitelerinin aynı olmasına bakılırsa hem bu iki çikolatanın farklı formülasyonlara ve farklı viskozitelere sahip olduğu görülemeyecek hem de kaplama/kalıplama proseslerinde neden problem yaşandığı anlaşılmayacaktır.



Şekil 8. Kalıplama ve kaplama kayma hızlarında farklı viskoziteye sahip olan çikolata örneklerinin reolojik lmleri

Casson Modeli ve Yorumlanması

Casson modeli, çikolata gibi Newton dış akışkanların davranışını tanımlamakta en yaygın kullanılan modeldir.

- **Casson Akma Noktası (Yield Value):** Çikolatayı harekete geçirmek için gereken minimum kuvvet.
- **Casson Plastik Viskozite:** Hareket halindeki çikolatanın sabit hızda akması için gereken kuvvet.

Bu parametreler, üretim hattındaki akışın karakterini anlamayı sağlar. Örneğin akma gerilimi yüksek bir çikolata kalıplamaya uygun değilken, düşük akma gerilimi kaplama için daha uygundur.

Reoloji Kaynaklı Problemler ve Çözümleri

- **Kalıplama Problemleri:**

Sorun: Akma gerilimi çok yüksek.

Hata: Lesitin miktarını artırmak akma gerilimini daha da yükseltir.

Çözüm: Akma gerilimini düşüren PGPR gibi emülgatörlerin eklenmesi.

- **Kaplama Problemleri:**

Sorun: Akma gerilimi çok düşük veya çok yüksek.

Çözüm: PGPR ve lesitin oranlarını dengelemek, yağ miktarını ayarlamak.

Sıkça Sorulmayan Sorular ve Cevapları

1. Neden Casson modeli kullanılmalıdır?

Newton kanununa uymayan çikolatanın farklı hızlardaki ölçümlerine en iyi uyum sağlayan model Casson modelidir. Doğru yapılan bir ölçümde Casson modeli %99 civarı uyum sağlar.

2. Hangi aralıkta ölçüm alalım, kaç noktada ölçüm alalım?

Çikolata kalıpta yaklaşık 0.5 s^{-1} hızla, kaplama sonrası üflemede $25-30 \text{ s}^{-1}$ hızla akar. Püskürtme uygulaması varsa 35 s^{-1} veya üstüne çıkabilir. O nedenle bu aralıkta ölçüm yapmak doğru olacaktır. 100 s^{-1} hızlara kadar çıkmanın hiç gereği yoktur çünkü çikolata hiçbir uygulamada o hızlara ulaşmaz. Öte yandan eğrinin eğimini bozabilecek yanlış ölçümler olabilir. Verdiğimiz aralığın dışına çıkmak gereksiz ve yanlışlığa yol açabilecekse, aralığın tamamını değil çok küçük bir bölümünü kullanmak da yanlıştır. Örneğin, ağırlıklı olarak kaplama çalışan bir firma sadece $2-10 \text{ s}^{-1}$ arasında ölçüm yapıyorsa kaplamadaki yüksek hızlarda hiç veri almıyorsa bu da

yanlışlara yol açabilir. Alınacak veri sayısı kullanılan reometreye göre değişir. Brookfield’de genellikle 7-8 nokta kullanılır. Mümkün olduğunca aralığın tamamına yayılmalı noktalar. Diğer reometrelerde genelde $0.5\ s^{-1}$ hızdan $30-35-40\ s^{-1}$ hıza 3 dakikada çıkılır ve tercihe göre 100 nokta alınabilir.

3. Hangi sıcaklıkta ölçüm yapalım?

Genelde ikolata için 40°C ’de ölçüm yapılır. Bu sıcaklıkta ölçüm yapılmasının amacı tüm yağ kristallerinin erimiş olmasını sağlamaktır. ICA Metod 46’da ölçüm sıcaklığının 40°C olması öneriliyor. Ancak bazı firmalar 42°C ’de, bazı firmalar 43°C ’de ölçüm yapıyorlar. Viskozite sıcaklığa bağlı olarak değiştiği için hep aynı sıcaklıkta ölçüm yapılması şarttır. Kokolinde farklı yağ kullanıldığı için genellikle 43°C ile 45°C arası sıcaklıkta ölçüm yapılmaktadır.

4. Neden temperlenmiş çikolatada ölçüm yapmıyoruz?

Temperlenmiş ikolata içinde bir miktar kristal tohumu vardır. Kristal miktarı sürekli değiştiği için, tekrarlanabilir anlamlı bir viskozite ölçümü alamayız.

5. Çikolata reolojisini beherin içinde lbilir miyiz?

Çikolata reolojisini ancak birbiriyle tanımlanmiş, çapları birbirine yakın numune kabı-lme çubuğu (cup-bob) ile lbiliriz. Arada kalan ince alan üzerindeki film halindeki çikolatayı hareket ettirmek için gerekli kuvveti lerek viskozite hesaplanır. Beher içinde lme çubuğunun 1 mm yanındaki çikolata başka hızda akarken, 2 mm uzağındaki çikolata başka hızda akar. Çikolata kabın her noktasında farklı hızda hareket ettiği için tekrarlanabilir anlamlı ölçüm almak mümkün değildir.

6. Veri toplamadan ne kadar süre ile n karıştırma yapalım?

ICA Metod 46, sıcaklık sabitlendikten sonra 10 dakika $5\ s^{-1}$ hızda veri almadan n-karıştırma öneriyor. 20 dakika, hatta 30 dakika n-karıştırma yapan firmalar var. Yılların tecrübesi ile söyleyebilirim ki birkaç dakika n-karıştırma yeterli. Daha uzun karıştırmanın sonuçlara bir etkisi yok, testi çok yavaşlatıyor, üretime sonucu geç verip, üretimi geciktiriyor.

7. Yavaştan hızlıya doğru mu yoksa hızlıdan yavaşa doğru mu ölçüm yapalım?

Günümüzdeki reometreler peltier sistemi ile sıcaklığı çok kısa sürede 40°C'ye sabitliyorlar. Ardından programa yavaştan hızlıya ($1-35\text{ s}^{-1}$) 3 dakika içinde çıkmasını yazsanız (ICA Metod 46'ya göre), sonra 35 s^{-1} 'de 30 veya 60 saniye beklese sonra da 3 dakikada 35 s^{-1} 'den 1 s^{-1} 'e inerken 100 ölçüm almasını yazsanız ve viskozite hesaplamasını inerken aldığı 100 ölçüm ile yapmasını söyleseniz 6,5 dakikada test biter. 3,5 dakika ön-karıştırma yapmış olursunuz. Hem de ön-karıştırmada bütün hız alanını taramış olursunuz.

8. Çikolatada doğrusal viskozite nedir, ne işe yarar?

Newton kanununa uymayan çikolatanın akış eğrisi doğrusal değildir. En iyi eğri uyumu veren Casson metodu formülü de doğrusal değildir. Özellikle yavaş hızda aşağıya doğrusal olmayan dönüş doğru akma gerilimi değerini (Yield Value) verir. Aynı noktalardan geçen doğrusal bir çizgi çeksek, bambaşka yüksek bir akma gerilimi değeri çıkar. Çikolatada doğrusal viskozite grafiğiyle işlem yapılması, kafa karıştırmaktan başka hiçbir işe yaramaz.

9. Reolojiye etki eden değişkenler nelerdir?

En başta toplam yağ oranı geliyor. Bunun yanında serbest yağ oranı da çok önemli. Daha sonra çikolatanın partikül büyüklüğünü, kullanılan emülgatörler ve oranları gelmektedir. Nem oranı, konçlama metodu ve süresi çikolatanın reolojisine direkt etki eder.

10. Hatta yerleştirilmiş (in-line) gerçek zamanlı viskozite ölçüm cihazı yararlı olur mu?

Reolojik özellikler ve viskozite formülasyona, zamana, kayma hızına bağlı olarak değişir. Newtonyen olmayan akışkanların viskozitesi aynı sıcaklıkta bile örneğin boru içinde farklı noktalarda değişiklik gösterir. Bu da karışıklığa yol açabilir. Bu nedenle hatta yerleştirilmiş viskozite ölçüm cihazları yararlı olmayabilir.

Reolojinin Üretim Hattına Katkıları

Reoloji, üretim hattında olası problemlerin oluşmadan önlemeye yardımcı olur. Her üretim ekipmanı için optimum akış koşullarının belirlenmesine yardımcı olur, üretimde duruş sürelerini azaltır, fireyi minimize eder ve üretim verimliliğini artırır. Doğru reolojik spesifikasyonlar sayesinde enerji tüketimi azalır, süreç daha öngörülebilir hale gelir ve doğrudan kârlılık artışı sağlanır.

Reolojinin Diğer Katkıları

Doğru reoloji kontrolü ile doğru reçeteler kullanılarak daha düşük maliyetli hammaddelerle daha kaliteli ürünler elde etmek mümkündür. Kaplama kalınlıklarının doğru ayarlanması, fazla çikolata kullanımını önleyerek maliyetleri düşürür. Ayrıca reoloji, ürünün ağızda erime, kayganlık ve tat yayılımı gibi duyuşal özelliklerini doğrudan etkiler. Bu da ürün beğeninin artmasını sağlayarak satışları pozitif olarak etkiler.

Sonuç

Reoloji artık sadece laboratuvar ortamında reometrede ölçülen değerler değil, üretim hattında karar alan, tüketici deneyimini yöneten ve kârlılığı artıran stratejik bir araçtır. Ürün kalitesi, verimlilik ve müşteri memnuniyetinin sürdürülebilirliği için reolojik ölçüm ve yorumlama, modern endüstrilerde vazgeçilmezdir.

KAPANIŞ SÖZÜ

Bu çalıştay, yalnızca bir gün süren bilimsel paylaşımların toplamı değil; gıdaların yapısını, davranışını ve fonksiyonunu anlama yolculuğunda ortak bir dili yeniden hatırladığımız bir buluşma noktası olmuştur. Reoloji, çoğu zaman sayılarla, eğrilerle ve modüllerle anlatılan bir bilim dalı gibi algılansa da; bugün burada bir kez daha gördük ki reoloji, gıdanın hikâyesini anlatan evrensel bir dildir.

“Gıdaların Yapı–Fonksiyon İlişkileri ve Reoloji” teması etrafında şekillenen bu çalıştayda; temel bilimden endüstriyel uygulamalara, klasik ölçüm yaklaşımlarından yenilikçi ve çok disiplinli bakış açılarına uzanan geniş bir perspektif ortaya konmuştur. Yapılan sözlü sunumlar ve poster çalışmalar, reolojinin yalnızca bir ölçüm aracı değil; ürün tasarımı, proses optimizasyonu, kalite kontrolü ve tüketici deneyiminin merkezinde yer alan stratejik bir bilim alanı olduğunu açıkça göstermiştir.

Akademi ve endüstrinin aynı masada buluştuğu bu ortamda, teori ile pratiğin birbirini nasıl beslediğine tanıklık ettik. Bir yandan gıda sistemlerinin mikroyapısına dair derinlemesine bilimsel analizler yapılırken, diğer yandan bu bilginin üretim hatlarına, ürün raflarına ve nihayet tüketici deneyimine nasıl dönüştürülebileceği tartışıldı. Çalıştay kapsamında ele alınan klasik ve yenilikçi reolojik yaklaşımlar, triboloji ile kurulan ilişkiler ve çok disiplinli uygulamalar; reolojinin güncel gıda bilimi içindeki dönüşümünü de gözler önüne sermiştir. Reoloji artık yalnızca “ölçen” değil, “anlamlandıran” ve “tasarıma yön veren” bir bilim alanıdır. Bu dönüşümün, akademi ve endüstri arasındaki etkileşimle hız kazanacağı açıktır.

Anadolu Reoloji Derneği’nin gıda reolojisi alanındaki bu ilk çalıştay, sürdürülebilir bir bilimsel etkileşim ve iş birliği kültürünün başlangıcı olarak görülmelidir. Burada kurulan temasların; ortak projelere, yeni araştırmalara, disiplinler arası çalışmalara ve daha nitelikli ürünlere dönüşeceğine inanıyoruz. Bu e-kitapçık ise, yalnızca yapılan sunumların bir derlemesi değil; gelecekte atılacak adımlar için bir referans ve ilham kaynağıdır.

Katkı sunan tüm konuşmacılara, poster sahiplerine, düzenleme ve bilimsel komite üyelerine, destek veren kurumlara ve bilgi paylaşımına değer katan tüm katılımcılara teşekkür ederiz. Reolojiyi doğru anlayan ve etkin kullanan bir gıda bilimi yaklaşımının, hem akademide hem de endüstride daha güçlü bir geleceğin anahtarı olduğuna inanıyoruz.

Anadolu Reoloji Derneği

Çalıştay düzenleme kurulu:

Prof. Dr. Filiz Altay

Prof. Dr. Ömer Said Toker

POSTER SUNUMLARI

Çay atığı mikroenkapsülleri kullanılarak 3D yazıcı ile elde edilen sebze püresi formülasyonlarının optimizasyonları

Merve Başlı¹, Yaşar Özlem Alifakı², İrem Sude Doğru¹, Özge Şakıyan Demirkol¹, Kezban Candoğan¹

¹Ankara Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü, ²Ulusal Gıda Referans Laboratuvar Müdürlüğü, Tarım ve Orman Bakanlığı

Disfaji, yaşlı popülasyonda yaygın olarak görülen ve yetersiz beslenmeye neden olan bir hastalıktır. Yiyeceklerin, içeceklerin kıvamını ve farenks yoluyla taşınma hızını değiştirerek aspirasyon riskini azaltmaya yönelik tekstür kontrollü diyetlerle yönetilebilir. Bu amaçla üretilen gıdalarda 3D yazıcı teknolojisi kullanılarak tekstür ve şekil kontrolü sağlanabilmektedir. Bu çalışmada 4 farklı mikroenkapsül (farklı kaplama maddesi karışımları ile oluşturulan) ve dondurarak kurutulmuş fenolik çay atığı tozu kullanılarak yutma güçlüğü çeken hastalar için 3D yazıcı ile sebze püresi formülasyonları elde edilmiştir. Püre için kullanılan sebzeler pancar, patates, havuç ve kabaktır. Formülasyon optimizasyonu için Box–Behnken deneme deseni ile yanıt yüzey yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada, üretilen ve 3D baskısı yapılan tüm sebze pürelerinin fotoğrafları çekilmiş ve Image J görüntü işleme programı ile görüntüleri analiz edilmiştir. Bu çalışmanın amacı dondurarak kurutulmuş sebze tozu miktarı, mikroenkapsül ya da fenolik toz miktarı ve akış hızı bağımsız değişkenlerinin Image J görüntü işleme analizi kullanılarak elde edilen hedeflenen yazdırılabilirlik parametreleri (yükseklik ve çap değeri) üzerine ve viskozite üzerine etkilerini incelemektir. Optimum formülasyonlar sebze tozu için %3, fenolik toz için %0,2966 ve akış hızı olarak 100 mm/s olarak tespit edilmiş olup, optimum mikroenkapsül eklenen formülasyon için ise sebze tozu miktarı %2,9573, mikroenkapsül miktarı %1 ve akış hızı 119,9288 mm/s olarak tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Disfaji, 3D Yazıcı, Mikroenkapsülasyon, Reoloji, Optimizasyon

Teşekkür: Bu çalışma TÜBİTAK ve TAGEM, Ankara, Türkiye tarafından TOVAG 1005 projesi no 2220443 aracılığıyla finanse edilmiştir.

Bitkisel protein konsantrelerinin bisküvi hamuru reolojisine etkisi

Ömer Faruk Çetin

Şölen Çikolata Gıda Gıda San. Ve Tic. A.Ş., Gaziantep

Bu çalışmada, farklı bitkisel protein konsantrelerinin bisküvi hamurunun reolojik özellikleri ve nihai ürün kalitesi üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Artan sağlıklı beslenme eğilimleri, bitkisel kaynaklı yüksek proteinli ürünlere olan ilgiyi artırmış, bu da unlu mamullerde alternatif protein kaynaklarının kullanımını gündeme getirmiştir. Çalışmada tam buğday unu temel alınarak, bezelye, ayçiçeği ve soya protein konsantreleriyle unun %5, %10 ve %15 oranlarında ikame edildiği bisküvi hamurları hazırlanmıştır. Hamur örneklerinin su tutma kapasitesi, yoğurma süresi, viskoelastik davranış ve deformasyon özellikleri mixolab ve tekstür analizleriyle değerlendirilmiştir. Sonuçlar, bitkisel protein konsantrelerinin hamurun su absorpsiyonunu artırdığını, ancak gluten ağını zayıflatarak elastikiyetin azalmasına neden olduğunu göstermiştir. Protein oranının artmasıyla birlikte hamur stabilitesinde azalma, pişmiş bisküvi sertliğinde ise artış gözlenmiştir. Bezelye proteini, hem reolojik hem de duyuasal açıdan en dengeli sonuçları vermiştir. Soya proteini yüksek viskozite ve sertlik oluştururken, ayçiçeği proteini orta düzeyde etki göstermiştir. Bu bulgular, bitkisel protein konsantrelerinin uygun oranlarda kullanılmasıyla, hem besin değeri yüksek hem de işlenebilirliği korunmuş fonksiyonel bisküvi formülasyonlarının geliştirilebileceğini göstermektedir. Çalışma, sürdürülebilir protein kaynaklarının unlu mamuller endüstrisinde kullanım potansiyelini desteklemektedir.

Anahtar Kelimeler: Bisküvi, Bitkisel protein, Bezelye proteini, Hamur özellikleri, fonksiyonel gıda.

Sürdürülebilir ambalajlarda “flexible” kağıt yapılar ve lak kaplamalar ile geliştirilmiş bariyer özellikleri

Mehmet Erbaş

Şölen Çikolata Gıda San. Ve Tic. A.Ş., Gaziantep

Bu çalışma, plastik bazlı ambalajlara sürdürülebilir bir alternatif oluşturmak amacıyla, “flexible” kağıt yapılar üzerine çeşitli lak sistemlerinin uygulanmasını ve bu sistemlerin bariyer performansına etkilerini incelemektedir. Kağıt, çevre dostu ve geri dönüştürülebilir bir ambalaj malzemesi olmasına rağmen, doğal yapısı gereği yağ, su, oksijen ve nem geçirgenliği yüksek bir materyaldir. Bu nedenle kağıdın bariyer özelliklerini artırmak için lak bazlı kaplamalar kullanılmaktadır.

Çalışmada su bazlı akrilik, poliüretan dispersiyon ve biyobazlı lak sistemleri incelenmiş; bariyer performansları standart testlerle değerlendirilmiştir. Benzer lak sistemlerinin psödoplastik davranış gösterdiği ve bu özelliğin yüzeye düzgün yayılım ve film homojenliği açısından avantaj sağladığı bildirilmiştir. Ayrıca, düşük viskoziteli biyobazlı sistemlerin uygulama kolaylığı ve enerji tasarrufu sağladığı vurgulanmıştır. Sonuçlar, özellikle biyobazlı lakların çevreyle uyumlu olmalarının yanı sıra yüksek bariyer özellikleri kazandırdığını göstermektedir. Buna ilaveten literatürde biyobazlı laklar uygun reolojik profilleri sayesinde endüstriyel ölçekte uygulanabilir potansiyele sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilir ambalaj, Kağıt bazlı flexible yapı, Lak kaplama, Reoloji, Bariyer performansı, Su buharı geçirgenliği (WVTR), Oksijen geçirgenliği (OTR), Yağ bariyeri (“grease resistance”), Hidrofobiklik / oleofobiklik, Biyobazlı kaplamalar, Geri dönüşüm uyumluluğu, Kompostlanabilir, kaplamalar, Tek katmanlı yapı

Farklı pH düzeylerindeki kakao tozlarının bitter çikolata reolojisine duysal değerlendirmelere etkisi

Yaren Doğan

Polen Un ve Gıda Katkı Madd. San. Ve Tic. A.Ş.

Çikolata etimi, Türk Gıda Kodeksi ikolata Tebliği'nde belirtilmiş olan, toplam kakao kuru maddesi, yağsız kakao kuru maddesi ve toplam yağ içeriğine sahip bir reçeteden oluşması gerekmektedir. Bu içerikler ise; kakao tozu, kakao yağı ve kakao likrnden sağlanmaktadır. Kakao tozu çikolatada ürünün hem lezzet profilini hem de akış profilini belirleyen önemli bileşenlerden bir tanesidir. Kakao nibi veya tozu üretim sürecinde alkalizasyon işlemine tabi tutulabilir. Bu işlem ile kakao, alkali maddelerle muamele edillir ve son ürünün pH seviyesi yükseltilmiş olur. Alkalizasyon işlemi kakaonun renk, tat ve koku gibi duysal özelliklerinin yanında fonksiyonel özelliklerini de değişmektedir. Değişen bu özelliklerde son ürünün hem duysal hem de reolojik davranışlarının farklı olmasına sebep olmaktadır. Bu çalışmada, farklı alkalizasyon derecelerine (pH seviyelerine) sahip kakao tozlarının çikolata üretiminde kullanılması ile son ürünün duysal ve reolojik özellikleri üzerindeki değişiklikleri incelenmiştir. Viskozite ve akma gerilimi gibi parametrelerin yanında duysal panel değerlendirmeleri yapılmıştır. Çalışma sonuçları Anton Paar MCR 102 Rheocompass cihazında eş merkezli silindir propla ölçülmüştür. Deneme setleri, alkalize ve natürel kakao tozları farklı oranlarda (%100, %75, %50, %25 ve %0) kullanılarak beş ayrı çikolata örnekleme hazırlanarak oluşturulmuştur. Böylece alkalizasyona bağlı değişen pH oranının çikolatanın reolojik özelliklerine etkisi sistematik olarak değerlendirilmiştir. Sonuçlar doğrultusunda ikolatalar birbirleri ile kıyaslandıklarında, alkalize bir kakao tozu ile üretilmiş olan bir çikolatanın viskozitesi düşük akma noktası yüksek olurken, natürel bir kakao tozu ile üretilmiş olan bir çikolatanın viskozitesi yüksek ve akma noktasının daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alkalizasyon, reoloji, çikolata, pH değişimi

Kendini onarma (self-healing) özelliği gösteren biyopolimerlerin reolojik yaklaşımlar ile değeriendirilmesi

Rukiye Yiğit, Elif Alakaş, Filiz Altay

İstanbul Teknik Üniversitesi Gıda Mühendisliği Bölümü

Kendini onarma (self healing) özelliği gösteren biyopolimerler, dış etkenlerle bozulan yapılarının zamanla veya uygun koşullar altında kendiliğinden eski haline dönmesini sağlayan akıllı malzemelerdir. Bu onarım genellikle hidrojen bağları, iyonik etkileşimler, dinamik kovalent bağlar veya fiziksel yeniden düzenlenme mekanizmaları sayesinde gerçekleşir. Kendini onarma özelliğinin değeriendirilmesinde, çekme- kopma sonrası iyileşme gibi mekanik testler, su buharı geçirgenliği, oksijen geçirgenliği gibi bariyer özellikleri, mikroskop, SEM veya konfokal görüntüleme ile mikroyapının incelenmesi ve kimyasal bağların yeniden oluşumu üzerine spektroskopik analizler (FTIR, NMR) gibi farklı ölçüm teknikleri kullanılmaktadır. Bunun yanı sıra, özellikle polimer hidrojellerinin kendini onarma özelliklerinin değeriendirilmesinde reolojik verilerden de etkili bir şekilde yararlanılmaktadır. Gerinim taraması, gerinim geri kazanımı ve zaman tarama testleri, malzemenin viskoelastik yapısının hasar öncesi ve sonrası davranışlarını izleyerek kendini onarma kapasitesini ortaya koyar. Örneğin, yüksek gerinim altında bozulan yapının düşük gerinim koşullarında G' (elastik modül) değeriini yeniden kazanması, hidrojelin iç ağ yapısının kendini onardığını göstermektedir. Gıda alanında kendini onarma özelliği gösteren biyopolimer-hidrojel sistemleri; yenilebilir kaplamalar, jel bazlı taşıyıcılar, akıllı ambalaj materyalleri, 3D baskı uygulamaları ve sensör geliştirme gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmakta ve ürünlerin raf ömrünün uzatılması, mekanik dayanımın artırılması ve kontrollü salım sistemlerinin geliştirilmesi gibi bir dizi avantaj sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Kendini-onarma (self healing), biyopolimer, hidrojel, reolojik özellikler