

## Hamurun Reolojik Özellikleri

Doç. Dr. S. Sezgin ÜNAL — Ar. Gör. M. Hikmet BOYACIOĞLU

*E.Ü. Mühendislik Fakültesi, Gıda Mühendisliği Bölümü — İZMİR*

### ÖZET

Ekmek yapımında bir ara ürün olan hamurun reolojik özellikleri, fırın ürünlerinin kalitesini doğrudan etkilemesi yanında hamur yapısı hakkında bilgi vermesi nedeniyle oldukça önemlidir. Bu derlemede hamurun reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla geliştirilen farinograf, Ekstonsograf, alveograf ve maturograf yanında **sabit kayma basıncı** ve **kayma hızının** ölçüldüğü mekaniksel bir model ile elde edilen sonuçlar tartışılmıştır.

### Summary

The rheological properties of dough which is an intermediate product in breadmaking is important because of its direct effect on bakery products and its characteristic of giving information about the structure of dough. In this paper, the results taken by the instruments improved for determining the rheological properties of dough such as farinograph, extensigraph, alveograph and maturograph together with the results taken by the mechanical model used for measuring the constant shear stress and shear rate are being discussed.

### GİRİŞ

Unun ekmeğe veya diğer fırın ürünlerine dönüşümünde bir ara ürün olan hamurun reolojik özelliklerini onun bileşimi ve yapısı belirler. Wasserman (1980) Reolojiyi, çeşitli araştırmacıların çalışmalarına göre «maddenin şekil değiştirmesi ve akışkanlığı üzerinde çalışan bir fizik dalı» olarak tanımlamaktadır. Hamurun reolojik özellikleri; fırıncılık ürünlerinin kalitesini doğrudan etkilediğinden ve aynı zamanda hamurun yapısı hakkında bilgi vermesi nedeniyle oldukça önemlidir.

Buğdayın un, hamur ve ekmeğe işlenmesinde hamurun reolojik özelliklerinin öneminin anlaşılması; değirmen, fırın ve hatta buğdayın yetiştirilmesinde kalite kontrol için reolojik test yöntemlerinin yaygın bir şekilde tasarımı ve uygulanması çalışmalarını teşvik etmektedir.

### Hamurun Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

Ekmek hamurunun başlıca bileşenleri; buğday unu ve su'dur. Hamurların su içeriği genellikle % 45 dolayındadır. Unda başlangıçta bulunan su bu miktara dahildir. Diğer bileşenler olarak maya ve tuz kullanılır. Katkı maddesi olarak tanımladığımız çeşitli doğal ve kimyasal maddeler; hamur niteliklerini iyileştirmek, ekmeğin besin değerini arttırmak veya bayatlamasını geciktirmek amacıyla küçük miktarlarda kullanılabilir.

Ekmek yapım işlemini başlıca üç aşamaya ayırabiliriz. Bileşenlerin hamur içine karıştırılması, aralarında havalandırma işlemi olan birkaç fermantasyon aşaması ve pişirme. Havalandırma işlemi, hamur içinde absorbe edilen gazın dağıtıldığı ve büyük gaz hücrelerinin parçalandığı mekaniksel işlemlerdir. Hamurun içindeki iskelet yapısı, yoğurma hız ve süresi ile fermantasyon aşamalarının süre ve sayısıyla büyük değişimler göstermektedir. Bu değişiklikler aynı zamanda üretilen ekmeğin tipi ve yöntemin mekanizasyonu ile de ilişkilidir.

Önemli besin kaynağı olan ekmeğin diğer nitelikleri yanında, ekmeğin içi yapısının mütacanis ve renginin açık olması istenir. Ekmek içi, pişirme sırasında nişastanın şiştiği veya jelatinize olduğu yaklaşık 60°C derecede kararlı bir yapı kazanır. Bu noktadan sonra hamur, maya hücreleri tarafından üretilen ve çoğunluğunu karbondioksit'in oluşturduğu gaz hücreleri ile su buharını tutmalıdır. Yoğurma ve fermantasyon işlemleri hamurun yeterli miktarda gaz tutmasını sağlamaktadır. İyi bir ekmeğin içi elde etmek için koşul, hamurun pişirme aşamasına toplam hacminin % 70'i kadar bir gaz miktarıyla girmesidir. Yaklaşık bir saatlik son fermantasyon süresiyle bu duruma ulaşılır ve havalandırma yapılmaksızın hamur fırına atılır.

Hamurun gelişmesinde gaz tutma yeteneğinin artırılması için mekaniksel işe gereksinim vardır. Geleneksel ekmeğin yapım işleminde yoğurma için gerekli enerji 1 kg. hamur için

15 kJ'dur. Bu enerji hamurun gelişimi için yeterli olamadığından gelişmiş hamur fermentasyon ve havalandırma aşamalarının sonunda elde edilir. Diğer bir seçenekte, hamura birkaç dakika içinde her kilogramına 40 kJ enerji uygulayan yüksek devirli bir karıştırıcı kullanılmasıdır. Böyle yapılan «mekaniksel hamur geliştirme» işlemi, gaz tutma yeteneğinin artırılması için gerekli olan fermentasyon ve havalandırma sürelerini kısaltmaktadır. Fermentasyon işleminin süresi son dinlendirmede daha fazla azaltılabilir. (Blokma, 1972).

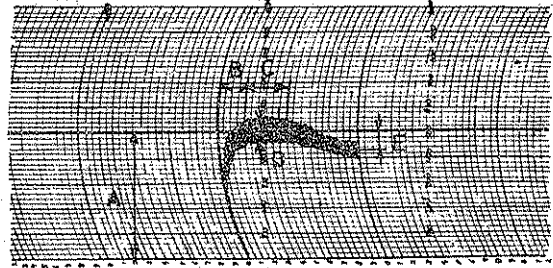
Hamurun gaz tutma yeteneği, yapısından kaynaklanan önemli bir özelliğidir ve hamurun reolojik özellikleriyle ilgilidir. Gaz Hücreleri arasındaki membranlar büyük genişlemelerle kırılmaksızın gaz tutma yeteneğindedir. Eğer bu membranlar kırılır, koparsa gaz hücreleri kaba bir ekmek içi oluşturacak şekilde birleşme eğilimi göstererek gaz kaybına ve ekmek hacminin azalmasına neden olurlar. Hamur; gaz çıkışı ve ağırlık etkisiyle yayılmayacak kadar sert, basınç etkisiyle büyük deformasyonlara yeterince uyabilecek kadar yumuşak kıvamda olursa, yüksek bir uzama yeteneği gösterebilir (Blokma, 1972).

Buğday unu hamurunun reolojik özelliklerini belirlemek amacıyla yapılan çalışmalar sonucunda değişik ülkelerde çeşitli aletler ve yöntemler geliştirilmiştir.

Hamurun parmaklar arasında tutularak çekilmesi ve gerdirilmesi, unun ekmeklik niteliğini belirlemek amacıyla kullanılan ilk yöntem olmuştur. Daha sonraları hamur belirli bir süre bekletildikten sonra ortaya çıkan yumuşaklık, yapışkanlık elastikiyet gibi durumları dikkate alınarak ekmeklik niteliği hakkında hükme varılmıştır. Unun en uygun su kaldırma miktarını ve belirli konsistenste hamur oluşması için gerekli yoğurma süresini belirleyen aletlerin yapımı sonucu hamurun reolojik nitelikleri kıyaslamalı ve objektif olarak saptanabilmektedir. (Wasserman, 1980).

Brabender farinografı hamur yoğurulmasının kaydedilmesinde yaygın olarak tüm ülkelerde kullanılmaktadır. Yoğurma kabı içinde sabit bir hızda ve zıt yönlerde dönen iki adet «Z» şeklinde paletler vardır. Bu alette palet-

lere uygulanan güç sürenin bir fonksiyonu olarak kaydedilir ve elde edilen eğri farinogram olarak adlandırılır. İki yoğurucu paletin pozisyonlarına bağlı olarak periodik bir biçimde değişen dönme gücünden dolayı alet genişliğe sahip bir bant kaydeder. İletici milin hızı sabit olduğundan farinogram aynı zamanda yoğurma süresine karşı gücün bir çizelgesi olarak düşünülebilir. Konsistens olarak ifade edilen yoğurma direnci hamurun bazı niteliklerini yansıtır. Yoğurma süresince konsistens sürekli olarak değişir. Yoğurmanın başındaki artış hamur gelişimini gösterir. Maksimuma doğru bir gidişten sonra konsistens azalarak yoğurmanın sürdürülmesiyle hamur yapısı bozulur. (Çizelge 1). Diğer etkenler eşit olduğunda maksimum konsistens su içeriğinin artışıyla azalır. Farinogramın 500 konsistens çizgisini ortalaması için verilmesi gereken su miktarı, o un örneğinin su kaldırması olarak belirtilir. Önemli bir un karakteristiğidir. Farinograf aletinde unun su kaldırması yanında elde edilen farinograf kurvesinin şekli de unları karakterize etmede kullanılır. En önemli ölçüm maksimum konsistens veya hamurun gelişmesi için gerekli olan yoğurma süresinin belirlenmesidir. Unun su kaldırmasında olduğu gibi hamurun gelişme süresi ile ekmek yapım kalitesinde protein içeriğiyle birlikte artmaktadır.



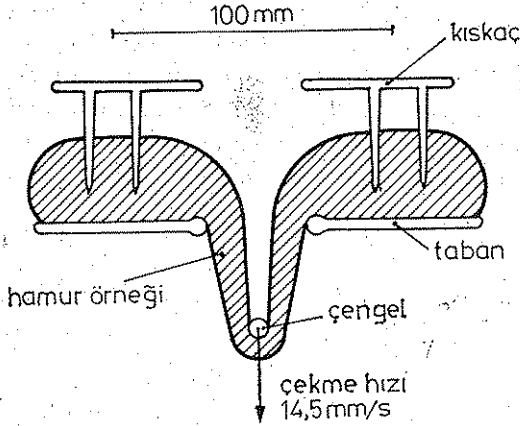
Çizge 1. Farinogram kurvesi. A : Konsistens (BE), B : Hamur gelişme süresi (Dakika), C : Hamur stabilitesi (Dakika), D : Elastikiyet (BE), E : Yumuşama (BE)

Farinograf aleti; ölçümün amacı olan fiziksel sistemdeki değişiklikleri ölçme kuralının en ileri bir örneğidir (Blokma, 1970).

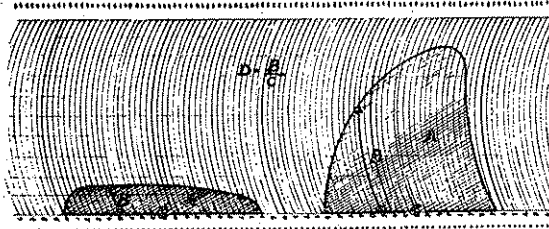
Hamurun akıcı özelliğinde; işleme sırasında sürekli değişimler olduğundan, hamur nitelikleri hakkında önceden karar verebilmek

güçleşmekte ancak ekstensograf aleti ile hamurun uzayabilme niteliği ve çekmeye karşı gösterdiği direnç grafiksel olarak belirlenmektedir (Ünal, 1981).

Brabender ekstensografı enerji gereksinimi tayinleri için kullanılan aletlerin bir örneğidir. Silindirik şekli verilen hamur her iki ucundan sıkıştırılır ve aletin özel yerine konarak sabit bir hızla silindirik eksenine dik olarak hareket eden bir kanca tarafından aşağı doğru çekilerek «V» şekline getirilir (Çizge 2). Test edilen parça üzerindeki kuvvet zamanın veya uzamanın bir fonksiyonu olarak grafik şeklinde kaydedilir. Uzama kuvveti başlangıçta artar ve test edilen parçanın karşı kısmındaki azalma ile dengelenen germe kuvvetindeki artışla bir maksimuma ulaşır. Bundan sonra kuvvet yavaş yavaş azalır ve hamurun kopmasıyla birdenbire düşer. Eğrinin yüksekliği hamurun çekmeye karşı gösterdiği direncin, genişliği ise elastikiyetin bir ölçüsüdür. Eğrinin oluşturduğu alan, ekstensograf ile çizilen yol boyunca kopmaya neden olan iş ile orantılıdır (Çizge 3).

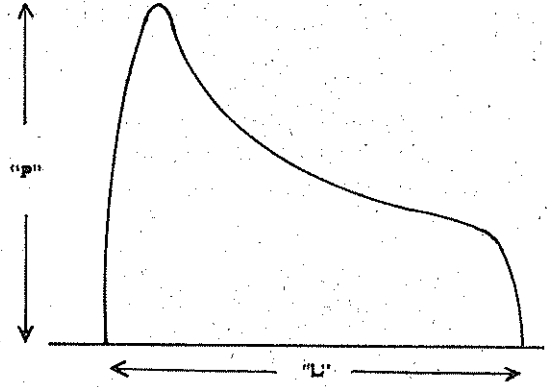


Çizge 2. Brabender ekstensografında bir örneğin uzatılması



Çizge 3. Ekstensograf kurvesi. A : Enerji (cm<sup>2</sup>), B : Başlangıçtan 50 mm sonra genişleme direnci (BE), C : Uzayabilme yeteneği, D : Oran sayısı

Chopin alveografı Fransa kaynaklı olup Belçika'da da kullanılır. Belirli kalınlıkta düz tabaka şeklindeki hamur alttan hava verilerek balon şeklinde şişirilir. Hamur patlayıncaya kadar geçen sürede grafik kaydedilir. Burada zamana karşı belirlenen basınç hamur kabarcığının hacmiyle yaklaşık olarak orantılıdır. Çizilen grafikte esas olarak ekstensogram ile aynı bilgiyi verir. Eğri altındaki alan ise örnek patlayıncaya kadar yapılan işle orantılıdır (Çizge 4).



Çizge 4. Alveogram kurvesi. P : Kurve yüksekliği (Hamur stabilitesi için mm cinsinden ölçü), L : Hamurun uzama yeteneğini gösteren mm cinsinden kurve uzunluğu

Ekstensograf veya alveografıta, ekmeklik kalitesi iyi unlar yüksek direnç ve yüksek elastikiyet ile karakterize edilirler. Elastikiyetin önemi bilinmektedir. Ekmek yapım işlemiyle ilgili görüşlerde yüksek direncin istenmesinin nedeni hala açık değildir. Ekmeklik kalitesi iyi unların yüksek direnç ve elastikiyet göstermelerinden dolayı bu unlar kurvelerde oluşturdukları geniş bir alanla yada kopma için gerekli işin miktarıyla karakterize edilirler. Bu özellikler unun nitelendirilmesinde oldukça yararlı olduğundan ekstensograf tercih edilir (Bloksma, 1972).

Unların ekmeklik kalitesini belirlemede kullanılan metot ve aletlerin önemli bir kısmı maya ilave edilmeden uygulanmaktadır. Bu gerçeği Halton (1949) şöyle ifade etmiştir; «Ekmek yapım koşullarında kalite kontrol için kullanılan yöntemler kıyaslandığında bunlar arasında çok farklılıklar bulunmuştur. Testlerin büyük çoğunluğu; fermantasyonun hamur özel-

liklerini değiştirmesi gerçeğine rağmen, fermente olmamış hamurda yapılmaktadır.»

Fermentasyon sırasında hamur membranlarının yavaş uzaması, hamur gelişimi kabul edilir. Brabender Ekstensografi ve Chopin Alveografi İngiltere'de yapılan benzeri Araştırma Ekstensometresi (Research Extensometer) mayalı ve mayasız hamurlar için tasarımı edilmiş birkaç aletten birisidir (Halton, 1949).

Hamurda deformasyon hızı önemli bir faktördür. Brabender ekstensografi ve Chopin alveografının her ikisinde de büyük deformasyonlara 10 saniye içinde erişilebilir. Bu deformasyon hızı, hamur parça (pasa) fermentasyonu süresinden  $10^3$  kadar daha yüksektir. Hamurun deformasyona direnci, deformasyon hızı yükseldikçe daha da küçülmektedir (Blokma, 1964).

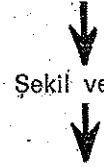
Maya katılarak hazırlanan fermente olmuş hamurların reolojik niteliklerinin ölçümündeki zorluklar nedeniyle bu değişimler üzerinde daha az çalışılmıştır.

Brabender Maturografi ile sıcaklık ve nisbi nem sabit tutularak, hamur parça fermentasyonu sırasında son fermentasyon süresi, fermentasyon stabilitesi, hamur elastikiyeti ve hamur direnci (maturograf maksimumu olarak ifade edilen) kurve şeklinde tesbit edilir (Ünal, 1980). Bu alet ayrıca örnek üzerine periyodik olarak iki dakika ara ile belirli bir yük uygulayarak sıkıştırmayı ve karşı direnci ölçer (Seibel ve Crommentuyn, 1963).

Fermente olmayan hamur reolojisini belirlemek amacıyla Hibberd ve Parker (1975), Müller (1975) ve Rasper (1975) koni ve plaka, paralel plaka ve ekstensograf yöntemlerini uygulamışlar, fakat bu yöntemlerin hiçbiri fermente hamurun heterojen yapısı ve fermentasyon sırasında hamur geometrisindeki değişiklikler nedeniyle yeterli olamamıştır. Matsu-moto ve ark. (1973, 1974, 1975) da yaptıkları bir dizi araştırma sonucu, fermente hamur reolojisinden, fermente olmamış hamurlar için kullanılanlardan farklı yöntemler ile çalışılması gerektiğini söylemişler ve fermentasyon süresince hamurun iç basıncını belirlemek amacıyla bir sistem geliştirerek hücre membran gazının gerilimi ile iç basınç arasında bağıntı kurmaya çalışmışlardır.

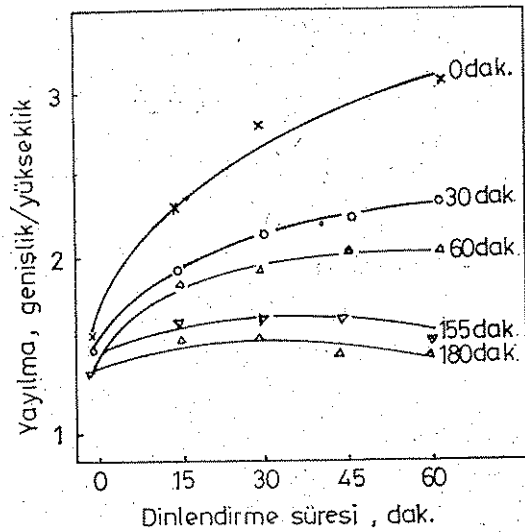
Hosoney ve ark. (1979) tarafından mayalı hamurlar ile yapılan bir çalışma «Yayıma Tes-ti» olarak tanımlanmaktadır. Yoğurulmuş hamur 105 ve 155'nci dakikalarda havalandırılarak toplam 180 dakika fermentasyondan sonra mekaniksel olarak yuvarlanır ve düz bir levhada  $30^{\circ}\text{C}$  derecede % 90 nem içeren fermentasyon dolabına yerleştirilir. Hamur yüksekliği ve genişliği 15 dakikalık aralarla 60 dakika sürede, Mitotoyo kadranlı çap pergeli ile ölçülür. Yayıma oranı daha fazla yayılmayı gösteren yüksek değerler ile yükseklik üzerinden genişlik olarak hesaplanır. Her test için iki örnek kullanılır. Deneş şematik olarak şöyledir :

Yoğurulmuş hamur Fermantasyon süresi



Yayımanın ölçülmesi (Genişlik/Yükseklik)

Fermente olmuş hamurda üç önemli kuvvet; yerçekimi, basınç ve kohezyon etkili olmaktadır. Hamur ağırlığı, dikey olarak aşağı doğru bir kuvvetle oluşur. Yerçekimi akış için etkili esas kuvvet bileşenidir. Gaz genişlemenin sonucu olan basınç hamurun her tarafında oluşup, hamur hacmini arttırmak üzere tüm yönlerde eşit olarak genişler. Hamur içindeki kohesif kuvvetler genişlemeye direnç gös-



Çizge 5. Fermentasyon süresinin parametre olduğu durumda hamurun dinlenme süresine göre yayılma oranı

terir ve akışı sınırlar. Aynı ayrı da etkili olabilen bu üç kuvvet fermantasyon sırasında birlikte rol oynarlar. Fermantasyon süresinin parametre olduğu Çizge 5'de hamurun dinlenme süresine göre yayılma görülmektedir. Fermantasyon dışında yayılma oranı dinlenme ile çok artar. Fermantasyon periyodu uzatıldığında yayılma derecesi azalmış ve dinlenme süresi ile yayılma oranı enaz olmuştur. 180 dakikalık fermantasyondan sonra yayılma oranı hemen hemen sabit kalır. Bu sonuca göre, fermantasyon, hamuru yüksek oranda akışkan bir sistemden yayılmanın olmadığı bir sisteme dönüştürür (Hoseney ve ark. 1979).

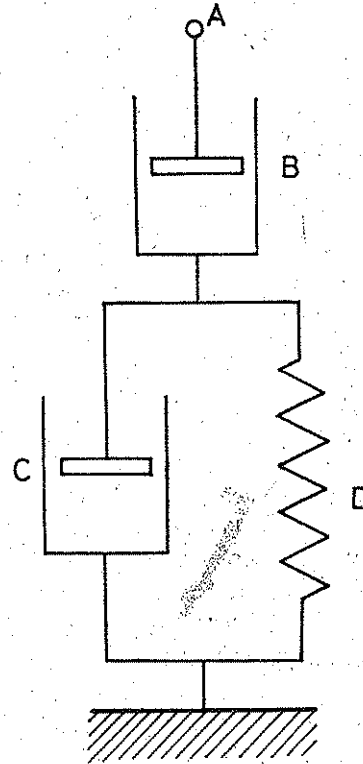
Ekmek yapım süresince etkili olan koşulların farklılığı, kalite kontrol için kullanılan metotların direkt ölçümler olarak kullanılmasını ve kesin hükme varılmasını güçleştirmektedir. Bu nedenle bu metotlar yanında ekmek pişirme denemeleri de yapılarak sonuca gidilmektedir.

Hamur özelliklerinin fiziksel olarak belirlenmesi amacıyla değişik araştırmacılar birçok çalışma yapmışlarsa da kesin bir sonuca ulaşamamıştır.

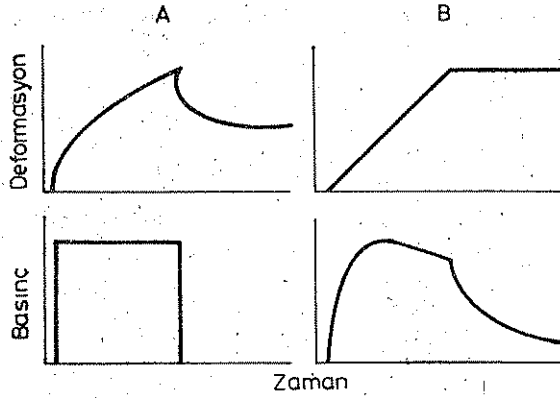
Basit fiziksel yöntemlerle hamur özelliklerinin belirlenmesi amaçlandığında kalite kontrol için kullanılan aletler küçük bir yardım sağlarlar. Bu aletlerde saptanan deformasyonun örneğin; pozisyonun ve sürenin bir fonksiyonu olmasından dolayı belirlenmesi çok karmaşıktır. Bu durum özellikle Brabender farinografi için doğrudur. Brabender ekstensografi (Müller ve ark., 1961) ve Chopin alveografında (Blokman, 1957) hamurdaki basınç (Stress) ve deformasyon daha başarılı olarak analiz edilmiştir. Böyle bir analiz, hamur özelliklerinin belirlenmesi için bir aletten çok teorik bir çalışma olduğundan oldukça karmaşıktır. Bu aletlerde deformasyon hızlarının çok yüksek olduğu daha öncede belirlenmiş ve düşük deformasyon hızlarında bunlarla yapılan denemelerde hamur özellikleri hakkında bilgi edinilememiştir.

Hamur özellikleriyle ilgili bilgiler çok çeşitli deneysel teknikler sonunda elde edilmiştir. Blokman (1972) tarafından yapılan aşağıdaki çalışmada; sadece sabit kayma basıncı

(shear stress) ve sabit kayma hızı (shear rate) ölçümleri esas alınmıştır. Bu ölçümlere ait eğriler Çizge 6'da gösterilmiştir. Hamurun reolojik özelliklerinin tartışılmasında yardımcı olan mekaniksel bir model ise Çizge 7'de görülmektedir. Bu model hamur reolojisinde çalışan öncüler olan Schofield ve Scott Blair (1933) tarafından önerilen elektriksel modele çok benzemektedir. Bu modelde A üzerindeki kuvvet ve bu kuvvetin yer değişimi, hamur örneğinin gerilme ve basıncı ile karşılaştırılır. Belli bir süre için sabit bir basıncın uygulandığı deneme «Stress Testi» olarak adlandırılır (Çizge 6-A). Stress testinin sonuçları Çizge 8'de gösterilmiştir. Başlangıçta basınç birdenbire uygulandığı zaman örnek parça hızla deforme olur. Bu hızlı reaksiyondan sonra deformasyon daha yavaş artarak devam eder. Uygulanan basınç aniden kaldırıldığında örnek önce hızlı sonra da daha yavaş bir geri dönüş gösterir. Yukarıda açıklanan başlangıçtaki hızlı reaksiyon ve geri dönüş çizge 7'de bir D yayı ile gösterilmiştir. Yayın kesme modülü için veri-

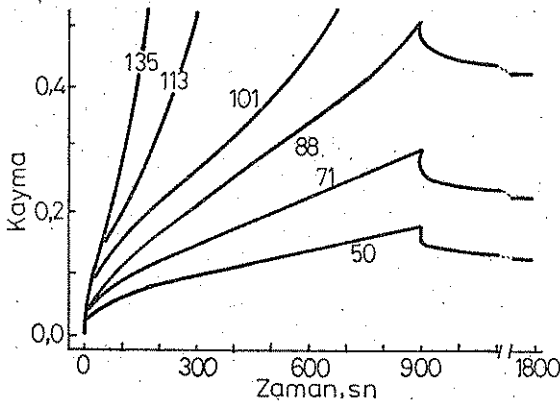


Çizge 6. A, sabit gerilimde denemeler  
B, sabit deformasyon hızındaki denemeler



Çizge 7. Viskoz akış ve elastikiyeti gecikme gösteren hamur özelliklerinin belirlenmesi için reolojik model

len değer literatürde  $5.10^2$  ve  $7.10^3$   $\text{kg/m.sn}^2$  veya  $\text{N/m}^2$  arasında uzanır (Bloksma, 1971). Kesme modülleri  $200 \text{ kg/m.sn}^2$ 'nin üstündeki durumların dışında hemen hemen basınçtan bağımsızdır (Glucklich ve Shelef, 1962 b).

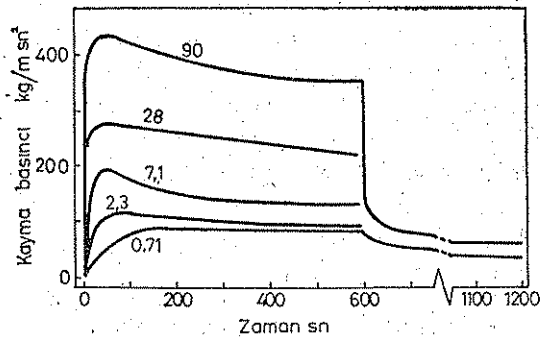


Çizge 8. Ekmek yapımına uygun undan yapılmış hamurların kayma eğrileri, kayma basıncı  $\text{kg/m.sn}^2$  olarak ifade edilir. Basınc 900 sn. den sonra kaldırılır (Bloksma, 1971). Eğrilerden  $1,0$  ve  $1,1.10^3$   $\text{kg/m.sn}^2$  arasında olan kayma modülleri dikkate alınır. Eğrilerin son eğimleri en düşük basınçta  $4.10^5 \text{ kg/m.sn}^2$  den en yüksek basınçta  $4.10^4 \text{ kg/m.sn}^2$  e azalan görünür viskoziteye karşılıktır.

Geri-dönüşün bir anlık olmayıp belli bir süre aldığı için gözlenmesi için çizge 7'deki C tampon kabı sisteme ilave edilmiştir. Gecikme süreleri  $10^4 \text{ kg/m.sn}^2$ 'lik C'nin viskozitesine karşılık 10 saniyedir (Bloksma, 1972).

Elastik deformasyon veya geçiciliğe ilaveten çizge 8'deki basınç eğrileri önemli bir süreklilik veya deformasyon gösterirler. Bu durum çizge 7'deki B tampon kabı ile şekillendirilmiştir. Basınç çizge 7'deki viskoziteye karşı gelen eğrilerin yükselen kısmının eğimi ile bölünür. Düşük kayma basıncı (shear stress) viskozite deformasyon süresince artar ve sonra hemen hemen sabit hale gelir. En yüksek kayma basıncında, kayma basıncı eğrileri  $0.41 \text{ sn}^{-1}$  lik bir sapma gösterirler. Bu noktadan sonra deformasyon hızı tekrar artar ve viskozite azalır. Çizge 8'den viskozitenin sadece gerilmeye değil, aynı zamanda da basınca bağlı olduğu söylenebilir. Zira basıncın artması ile birlikte viskozite önemli bir şekilde azalmaktadır. Basınç ve gerilemenin görünür viskozite üzerindeki etkisi, literatür verilerinin modüldekilerden neden daha geniş bir şekilde değiştiğini açıklar. Literatürde verilen değerlerin çoğu  $10^4$  ile  $10^6 \text{ kg/m.sn}$  arasında değişir. Bununla beraber viskozitelerin  $3.10^2 \text{ kg/m.sn}$  kadar düşük olduğu belirtilmiştir. Bazı değerler, Brabender ekstensografi ile örneklere  $4000 \text{ kg/m.sn}^2$  değerine kadar basınç uygulanan deneyler sonucu elde edilmiştir (Bloksma, 1971).

Deformasyon bir sabitlik kazandıktan sonra (çizge 6-A) belli bir süre için sabit bir hızda uygulanan kayma basıncı ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Bu deneylerin sonuçları çizge 9'da gösterilmiştir.



Çizge 9. Basınc zamanın fonksiyonu olarak alınmıştır. Değerler  $1/1000 \text{ sn}^2$ 'de ki kayma hızını gösterir. Deformasyon 600 sn. sonra sabit hale gelir.

Deney koşulları : Su kaldırması % 54.5 olan ekmeçlik un % 52.9 su ve % 2 tuz katılarak 68 dev/dk. Bir GRL yoğurucusunda 600 sn. yoğurularak hazırlanan hamur Weissenberg rheogoniometresinin (Model R 18) levhası ve koni kısmı arasında sıkıştırıldıktan sonra deformasyon başlar. Sıcaklık 31°C. Eğrilerin başlangıçtaki eğimleri 2 ve  $3.10^3$  kg/m. sn<sup>2</sup> arasındaki kayma modülüne karşılıktır. Maksimum kayma basınçları en düşük hızda 4,  $8.10^3$  kg/m. sn'e azalan görünür viskoziteye karşılıktır.

Sabit bir kayma basıncı altında başlangıçtaki deformasyon sadece çizge 7'deki D yayından ötürü elastiktir. Eğrinin başlangıçtaki eğimi, modülün bir ürünüdür ve kayma hızını gösterir. Çizge 8'deki kayma testlerinden farklı olan çizge 9'daki eğriler, çizge 7'deki C tampon kabının gözlemleri olmaksızın tanımlanabilmektedir. Bu durumun sabit kayma hızından sonraki kademeli geçişlerin ölçülmesinde kullanılan aletlerin atalet etkilerinden ve mekaniksel kusurlardan kaynaklandığı tahmin edilmektedir. Kayma basıncı arttığında çizge 7'deki tampon kabı B, artan hızla birlikte hareketlenir ve sonunda kayma hızına karşı tepki gösterir. Bu noktada basınç, kayma hızı ve viskoziteye eşdeğer olur. B'nin sabit viskozitesi ile basınca sonsuzda yaklaşır. Yeterli hızda yapılan gözlem, basınç maksimuma doğru gittiğinde görünür viskozitenin kayma boyunca azaldığını göstermiştir. Çizge 9'daki maksimum noktası çizge 8'deki sapma noktalarına karşılıktır. İşleme belli bir süre ara verilirse deformasyon sabitliğini muhafaza eder ve basınç azalır. «Basınç gevşemesi» olarak adlandırılan bu durum D yayının aynı zamanda geri dönüşü ile çizge 7'deki B tampon kabının hareketlenmesiyle anlaşılır. Basınç gevşemesi hızlı bir şekilde başlar ve derece derece azalarak devam eder (Bloksma, 1972). Deneysel basınç gevşemesi eğrileri tek bir modül ve tek bir viskozite ile belirlenemezler. Hamurdaki basınç gevşemesi genellikle tam değildir (Shelef ve Bouso, 1964; Kovats ve Lásztity, 1966). Basınç gevşemesinin azaldığının belirlenmesinde çizge 7'dekinden daha karmaşık modellere gerek duyulur (Glücklich ve Shelef, 1962-a).

Bloksma (1972) tarafından özel laboratuvarında yapılan yayınlanmamış denemelere göre; basınç gevşemesinin, deformasyon süresinden daha kısa ve daha yüksek hızlarda nispeten daha çok belirlendiği görülmüştür.

Polimer reolojisinde gerilme ile dalgalı bir eğri veren dinamik ölçümler geniş olarak kullanılır. Eğer polimer maddedeki gerilme basınç ile orantılı olarak lineer bir karakter taşıyorsa, bu ölçümler geçerlilik kazanır. Hamurda dinamik ölçümlerde çok düşük deformasyonlar görülür (Bloksma, 1972).

Hibberd ve Wallace (1966) kayma sınırının  $2.10^{-3}$ 'ün üzerine çıkmadığı durumlarda hamurun doğrusal olarak davrandığını, Smith ve ark. (1970) ise  $2.10^{-4}$  kadar düşük kayma sınırında doğrusallıktan sapmalar olduğunu bulmuşlardır. Bu teknik hamur yapısı üzerinde yararlı bilgiler sağlamıştır.

Ekmeç yapım işleminde çok büyük deformasyonlar oluşur. Bu nedenle, dinamik ölçümler hamurun reolojik özellikleriyle ekmeç verimi arasındaki ilişkiyle ilgili çalışmalara çok az uygundur.

Yukarıda belirtildiği gibi, kayma modülleri ve hamurun viskozitesi sabit olmayıp basınç ve gerilmeye bağımlıdır. Buna ilaveten, çeşitli teknikler zamanla değişme göstermiştir. Hamurun dinlenmesinde, reolojik özelliklerini etkileyen kimyasal ve fiziksel işlemler oluşur. Eğer test örneklerinin hazırlanması tam olarak kontrol edilirse reolojik testlerde aynı sonuçlar elde edilebilir. Reolojik testler, kalite kontrol için önemli metotlar kadar doğru sonuç verirler. Ancak çeşitli araştırmacıların da belirttiği gibi günümüze kadar geliştirilen model ve metotlar ile hamurun reolojik özellikleri (mayalı hamurlar da dahil) net bir şekilde açıklığa kavuşmamıştır.

## KAYNAKLAR

1. Bloksma, A.H. 1957. A Calculation of the Shape of the Alveograms of Some Rheological Model Substances. *Cereal Chem.* 34, 126.
2. Bloksma, A.H. 1964. Rheologie von Brotteig bei Langsamen Deformationen. *Brot u. Gebäck* 18, 173.
3. Bloksma, A.H. 1970. Rheology in Elucidating Functionality in Breadmaking (Alınmıştır: Bloksma, A.H. 1972).
4. Bloksma, A.H. 1971. Rheology and Chemistry of Dough, in *Wheat Chemistry and Technology* (ed. by Y. Pomeranz), 2nd ed., AACC.
5. Bloksma, A.H. 1972. Rheology of Wheat Flour Doughs. *J. Texture Studies* 3, 3.
6. Glucklich, J.; Shelef, L. 1962 a. A Model Representation of the Rheological Behaviour of Wheat - Flour Dough. (Alınmıştır: Bloksma, A.H. 1972)
7. Glucklich, J.; Shelef, L. 1962 b. An Investigation into the Rheological Properties of Flour Dough. *Studies in Shear and Compression. Cereal Chem.* 39, 242.
8. Halton, P. 1949. Significance of Load - Extension Tests in Assessing the Baking Quality of Wheat Flour Doughs. *Cereal Chem.* 26, 24.
9. Hibberd, G.E.; Wallace, W.J. 1966. Dynamic Viscoelastic Behaviour of Wheat Flour Doughs. I: Linear Aspects' (Alınmıştır: Bloksma, A.H. 1972)
10. Hibberd, G.E.; Parker, N.S. 1975. Measurement of fundamental rheological properties of wheat flour doughs. *Cereal Chem.* 52, 1.
11. Hosoney, R.C.; Hsu, K.H.; Junge, R.C. 1979. A simple spread test to measure the rheological properties of fermenting dough. *Cereal Chem.* 56, 141.
12. Kováts, L.T.; Lásztity, R. 1966. Neuere Ergebnisse in der Rheologie des Teiges II: Spannungs - relaxation der Weizenmehl - Teige. (Alınmıştır: Bloksma, A.H. 1972)
13. Matsumoto, H.; Nishiyama, J.; Hlynka, I. 1973. Internal Pressure in yeasted dough II. *Cereal Chem.* 50, 363.
14. Matsumoto, H.; Ono, H.; Mita, T. 1974. Relaxation of pressure in dough. *Cereal Chem.* 51, 758.
15. Matsumoto, H.; Nishiyama, T.; Kuninori, T. 1975. Rheology of fermenting dough. *Cereal Chem.* 52, 82.
16. Müller, H.G.; Williams, M.V.; Russell Eggitt, P.W.; Coppock, J.B.M. 1961. Fundamental Studies on Dough with the Brabender Extensograph I: Determination of Stress - Strain Curves. *J. Sci. Food Agr.* 12, 513.
17. Müller, H.G. 1975. Rheology and the conventional bread and biscuitmaking process. *Cereal Chem.* 52, 89.
18. Rasper, V.F. 1975. Dough rheology at large deformations in simple tensile mode. *Cereal Chem.* 52, 24.
19. Schofield, R.K.; Scott Blair, G.W. 1933. The relationship between Viscosity, Elasticity and Plastic Strength of a Soft Material as Illustrated by some Mechanical Properties of Flour Dough III. (Alınmıştır: Bloksma, A.H. 1972).
20. Seibel, W.; Crommentuyn, A. 1963. Erfahrungen mit dem Maturographen und Ofentriebgeraet I: Beschreibung und Arbeitsweise der Geraete. *Brot u. Gebäck* 17, 139.
21. Shelef, L.; Bouso, D. 1964. A New Instrument for Measuring Relaxation in Flour Dough. (Alınmıştır: Bloksma, A.H. 1972).
22. Smith, J.R.; Smith, T.L.; Tschögl, N.W. 1970. Rheological Properties of Wheat Flour Doughs III: Dynamic Shear Modulus and its Dependence on Amplitude, Frequency, and Dough Composition. (Alınmıştır: Bloksma, A.H. 1972)
23. Ünal, S.S. 1980. Hamur Niteliklerine Bazı Katkı Maddelerinin Etkisi. *E.Ü. Gıda Fakültesi Dergisi.* Sayı 1, 13.
24. Ünal, S.S. 1981. Bazı Faktörlerin Hamur ve Ekmek Yapısına Etkileri. *E.Ü. Gıda Fakültesi Dergisi.* Sayı 2, 117.
25. Wasserman, Von L. 1980. Die Bedeutung der Rheologie für die Getreidetechnologie. *Zeitschrift für Lebensmittel - technologie und Verfahrenstechnik.* 31, 7.