

**POLİETİLEN GLİKOL-TUZ-SU SİSTEMLERİNDE  
VİSKOZİTE TAYİNİ**

**Nil Zeliha ALBAY**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**Eylül 2005  
ANKARA**

Nil Zeliha ALBAY tarafından hazırlanan POLİETİLEN GLİKOL-TUZ-SU SİSTEMLERİNDE VİSKOZİTE TAYİNİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç.Dr.Ufuk Gündüz ZAFER  
Tez Yöneticisi

Bu çalışma, jürimiz tarafından Kimya Mühendisliği Fen Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Prof Dr. Nurdan Saraçoğlu

Üye : Doç.Dr. Göknur Bayram

Üye :Doç.Dr. Ufuk Gündüz Zafer

Bu tez, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygundur.

**POLİETİLEN GLİKOL-TUZ-SU SİSTEMLERİNDE  
VİSKOZİTE TAYİNİ  
(Yüksek Lisans Tezi)**

**Nil Zeliha ALBAY**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
Eylül 2005**

**ÖZET**

Yapılan bu çalışmada polietilen glikol-tuz-su sistemlerinde viskozitenin sıcaklık ve konsantrasyonla değişimi incelenmiştir. Tuz olarak potasyum fosfat ve amonyum sülfat tuzları kullanılmıştır. 20, 25, 30, 35, 40 °C'de; polietilen glikol için ağırlıkça % 2,5, 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20, potasyum fosfat için ağırlıkça % 5, 5,9, 6,5, 7,5, 8,2, 9,6, 11, 13, amonyum sülfat için ağırlıkça % 7,5, 8,5, 8,75, 10,5, 11,5, 12, 13, 14 konsantrasyonlardaki sistemlerin viskoziteleri ölçülmüştür. Sabit konsantrasyonlarda sıcaklık arttıkça viskozite değerleri azaldığı, sabit sıcaklıkta konsantrasyon değeri arttıkça viskozite değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Üçlü sistemlerin viskoziteleri, ikili sistemlerin viskozitelerinden hesaplanabilir ve endüstride kullanılabilir.

**Bilim Kodu : 603.03.02**  
**Anahtar Kelimeler : Viskozite, PEG, potasyum fosfat, amonyum sülfat**  
**Sayfa Adedi : 81**  
**Tez Yöneticisi : Doç. Dr. Ufuk Gündüz Zafer**

**VISCOSITY MEASUREMENT IN POLYETHYLENE GLYCOL-SALT-  
WATER SYSTEMS**

**(M.Sc.Thesis)**

**Nil Zeliha ALBAY**

**GAZI UNIVERSTY**

**INSTUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

**September 2005**

**ABSTRACT**

**In this study, the change of viscosity with temperature and concentration is investigated for polyethylene glycol-salt-water systems. Potassium phosphate and ammonium sulfate salts are used in the systems. Viscosities of polyethylene glycol-salt-water systems with known concentrations are measured. At 20, 25, 30, 35, 40 °C temperatures, viscosity measurements of the systems are done at 2,5, 5, 7,5, 10, 12,5, 15, 17,5, 20 % (w/w) concentrations for polyethylene glycol, at 5, 5,9, 6,5, 7,5, 8,2, 9,6, 11, 13 % (w/w) concentrations for potassium phosphate and at 7,5, 8,5, 8,75, 10,5, 11,5, 12, 13, 14% (w/w) concentrations for ammonium sulfate. It is observed that as the temperature increases at constant concentration, the viscosities decrease and as the concentration at constant temperature increases, the viscosities increase as well. Viscosities of ternary systems can be predicted using viscosities of binary systems, and can be used in the industry.**

**Science Code : 603.03.02**  
**Key Words : Viscosity, PEG, Potassium phosphate, Ammonium sulfate**  
**Page Number : 81**  
**Adviser : Assoc.Prof. Dr. Ufuk Gündüz Zafer**

## **TEŐEKKÖRLER**

Çalıőmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Doç.Dr.Ufuk Gündüz ZAFER'e, manevi destekleriyle beni hiçbir zaman yalnız bırakmayan aileme teőekkürü bir borç bilirim.

## İÇİNDEKİLER

	<b>Sayfa</b>
ÖZET.....	iii
ABSTRACT.....	iv
TEŞEKKÜRLER.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	viii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	5
3. TEORİK BİLGİ.....	14
3.1. Sulu İkili Faz Sistemleri.....	14
3.2. Faz Diyagramları.....	14
3.3. Polietilen Glikol(PEG).....	15
3.4. Viskozite.....	16
3.4.1. İdeal akışkanlar.....	17
3.4.2. Gerçek akışkanlar.....	17
3.4.3. Mutlak viskozite.....	21
3.4.4. Kinematik viskozite.....	21
3.4.5. Özgül viskozite.....	21
3.5. Viskozite Üzerine Sıcaklık ve Basıncın Etkisi.....	22
3.5.1. Sıcaklığın etkisi.....	22
3.5.2. Basıncın etkisi.....	23

	<b>Sayfa</b>
3.6. Çözeltilerin Viskoziteleri.....	23
3.6.1. Polimer çözeltilerinin viskoziteleri.....	25
3.6.2. Sıvıların viskozitesi.....	26
3.6.3. Karışımların viskozitesi.....	29
3.7. Viskometreler.....	29
3.7.1. Düşen küreli viskometreler.....	30
3.7.2. Rotaviskometreler.....	31
3.7.3. Kapiler viskometreler.....	32
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	35
4.1. Kullanılan Malzemeler.....	35
4.2. Kullanılan Cihazlar.....	36
4.3. Deney Düzeneği.....	37
4.4. Kullanılan Yöntem.....	37
5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	39
5.1. Arrhenius Denklemi.....	39
5.2. Grunberg-Nissan Denklemi.....	55
6. ÖNERİLER.....	63
KAYNAKLAR.....	65
EKLER.....	68
Ek-1. PEG(3400)-Potasyum Fosfat-Su Sistemi.....	69
Ek-2. PEG(3350)-Amonyum Sülfat-Su Sistemi.....	70
Ek-3. Hesaplamalarla İlgili Grafikler.....	71
Ek-4. Grunberg-Nissan Denklemiyle İlgili Hesaplamalar.....	78
ÖZGEÇMİŞ.....	81

## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 3.1. Polimer çözeltileri için kullanılan viskozite tanımları.....	26
Çizelge 5.1. PEG3350-su çözeltilerin deneysel ve hesaplanan viskoziteleri [3.6].....	41
Çizelge 5.2. Potasyum fosfat-su çözeltilerin deneysel ve hesaplanan viskoziteleri [3.6].....	43
Çizelge 5.3. Amonyum sülfat -su çözeltilerin deneysel ve hesaplanan viskoziteleri [3.6].....	45
Çizelge 5.4. PEG3350-potasyum fosfat-su çözeltilerin deneysel ve hesaplanan viskoziteleri [3.6].....	47
Çizelge 5.5. PEG3350-amonyum sülfat-su çözeltilerinin deneysel ve hesaplanan viskoziteleri [3.6].....	49
Çizelge 5.6. PEG-su çözeltilerinin aktivasyon enerjisi.....	51
Çizelge 5.7. Potasyum fosfat-su çözeltilerinin aktivasyon enerjisi.....	52
Çizelge 5.8. Amonyum sülfat-su çözeltilerinin aktivasyon enerjisi.....	52
Çizelge 5.9. PEG-Potasyum fosfat-su çözeltilerinin aktivasyon enerjisi.....	53
Çizelge 5.10. PEG-Amonyum sülfat-su çözeltilerinin aktivasyon enerjisi.....	53
Çizelge 5.11. A sabitinin farklı sıcaklardaki değeri.....	54
Çizelge 5.12. $R^2$ 'nin farklı sıcaklıklardaki değeri.....	54
Çizelge 5.13. PEG3350-PF-su çözeltilerin deneysel ve hesaplanan viskoziteleri [3.26], (G = 22,2).....	56
Çizelge 5.14. PEG3350-amonyum sülfat-su çözeltilerin deneysel ve hesaplanan viskoziteleri[3.26], (G=29,8).....	58

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 3.1. Polietilen glikolün yapısı.....	15
Şekil 3.2. Çeşitli akışkanların kayma gerilimi( $\tau$ )-hız gradyanı( $du/dy$ ) değişimi.....	17
Şekil 3.3. Rotaviskometre.....	31
Şekil 3.4. Oswald, Ubbelohde, Cannon-Fenske viskometreleri.....	33
Şekil 4.2. Cannon-Fenske viskometresi.....	36
Şekil 4.3. Deney Düzenegi.....	37
Şekil 5.1. 20°C’de farklı konsantrasyonlarda PEG-su sistemi için viskozite değişimleri ( ■: PEG6000 literatür (13), ◆: PEG3350 literatür (14), ▲ : PEG3350 bu çalışma).....	62
Şekil 5.2. 20 °C’de farklı konsantrasyonlarda PEG-su sistemi için viskozite değişimleri ( ■: PEG 1000literatür(19),◆: PEG3350 bu çalışma).....	62

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılan bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamalarıyla birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
<b>A</b>	İletim alanı, m <sup>2</sup>
<b>D</b>	Moleküler çap, m
<b>F</b>	Kuvvet, N
<b>m</b>	Kütle, kg
<b>P</b>	Basınç, Pa
<b>R</b>	Gaz sabiti, 8,314J/kmol
<b>T</b>	Sıcaklık, K
<b>Yunan Harfleri</b>	<b>Açıklama</b>
<b>μ</b>	Viskozite, Pa.s
<b>τ</b>	Kayma gerilimi, N/m <sup>2</sup>
<b>σ</b>	Yüzey gerilimi, mN/m
<b>ρ</b>	Yoğunluk, kg/m <sup>3</sup>
<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
<b>PEG</b>	Polietilen glikol
<b>PF</b>	Potasyum fosfat

## 1. GİRİŞ

Biyokimya mühendisliğinin ilk gelişimi fermantasyon teknolojisinde ve endüstriyel mikrobiyolojideki uygulamalarla başlamıştır. Moleküler biyoloji ve genetik mühendisliğindeki ilerlemeler sonucunda günümüzde değişik biyolojik ürünler üretilmektedir. Bu uygulamaların ürünlerinin bazıları antibiyotikler, proteinler, enzimler, polisakkaritler, mayalar ve hormonlardır. Günümüzde tıp konusunda etkin proteinler ve mikroorganizmaların çalışmaları devam etmektedir (1).

Biyoteknoloji, hızla gelişen bir sektördür. İnsan hayatının kalitesini arttırmak ve yararlı ürünler elde etmek için çalışan bu sektör aslında insanlık tarihi kadar eskidir. Biyoteknolojide yeni ürünler elde edilmektedir. Bu ürünler karışım, solüsyon içersindedir ve ayırma işlemi gerektirmektedir. Sulu iki faz sistemleri de biyoteknolojide kullanılan ayırma işlemlerinden biridir. Sulu iki fazlı sistemlerin faz viskozitelerinin bulunması önemlidir. Bu ürünlerin saflaştırılmasında faz viskozitelerinden yararlanır. Biyomoleküllerin ekstraksiyonunda fazların karakteristik özelliği dolayısıyla viskozite değerleri bilinmelidir. Bu nedenle ekstraktör tasarımında fazların viskozitelerinin bilinmesi gereklidir (1, 2).

İki ya da daha fazla polimerin sulu çözeltilerinin fazlara ayrılması, su moleküllerinin yakın polimerlere kolayca yönelmesi sonucu polimerin alıcıları ile su moleküllerinin vericileri arasında meydana gelen hidrojen bağı etkileşimleri olarak açıklanabilir. İki faz arasındaki dağılım pek çok faktöre bağlıdır. Dağılan biyomoleküller ile herbir fazın bileşenleri arasında etkileşim sırasında beklenen hidrojen bağları, yük etkileşimleri, van der Waals kuvvetleri, hidrofobik etkileşimler ve sterik etkileri içeren kompleks olaylardır. Bu nedenle dağılım faz oluşturan polimerlerin molekül ağırlığı, kimyasal özellikleri gibi faktörlerle ilişkilidir. Partiküllerin faz bileşenleri ile etkileşimi ve dağılımı yüzeye bağımlı bir olaydır. Dağılım çalışmalarında, tuz iyonlarının fazlara karşı ilgisinin farklı olması fazlar arasında bir elektiriksel potansiyel meydana getirir ve bu durum yüklü biyomoleküllerin dağılımını kuvvetle etkiler. Dağılımın bu kadar çok faktöre bağlı olmasından dolayı, sulu iki fazlı sistemleri ile saflaştırma işlemi ve sonuçlarının açıklanması oldukça zordur (1).

Dağılım çalışmalarında polietilen glikol ve dekstran diğer polimerlere göre daha fazla tercih edilir. Çünkü bunlar zehirli değildir ve dünyanın pek çok ülkesinde ilaç sektöründe kullanılırlar. Ancak diğer polimerler de kendi kimyasal ve ekonomik özelliklerine göre benzer şekilde kullanılabilir. Saflaştırma işleminde PEG-dekstran-su yerine PEG-tuz-su daha fazla tercih edilir. Bunun nedeni bu tekniğin daha ucuz ve ayırmada yüksek verimli ve basit olmasıdır. Polimer-polimer veya polimer-tuz sistemlerindeki en karakteristik özellik % 85-% 90 oranında su içermesi ve merkezi biyomoleküllerin ve hücrel partiküllerin yapılarında herhangi bir değişiklik olmadan saflaştırılmasına olanak sağlamasıdır. En yaygın kullanılan kombinezasyonlar PEG ve dekstrandır. Saflaştırma işleminde PEG-dekstran sistemleri yerine PEG-potasyum fosfat (PF) sistemleri daha çok tercih edilir. Bunun nedeni bu sistemlerin ayırmada yüksek verimli ve basit olmasıdır. Ayrıca saflaştırma işleminde maliyet önemlidir. PEG-potasyum fosfat, PEG-dekstrandan daha ucuz olduğu için tercih edilir (1, 2).

Biyoteknolojide elde edilen bu ürünlerin saflaştırılması ve nitelendirilmesi diğer çalışmalar için bir ön basamak niteliği taşımaktadır. Bu işlemler için de bir planlamanın olması gerekmektedir. Belirli kriterlere göre saflaştırma stratejisi belirlenmelidir. Temel kriter en düşük maliyet, en yüksek saflık ve kısa süredir. Bunlara göre de diğer basamaklar düzenlenir (1).

Bu noktada hedeflenen amaca en uygun şekilde biyoteknolojik ürünün saflaştırılmasını gerçekleştirmek için öncelikle ne düzeyde bir saflık istendiği, saflaştırılacak ürünün miktarı, en önemli kriterlerden biri olan saflaştırma prosesinin ne kadar zaman ve maliyetle gerçekleştirilebileceği önceden belirlenmesidir. Bununla birlikte tüm bu kriterler birbiri içinde hedeflenen amaca göre öncelik sırasına sahiptir. Örneğin; insan sağlığı araştırmaları için oldukça fazla miktarda ve yüksek saflıkta biyoteknolojik ürüne gereksinim duyulur. Bu durumda zaman ve maliyet ikincil olarak önceliklidir. Halbuki biyoteknolojik ürünün yapı-fonksiyon ilişkisinin belirlenmesi amaçlanıyor ise saflaştırma işlemi süresince aktivite kaybının

en aza indirgenmesi öncelikli ve gerekli olduğundan burada zaman en öncelikli kriter olacaktır (1).

Ayrıca saflaştırılacak ürünün ne için gerekli olduğuna karar verilmelidir. Genel olarak bir laboratuvar çalışmaları için ve bir de sanayide kullanım için saflaştırma istenir. Genel olarak laboratuvar çalışmaları için az miktarda madde ama saflık derecesi mümkün olduğu kadar yüksek, sanayideki kullanımı için ise az miktarda ama saflık derecesinin yüksekliği pek de fazla olmayan biyoteknolojik ürün istenir (1).

Bütün ürünlerde özellikle de klinik uygulamalarda kullanılanlarda yüksek saflık ve verim çok önemlidir. Saflaştırma işlemlerindeki amaç süspansiyon halindeki maddelerden, yüksek saflıkta kuru ürün elde etmektir. Biyokimyasal ayırma ve saflaştırma işlemleri değişik biyomoleküller için birbirine benzer dört aşamadan oluşmaktadır (1).

*1. Çözünmeyen safsızlıkların giderilmesi:* Çoğunlukla küçük konsantrasyonlarda veya ürün kalitesini yükseltmek için uygulanır. Santifüj ve filtrasyon bu bölümün temelini oluşturmaktadır (1).

*2. Ürünlerin izolasyonu:* Bu aşama istenilen ürün haricinde farklı özelliklere sahip istenmeyen kirleticilerin giderilmesini sağlar. Adsorpsiyon ve ekstraksiyon tipik örneklerdir (1).

*3. Saflaştırma:* Ürünü ve aynı kimyasal fonksiyonlara sahip safsızlıkları gidermek için bu üretim teknikleri tercih edilmektedir. Kromatografi ve çöktürme teknikleri bu tekniklerin örnekleri olarak verilebilir (1).

*4. Son saflaştırma:* Ürüne son hali verecek olan bu aşama sistemin en sonunda kullanılır. Bu aşamada kristalleştirme ve kurutma gibi iyileştirmeler uygulanır (1).

Bulunan ikili sistemlerin viskozitelerinden yola çıkılarak üçlü sistemlerin viskoziteleride teorik olarak hesaplanabilir ve endüstriyel ölçümlerde kullanılabilir. Bir çok endüstriyel prosesde sıvının viskozitesini ya da yoğunluğunu kontrol etmek üzere proses sıvısına suda çözünen polimer ilave edilmektedir. Bunun örnekleri emülsiyon ve süspansiyon polimerizasyonunda, gıda endüstrisinde, hidrometalurjide ve son zamanlarda biyolojik proseslerde sık görülmektedir. Kütle aktarımı, endüstride kullanılan reaktörlerin tasarımı ve ölçeklendirilmesinde önemli bir unsurdur. Ortamın viskozitesi arttıkça kütle aktarım katsayısının azalacağından kütle aktarımı da azalır. Bugüne kadar yapılan çalışmalarda ortama katılan polimer katkı maddelerinin sulu sistemin viskozitesini değiştirdiği bir gerçektir (2, 3).

Bu çalışmada polimer miktarı artırılarak endüstriyel ölçüm uygulamalarında kullanılan viskozitenin nasıl değiştiği ve sıcaklığın viskoziteye etkisi incelenmiştir. Viskoziteyi etkileyen sıcaklık, madde konsantrasyonu, maddenin cinsi ve molekül ağırlığı gibi parametreler üzerine çalışılmıştır. Bu nedenle çalışma koşullarının optimizasyonu amacıyla sıcaklık, konsantrasyon, molekül ağırlığı ve madde cinsinin viskoziteye etkisinin belirlendiği deneysel çalışmalar yapılarak bu parametrelerin viskoziteyi nasıl ve hangi yönde etkiledikleri belirlenerek ölçümlerin kontrollü bir şekilde ve en uygun şartlarda gerçekleştirilmesi sağlanmıştır.

Çalışmamızda PEG-su, PF-su, Amonyum sülfat-su ikili sistemler ve PEG-PF-su, PEG-amonyum sülfat-su içeren üçlü sistemler ile çalışılmıştır. Bu sistemlerin viskozitelerinin konsantrasyon ve sıcaklıkla nasıl değiştiği gözlemlenmiştir. Çalışmada iki model kullanılmıştır. Bunlar Arrhenius ve Grunberg-Nissan denklemleridir. PEG-su, potasyum fosfat-su, amonyum sülfat-su içeren ikili sistemlerin ve PEG-potasyum fosfat-su, PEG-amonyum sülfat-su içeren üçlü sistemlerin Arrhenius denklemiyle hesaplanan ortalama sapma değeri % 5,3, PEG-potasyum fosfat-su, PEG-amonyum sülfat-su içeren üçlü sistemlerin Grunberg-Nissan denklemiyle hesaplanan ortalama sapma değeri % 4,9 olarak bulunmuştur.

## 2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Pandit ve arkadaşları (1989), çalışmalarında dekstran, polietilen glikol ve bovine serum albumin ikili sulu çözeltilerini kullanmışlardır. Bu maddelerin karışımlarıyla çalışmışlardır. Viskoziteyi 10, 20, 28, 40 °C de ölçmüşlerdir. PEG-tuz sistemlerinde tuz olarak sülfat ve fosfat kullanmışlardır. Dekstranın 523000 ve 143000 moleküler ağırlıklarıyla çalışılmıştır. Polietilen glikolün ise 8000 ve 3350 moleküler ağırlıklarını kullanmışlardır. PEG-3350 için ağırlıkça 5, 10, 20, 30, 40 % çözeltileri, dekstran için ise ağırlıkça 10, 15, 20, 25 % çözeltileri kullanılmıştır. Viskozite ölçümlerini Ubbelohde viskometresi kullanarak yapmışlardır. Viskoziteye sıcaklığın, moleküler ağırlığın ve konsantrasyonun etkisini incelemişlerdir. Çözeltilerin çalışılan koşullarda Newton tipi davranış sergilediği bulunmuştur. Sulu polimer çözeltilerinin viskozitesi Haake (RVIII) viskometresi ile ölçülmüştür. Standart sapma polietilen glikol için 4,07, bovine serum albumin için 0,138, dekstran için 12,4 bulunmuştur. Karışımların viskozitelerinin konsantrasyonla doğrusal olmadığı gözlemlenmiştir (4).

Gonzalez-Tello ve arkadaşları (1994), çalışmalarında PEG'in derişik sulu çözeltilerinin 4 °C ve 25 °C'de dinamik viskozite değerlerini ölçmüşlerdir. PEG'in 1000, 3350, 8000 moleküler ağırlıklarını kullanılmışlardır. PEG konsantrasyonları ağırlıkça % 10-50 arasında, MgSO<sub>4</sub> ağırlıkça % 3-20 arasında çalışılmıştır. Ayrıca PEG-MgSO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O karışımları ile de çalışılmıştır. Dinamik viskoziteyi Lee ve Teja denklemini kullanarak hesaplamışlardır. Değişik araştırmacılar tarafından Huggins ve Kraemer denklem modelleri kullanılarak PEG'in seyreltik çözeltilerinde viskozite değerlerine sıcaklığın, tuz konsantrasyonunun, iyonik maddelerin ve kayma hızının etkisi üzerine çalışılmıştır. Deneysel sonuçlarda viskozitenin 10 mPa'dan büyük değerleri için ortalama sapma % 0,5, viskozitenin 10 mPa'dan küçük değerleri için ortalama sapma % 17,5 bulunmuştur (5).

Holgado ve arkadaşları (1999), çalışmalarında polietilen glikol monometilen eter ve 1-propanol içeren karışımların viskozite ve yoğunluklarını 5, 15, 25, 35, 45 °C'de belirlenen konsantrasyonlarda ölçmüşlerdir. Tüm konsantrasyonlarda çözeltinin viskozitelerini önceden bularak deneysel verilerle karşılaştırılmış, bulunan

sonuçlar birbirleriyle ilişkilendirilmiştir. Fiziksel özellikler ve dietilen karışımların termodinamik özellikleri ve farklı alifatik alkol ile polietilen glikol monometil eterlerin sistematik çalışmasıyla ilgilenmişlerdir. Çeşitli sıcaklıklarda polietilen glikol (350) monometilen eter (MMPEG 350) içeren karışımların fiziksel özelliklerini rapor etmişlerdir. Saf sıvıların ve karışımların kinematik viskozitelerini Ubbelohde viskometresi kullanarak bulmuşlardır. Ölçümler her bir sıcaklık ve konsantrasyonlarda beş kere tekrarlanmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Kinematik viskozitede, tüm deneysel hata yaklaşık olarak 0,003 cSt olarak bulunmuştur. Dinamik viskozite denklemlerle bulunmuştur. Viskozite hesaplarında Jones-Dole denklemini de kullanmışlardır. Jones-Dole B katsayısının değerleri sıcaklıkla artmıştır. Jones-Dole denklemi elektrolit olmayan çözeltilerin viskometrik çalışmalarında kullanılmakta, çözünen ve çözücü etkileşimi hakkında daima temel bilgi vermektedir. Sabit basınçta karışımların viskozite ve sıcaklıkla ilişkisini Arrhenius denklemini kullanarak göstermişlerdir. Saf bileşenlerin ve karışımların viskozitelerini ise Grunberg ve Nissan denklemi kullanarak bulmuşlardır. Konsantrasyonla kinematik viskozite değişimini McAllister denklemi ile analiz etmişlerdir. Düşük konsantrasyonlarda dinamik viskozitenin ortalama sapmasını 0,423 olarak, tüm konsantrasyonlarda deneysel verilerle hesaplanan verilerin ortalama sapmasını ise 0,329 olarak bulmuşlardır (6).

Cheng ve arkadaşları (1999), polietilen glikol, polivinil alkol örnekleriyle çalışmışlardır. İki kapiler viskozimetre kullanmışlardır. Viskozite üzerine duvar etkisini bulmak için birinin duvar yüzeyi parafin ile kaplanmıştır. Bulunan viskozite sonuçları karşılaştırılmıştır. Polietilen glikol ve polivinil alkolün seyreltik çözeltileri kullanılmıştır. Viskozite hesaplamak için Poiseulle denkleminde yararlanılmıştır. Çok seyreltik konsantrasyonlarda PEG ( $M_n = 21090$ ,  $M_w/M_n = 1,75$ ) ve PVA (DP = 1750) çözeltilerinin parafin kaplı ve parafinsiz kapiler viskozimetrede ölçülen viskozitelerinden relatif viskoziteleri bulunmuş ve grafiğe geçirilerek grafik üzerinde farkları gözlemlenmişlerdir. Aynı basınç ve konsantrasyonlarda parafinsiz kapiler viskometreye ölçülen viskozite, parafinli kapiler viskometreye ölçülen viskoziteden büyük çıkmıştır. Bu artış; polietilen glikol için % 3,5, polivinil alkol için % 6,2'dir. (7).

Gündüz (2000), yaptığı çalışmasında PEG ve dekstran kullanarak 30, 50, 70 °C sıcaklıklarda dinamik viskozite değerlerini ölçmüştür. PEG'in 8000 ve dekstranın 3750, 494000, 2000000 molekül ağırlıklarını kullanmıştır. PEG-dekstran-su çözeltilerinin viskozitelerinin değerlerini hesaplamak için Grunberg tipi bir denklem kullanılmıştır. Denklemdaki parametre PEG 8000-dekstran 2000000-su çözeltilisinde 1,81, PEG 8000-dekstran 494000-su çözeltilisinde 2,36, PEG 8000-dekstran 2000000-su çözeltilisinde 2,57 olarak hesaplanmıştır. 30, 50, 70 °C sıcaklıkta homojen sistemlerin suda polietilen glikol ve dekstran kompozisyonlarını gösteren farklı konsantrasyonlarda polietilen glikol-dekstran-su karışımları ve polietilen glikol-su ve dekstran-su çözeltileri için konsantrasyonlar ağırlıkça % 5,0 ve 7,0 arasında alınmıştır. Viskozite ölçümleri Cannon-Fenske viskometresi ile yapılmıştır. Relatif hata % 0,00-9,37 arasında bulunmuştur. Önerilen model tüm durumlarda oldukça tatmin edici sonuçlar vermiştir (2).

Cruz ve arkadaşları (2000), çalışmalarında kinematik viskoziteyi farklı moleküler ağırlıklarda polietilen glikolün ve sıcaklığın bir fonksiyonu olarak bulmuşlardır. Viskozite ölçümlerini atmosfer basıncında ve 15,15 ile 75,15 °C arasında yapılmıştır. Polietilen glikolün 200, 400, 600, 1000, 1500 ve 3350 moleküler ağırlıklarını kullanmışlardır. Kinematik viskoziteyi Lee-Teja denklemini kullanarak hesaplamışlardır. Her bir PEG için viskozite verileri sıcaklık çalışmalarıyla ilişkilendirilmiş ve karbon atomları arasındaki ilişki genelleştirilmiştir. Kinematik viskoziteyi Cannon-Fenske kapiler viskometresi kullanılarak ölçülmüştür. Her bir ölçüm beş kere tekrarlanmış ve ortalama viskozite değeri alınmıştır. Deneysel ve hesaplanan viskoziteler arasındaki ortalama sapma % 1,6 olarak bulunmuştur (8).

Graber ve arkadaşları (2002), çalışmalarında 15 ve 40°C arasında altı sıcaklıkta sodyum nitrat-polietilen glikol-suyun doymayan çözeltilerinin viskozitelerini ve yoğunluklarını ölçmüşlerdir. Çözeltilerde sodyum nitrat ve PEG-4000'in konsantrasyonu ağırlıkça % 3-24 arasında kullanılmıştır. 25 °C'de çeşitli çözeltilerin viskozitelerini ölçmüşlerdir. PEG'in 1000, 3350 ve 8000 molekül ağırlıklarıyla çalışmışlardır. Magnezyum sülfat, amonyum sülfat, sodyum karbonat ve potasyum fosfatı içeren karışımlarla çalışmışlardır. İkili sistemlerin polietilen glikol-potasyum

fosfat ve polietilen glikol-amonyum sülfat viskoziteleri ölçülmüştür. PEG'in (1, 2, 4, 6 ve 20)×10<sup>3</sup> molekül ağırlıkları kullanılmıştır. Polietilen glikolün farklı karışımlarını ve tuzların yoğunluklarını 25, 35, 45 °C'de ölçmüşlerdir. Birinci çalışmada PEG'in 1000 ve 6000 molekül ağırlıkları ile K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> ve NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> tuzları kullanılmıştır. İkinci çalışmada PEG'in 2000 ve 4000 molekül ağırlıkları ile Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub> ve NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> tuzları kullanılmıştır. Her bir çözeltinin kırılma indeksi refraktometre ile ölçülmüştür. Dinamik viskozite ölçümleri Brookefield DV-III ile yapılmıştır. Ortalama sapma % 5, maksimum sapma % 19 bulunmuştur (9).

Naidu ve arkadaşları (2002), çalışmalarında yoğunluk ve viskozitelerini dimetil sülfoksit ile etilen glikol, dietilen glikol, trietilen glikol, polyetilen glikol-200, polyetilen glikol-300, propilen glikol ve polypropilen glikol-1025 ikili sıvı karışımların hepsini dikkatli bir şekilde sırasıyla 35 °C'de ölçmüşlerdir. Grunberg-Nissan denklemini kullanarak viskoziteleri hesaplamışlardır. Saf sıvıların ve karışımların yoğunlukları 15 cm'lik piknometre kullanılarak belirlenmiştir. Her bir deneysel yoğunluk değerleri için üç ölçüm yapılarak ortalaması alınmıştır. Saf sıvıların ve ikili sıvı karışımların viskozitelerini Ubbelohde viskometresini kullanarak bulmuşlardır. Her bir viskozite değeri on ölçümün ortalaması alınarak bulunmuştur (10).

Baylaucq ve arkadaşları çalışmalarında (2002); trietil glikol, dimetil eter, tetraetilen glikol, dimetil eter, dimetil ve dietil karbonatla yüksek basınçta 0,15, 10,15, 20,15, 30,15, 50,15, 60,15, 70,15 °C sıcaklıkları arasında viskozite ve yoğunluklarını ölçmüşlerdir. Bunlar için model geliştirmişlerdir. Toplam 184 deneysel viskozite değerlerini ölçmüşlerdir. Ölçümler için gövdeli viskometre kullanmışlardır. Viskozitenin sıcaklıkla değişimini gözlemlemek için Andrade denklemi, basınç ve sıcaklıkla değişimini gözlemlemek için de Tait denklemi kullanmışlardır. Ortalama mutlak sapma dimetil karbonat için % 0.6, tetraetilen dimetileter için % 1.1, trietilen glikol dimetil eter için % 0.7, dietilen karbonat için % 0.9, ve maksimum sapma dimetil karbonat için % 1.8, trietilen glikol dimetil eter için % 2.3 dimetil karbonat için % 2.7, tetraetilen dimetileter için % 34 bulunmuştur (11).

Ninni ve arkadaşları (2002), çalışmalarında ikili, üçlü ve çok bileşenli karışımların kinematik viskozitelerini sıcaklığın fonksiyonu olarak ölçmüşlerdir. 200, 400, 600, 1000, 1500, 3350 molekül ağırlıklı polietilen glikol kullanmışlardır. Polietilen glikolün kinematik viskozitesini 20 ile 80 °C arasında ölçmüşlerdir. Farklı sıcaklıklarda kinematik viskoziteyi ölçmek için Cannon-Fenske viskometresini kullanmışlardır. Ölçümler en az beş kere tekrarlayıp ortalamasını almışlardır. GC-UNIMOD modelini kinematik viskoziteyi hesaplamak için seçmişlerdir. Ölçülen viskozitede en yüksek standart sapmayı % 8,5, en düşük standart sapmayı ise % 0,91 olarak bulmuşlardır. Ortalama standart sapmayı ise % 2,6 olarak bulmuşlardır. En yüksek standart sapma polietilen glikolün 200 ve 400 molekül ağırlığını içeren ikili karışımlarda gözlemlenmiştir. GC-UNIMOD modelini deneysel ve hesaplanan viskozite değerlerini bulmak için test etmişler ve çoğu durumda iyi sonuçlar verdiğini bulmuşlardır (12).

Ninni ve arkadaşları (2003), çalışmalarında polietilen glikolün çeşitli konsantrasyonlarında 200 ve 10000 arasında molekül ağırlıkları kullanılarak kinematik viskozitelerini bulmuşlardır. Mevcut çalışmada Kumar denklemi düzenlenmiş, polimer konsantrasyonlarında ve çeşitli sıcaklıklarda açıklanan sırasıyla polietilen glikolü içeren çözeltilerin kinematik viskozitelerini önceden tahmin etmek ve aralarında ilişki kurmak için kullanılmıştır. PEG konsantrasyonu PEG'in 200, 400, 600, 1000 ve 1500 molekül ağırlığı içeren sistemler için ağırlıkça % 50, PEG3350'de ağırlıkça % 30, PEG 8000 ve 10000'de ağırlıkça % 25 çözeltileri kullanılmıştır. Kinematik viskozite ölçümleri Cannon-Fenske kapiler viskometresi kullanılarak yapılmıştır. Deneysel her bir polietilen glikol karışımı için en az üç kere tekrarlanmış ve ortalaması alınmıştır. Gözlemlenen deneysel sonuçlar ile relatif hata % 5,5 arasında hesaplanmıştır (13).

Sisakht ve arkadaşları (2003), çalışmalarında polipropilen glikolün etanoldeki çözeltileri, polietilen glikolün sudaki ve etanoldeki çözeltilerlerinin viskoziteleri ve yoğunluklarını 15.2, 30.2, 35.2, 40.2, 50.2, 55.2, 60.2 °C'de ölçmüşlerdir. Polietilen glikolün çeşitli çözeltileri ile 200, 300, 6000 molekül ağırlıklarını ve polipropilen için 2025 molekül ağırlığı kullanmıştır. Yoğunluk ve viskozite verileri, her bir

sıcaklıktaki polimerlerin kütle oluşumlarıyla ilgili olarak anılan sıraya göre polinomial denklemlerle bulunmuştur. Yoğunluk ölçümleri 10cm<sup>3</sup>'lük cam piknometre ile yapmışlardır. Piknometrenin hacmi, distile su kullanılarak sıcaklığın bir fonksiyonu olarak ölçülmüştür. Yoğunluk ölçümleri 15,2 °C ve 60,2 °C arasında yapılmıştır. Çözeltinin sıcaklık kontrolü su banyosu sıcaklığı doğruluğunda ölçülerek yapılmıştır. Her bir ölçüm beş kere tekrarlanarak ortalaması alınmıştır. Bu çalışmada polimer çözeltilerinin viskozitelerini ölçmek için Ubbelohde viskozimetresi kullanılmıştır (14).

Sastry ve Patel (2003), çalışmalarında ikili karışım olarak (metil, etil, bütil ve izomil) asetat ve glikol (etilen, dietilen, trietilen ve polietilen) kullanmışlardır. Bu ikili karışımlar; metil asetat, etilen glikol, dietilen glikol-trietilen glikol ve propilen glikol; etilen asetat-dietilen glikol-trietilen glikol-propilen glikol; bütil asetat-trietilen glikol ve propilen glikol ve izomil asetat-propilen glikoldür. Bu ikili karışımların yoğunluklarını 20,15, 25,15, 30,15 ve 35,15 °C'de ölçmüşlerdir. Dinamik ve kinematik viskoziteleri ise 20,15 °C ve 30,15 °C'de ölçülmüştür. Grunber-Nissan, McAllister ve Auslander denklemleri karışımların dinamik ve kinematik viskozitelerini bulmak için kullanılmıştır. İki farklı Ubbelohde viskozimetresi kullanılarak saf sıvıların ve ikili karışımların viskozitelerini ölçmüşlerdir. Bağlı hata; metilen asetat + etilen glikol, metilen asetat + trietilen glikol, etilen asetat + trietilen glikol ve metilen asetat + propilen glikol için % 0,001 ile % 0,5, metilen asetat + dietilen glikol için % 0,001 ile % 0,7, etilen asetat + dietilen glikol için % 0,001 ile % 0,8 arasında, etilen asetat + propilen glikol için % 0,001 ile % 0,8, bütil asetat + trietilen glikol için % 0,001 ile % 0,9, bütil asetat + propilen glikol için % 0,001 ile % 0,8, izoamil asetat + propilen glikol için % 0,001 ile % 0,7 arasında bulunmuştur (15).

Romero ve arkadaşları (2004), çalışmalarında polietilen glikol + su, potasyum fosfat + su içeren ikili karışımları ve polietilen glikol + potasyum fosfat + su içeren üçlü karışımların dinamik viskozitelerini 30,15 °C'de ölçmüşlerdir. Molekül ağırlığı 1500 olan polietilen glikol kullanmışlardır. Polietilen glikolun stok çözeltisini ağırlıkça % 50 PEG içeren, potasyum fosfatın tampon çözeltisini PH 7'de ağırlıkça % 30 potasyum fosfat içeren stok çözeltisi kullanılarak hazırlamışlardır. Üçlü karışımlarda

faz ayrımı gözlemlemişler ve oluşan her iki fazın viskozitelerini ölçmüşlerdir. İkili ve üçlü karışımların dinamik viskozitelerini eş merkezli dönen silindirik reometre kullanarak ölçmüşlerdir. İkili su içeren polietilen glikol ve potasyum fosfat karışımlarının dinamik viskozitelerini bulmak için Gonzales-Tello denklemini kullanmışlardır. Üçlü karışımların viskozitesini, karışımda suyun konsantrasyonu arttırılması sonucunda sistemde polietilen glikol ve potasyum fosfat bileşimlerinin azalmasıyla azaldığını gözlemlemişlerdir. Üçlü karışımların viskozitesini bulmak için Grunberg denklemini kullanmışlar. Polietilen glikol için standart sapmanın en küçük ve en büyük değeri % 0,16 ve % 0,97 olarak, ortalama sapmayı ise % 0,8 olarak bulmuşlardır. En yüksek standart sapma tuz sistemi için % 2,91 olarak bulmuşlardır. Hesaplanan ve bulunan viskoziteler için seçilen model tüm sistemler için iyi sonuç vermiştir. Her bir ölçüm altı kere tekrarlanmış ve ortalaması alınmıştır (16).

Gündüz (2004), yaptığı çalışmasında polietilen glikol, bovine serum albuminin sulu çözeltileri ve polietilen glikol-bovine serum albumin-su çözeltilerinin dinamik viskozitelerini 15, 20, 25, 30 ve 35 °C'de ölçmüştür. Polietilen glikol-bovine serum albumin-su çözeltileri için Grunberg tipi bir denklem kullanılmıştır. Denklemden parametre her beş sıcaklık için bulunup, ortalaması alınmıştır. PEG'in 8000, dekstranın 37500, 494000 ve 2000000 molekül ağırlıklarını kullanmıştır. PEG konsantrasyonları kütlece % 4,0 ile % 11,0 arasında, bovine serum albumin konsantrasyonunda ise % 1,0 ile % 8,0 arasında çalışmıştır. Viskozite ölçümlerini Cannon-Fenske viskometresi ile yapmıştır. Belirtilen sıcaklıklarda suyun dinamik viskozitesini kullanarak dinamik viskoziteleri bulmuştur. Relatif hata % 0,00 ile 16,26 arasında, bağıl hata ise % 0,00 ile % 18,98 arasında bulunmuştur (17).

Ottani ve arkadaşları (2004), çalışmalarında polietilen glikolün 200, 300, 400, 1000 molekül ağırlıklarını, dimetil karbonat ve dietil karbonatı kullanmışlardır. Viskozite, yoğunluk ve kırılma indeksini, ikili sistemler için atmosferik basınç altında 35,15 °C'de ölçmüşlerdir. Polimer karışımlarında; karışım1 PEG300'den 600g + PEG400'den 270g, karışım 2 PEG200'den 300g + PEG400'den 700g, karışım 3 PEG200'den 550g + PEG600'den 550g ve karışım 4 için PEG200'den 550g +

PEG1000'den 500g alınarak çözeltiler oluşturulmuştur. Yoğunluğu vibratin-tube yoğunluk metresi, kırılma indeksini Abbe refraktometresi ile, viskoziteyi ise Ubbelohde viskometresi ile ölçmüşlerdir. Ölçümler her bir sıcaklık ve konsantrasyonlarda beş kere tekrarlanmış ve sonuçların ortalaması alınmıştır. Bu çalışmada viskozite, yoğunluk ve kırılma indeksini moleküler kütlelerin etkisini araştırmışlardır. Sıvıların ve karışımların kinematik viskozitelerini 35,15 °C'de ölçmüşlerdir. Karışımların ve polimerin viskozitesini 31,15, 33,15, 37,15, 41,15, 45,15 ve 49,15 °C'de ölçmüşlerdir. Viskozite ve sıcaklık Arrhenius denklemiyle ilişkilendirilmiştir (18).

Gonçalves ve arkadaşları (2005), çalışmalarında moleküler ağırlığı 1000 olan polietilen glikol içeren sulu çözeltiler ve tuzları içeren ikili, üçlü ve dördü sistemlerin kinematik viskozitelerini 25 °C'de ve farklı sıcaklıklarda ölçmüşlerdir. Deneysel viskozite verileri ikili sistemler için;  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  + su,  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  + su ve PEG 1000 + su, üçlü sistemler için; PEG 1000 +  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  + su, PEG 1000 +  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  + su, PEG 1000 +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  + su ve PEG 1000 +  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  + su, dördü sistemler için; PEG 1000 +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  +  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  + su için bulmuşlardır. Farklı moleküler kütle, farklı konsantrasyon ve farklı sıcaklıklar için sulu polietilen glikol karışımların kinematik viskozitelerini Kumar denklemi formüle edilerek bulmuşlardır. Kumar denklemi çözelti konsantrasyonların fonksiyonu olarak çözeltilerin viskozitelerini hesaplamak için literatürde mevcut denklemlerden biridir. Parametreler her bir çözünen için kullanılmış ve hesaplanmış, literatür değerleri ile karşılaştırılmıştır. Viskozite ölçümleri otomatik viskometre ile yapılmıştır. Polietilen glikol için ağırlıkça % 40, tuz için % 30 çözeltileri hazırlanmıştır. Çözelti hazırlamada hesaplanan hata % 0,02 olarak bulunmuştur. Üçlü ve dördü sistemlerin tüm kompozisyonları literatürde verilen denge verilerinin temelinde oluşturulmuştur. Deneyler en az onaltı kere tekrarlanmıştır. Deneysel ve hesaplanan viskozitelere ortalama sapma değerlerini PEG 1000 +  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  için % 7,38, PEG 1000 +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  % 4,21, PEG 1000 +  $\text{NaH}_2\text{PO}_4$  için % 1,64, PEG 1000 +  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  için % 6,15, PEG 1000 +  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  +  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  için % 3,93 olarak bulmuşlardır. Ortalama sapma % 4,8 olarak bulunmuştur. Bu değerler literatürde bulunan ortalama sapma değerlerinden daha

düşük çıkmıştır. PEG 1000'in ikili sistemlerin ortalama sapması, tuz için bulunan ortalama sapma değerleriyle karşılaştırıldığında daha büyük çıkmıştır (19).

Singh ve arkadaşları (2005), çalışmalarında 2-bütan, o-siglen, m-siglen, *p*-siglen ve izopropil benzenin ikili karışımlarının viskozite ve yoğunluklarını ölçmüşlerdir. İkili sistemleri; o-siglen + 2-bütan, m-siglen + 2-bütan, *p*-siglen + 2-bütan, izopropil benzen +2-bütan olarak almışlardır. Hesaplamalarda Redlich-Kister denklemi kullanılmıştır. Viskozite ölçümleri Ubbelohde viskometresi ile yapılmıştır. Bağlı hata değerleri; o-siglen + 2-bütan sistemleri için 0,0002 ile 0,3284, m-siglen + 2-bütan sistemleri için 0,0001 ile 0,2087, *p*-siglen + 2-bütan sistemleri için 0,0001 ile 0,4129, izopropil benzen + 2-bütan sistemleri için 0,0001 ile 0,1073 arasındadır. Viskozite sapması o-siglen, m-siglen ve izopropil benzen sistemleri için negatif, *p*-siglen için pozitif bulunmuştur. Sapmalar o-siglen için daha negatifken, m-siglen için daha az negatif değerler göstermiştir. İzopropil benzen değerleri ise negatiften pozitifeye değişmiştir (20).

### **3.TEORİK BİLGİ**

#### **3.1. Sulu İkili Faz Sistemleri**

Sulu ikili faz sistemleri iki polimer ile bir tuzun belli konsantrasyonlardaki çözeltileri karıştırılarak elde edilir. Sulu iki fazlı sıvı sistemlerinde her bir faz bir bileşence zengindir. Birbiri içinde çözünebilme polimerler için çok nadir rastlanan bir durum olduğundan polimer karışımlarda faz oluşumu çok yaygın bir olaydır (1).

Sulu ikili faz sistemlerine ait ilk bilgiler yıllar önce Alman mikrobiyolojist Beinjerinck'in nişasta, jelatin ve agarın sulu çözeltilerini karıştırmakta başarısızlığa uğramasıyla ortaya çıkmış ve rapor edilmiştir (1).

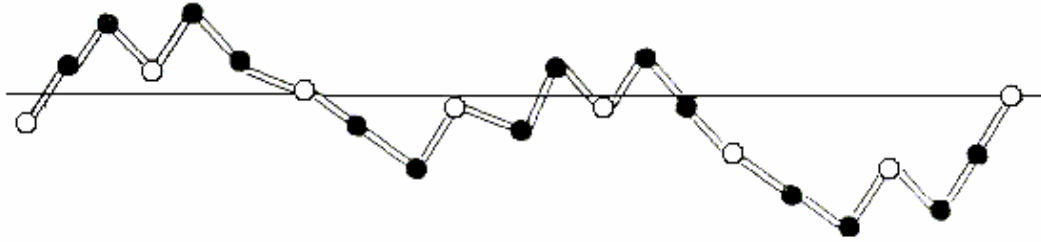
Sulu ikili faz sistemleri, iki küçük molekülle bileşen ile bir polimer karıştırılmasıyla da ortaya çıkabilir. Örneğin, polietilen glikol ve amonyum (veya magnezyum) sülfat iki fazlı sistemleri oluşturabilir. Alt faz tuz bakımından, üst faz polietilen glikol bakımından zengindir. Bir diğer örnek, dekstran-propil alkol-su'dur. Proteinler ve nükleik asitler de faz oluşturan polimerler gibi kullanılabilir. Örneğin, serum albumin ve polietilen glikol birbiriyle karışmaz ve belli konsantrasyonların üzerindeki sulu çözeltilerinin karıştırılması iki faz meydana getirir (1).

#### **3.2. Faz Diyagramları**

Faz oluşturan bir sistemde bileşen kompozisyonları iki boyutlu bir faz diyagramında gösterilebilir. Ek 1 ve Ek 2'de PEG- tuz (potasyum fosfat ve amonyum sülfat)-su sistemleri için faz diyagramları gösterilmektedir. Polimer karışımlarında faz oluşumu çok yaygın bir olaydır. Faz diyagramında grafiği iki alana ayıran çizgiye 'binodal' adı verilir. Çizginin üst tarafındaki noktalar iki fazlı sistemleri alt tarafındaki noktalar ise homojen çözeltileri oluşturur. Binodal eğri üzerindeki bütün kompozisyonlarda bir fazlı sistemden iki fazlı sisteme geçiş olur. Aynı bağıntı çizgilerinde bulunan noktaların faz kompozisyonları aynı, hacim oranları farklıdır (1).

### 3.3. Polietilen Glikol (PEG)

Polietilen glikol, etilen oksitin katalitik polimerizasyonu ile üretilen 1,2 epoksipolimerdir. Polimer zinciri iki metilen grup arasındaki bir bağlayıcı eter oksijeninin birbirini ardına sıralanması ile oluşur. PEG molekül yapısının (Şekil 3.1) en önemli özelliği, tekrar eden bağlayıcı eter oksijenin yalnız bir elektron çiftiyle kuvvetli bir alıcı hidrojen bağı yapmasıdır. Böylece iki su molekülü bunlardan herhangi birine bağlanabilir. Bazı durumlarda ise üç su molekülü eter oksijenle birleşebilir (1).



○ Eter oksijen, ● Metil grup

Şekil 3.1. Polietilen glikolün yapısı

Polietilen glikol sanayide ve teknolojiye yaygın bir kullanım alanına sahiptir. PEG tutkal yapımında, kaplamada, kozmetiklerde, deterjanlarda, gıda sanayinde, metalurjide, mürekkeplerde, medikal uygulamalarda, petrol geri kazanımında, kağıt ve giyim endüstrisinde, tekstilde olduğu gibi, boya sanayi ve ilaç sanayi gibi endüstriyel açıdan önemli alanlarda kullanılmasının yanı sıra aynı alanlar içinde teknolojisi yüksek ürünlerin elde edilmesinde de kullanılmaktadır; kanserli hastaların tedavisi bunlardan bir tanesidir. Polimerler; farmakolojide, medikal ve tıbbi alanlarda da yaygın bir kullanım alanına sahiptir. Hangi polimerin kullanılacağına tercihinde vücut içerisinde alacağı göreve dikkat edilir. Örneğin, medikal bir uygulamada kullanılacak polimer, lens gibi vücut içerisinde tepkimeye girmemelidir. Tepkimeye girerek bozunma işlemi başlangıçta suyla çözünme şeklinde olur; enzimlerin de polimerlerin bozunmasına büyük bir etkisi vardır. Bundan dolayı çalışılan polimerin

dokuyla uyumu, denek hayvanları üzerinde kullanımı ve en son olarak klinik deneyleri testlerine tabi tutulur. Polimerlerin çoğu için, hastalıkların tedavisinde kullanımı amacıyla çalışılmıştır. Öncelikle hayvanlar üzerinde denenen çalışma ürünleri, olumlu sonuçlar alındığı takdirde klinik deneylere tabi tutulur. Bu ürünlerin en önemlilerinden ve en çok geliştirilenlerden bir tanesi olan PEG, polimer-protein konjüгатları oluşturur ve pek çok lisanslı ilacın formülasyonuna girmiştir. Her ne kadar ilaç dozu düşük miktarda tutulsa da PEG'in zaten herhangi bir zehir etkisi yoktur (21, 22).

### **3.4. Viskozite**

Akışkanın akmaya karşı gösterdiği direnç olarak tanımlanır. Bütün akışkanlar az veya çok viskoziteye sahiptirler. Bunun nedeni akışkanın bir yerden bir yere akarken şekil değiştirmeye karşı gösterdiği dirençtir (23).

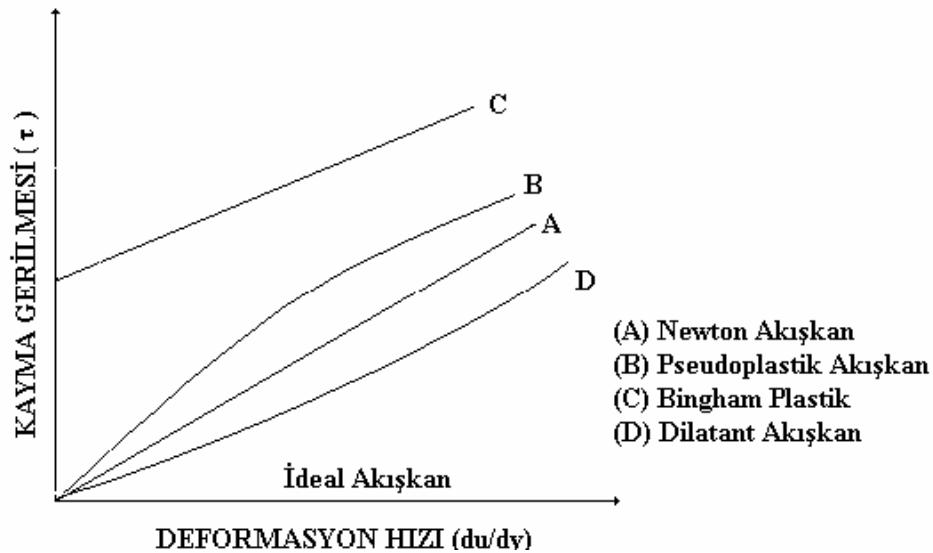
Akışkanlar en ufak bir kayma gerilmesi etkisi altında bile sürekli şekil değiştiren cisimlerdir. Ancak aynı büyüklükteki kayma gerilmelerinin oluşturacakları şekil değiştirme hızları, her akışkan için başkadır. Bunun nedeni ise, akışkanların şekil değiştirmeye karşı gösterdikleri dirençlerin farklı olmasıdır. Akışkanların şekil değiştirme dirençleri, molekülleri arasında oluşan sürtünme kuvvetlerinin bir sonucudur ve bu kuvvetlerin oluşumunda rol oynayan en önemli iki etken farklı hızdaki moleküller arasında oluşan momentum transferi ile iç çekim kuvvetleridir. Akışkanların şekil değiştirmeye karşı gösterdikleri direncin varlığı ve bunun nasıl değiştiği ilk kez Newton tarafından bulunmuştur. Akışkanlar viskozitelerine göre ideal ve gerçekte akışkanlar olarak ikiye ayrılır (23).

### 3.4.1. İdeal akışkanlar

Şekil değiştirmeye karşı direnci ve dolayısıyla viskozite katsayısı sıfır olan akışkanlara ideal akışkanlar denir. Doğada viskozitesiz yani ideal bir akışkan olmadığı halde, ideal kavramlar bilimde kolaylıklar ve matematiksel çözümler sağladığından daima kullanılmaktadır (23).

### 3.4.2 Gerçek akışkanlar

Gerçek akışkanlar Newton tipi ve Newton tipi olmayan akışkanlar olmak üzere ikiye ayrılır (Şekil3.2).  $\tau$  kayma gerilmesi ile  $du/dy$  deformasyon hızı arasındaki bağıntı lineer olan ve viskozitesi ( $\mu$ ) sabit olan akışkanlara Newton tipi akışkanlar denir. Su, hava, benzin, alkol, gliserin gibi birçok akışkan Newton tipi akışkan kapsamına girer. Kayma gerilmesi ile hız gradyanı lineer olarak değişmiyorsa bu tip akışkanlıklara da Newton tipi olmayan akışkanlar denir. Newton tipi olmayan akışkanlara örnek olarak uzun zincirli hidrokarbonlar, çeşitli boyalar ve kan gösterilebilir (23).



Şekil 3.2. Çeşitli akışkanların kayma gerilimi ( $\tau$ ) – hız gradyanı ( $du/dy$ ) değişimi

Şekil 3.2’de A eğrisi Newton tipi akışkanlarının karakteristiğini B, C ve D ise Newton tipi olmayan akışkanların karakteristiğini gösterir. Burada x eksenini hız

gradyanını (deformasyon hızını), ordinat ise kayma gerilmesini göstermektedir. Buradaki A eğrisi Newton'un deneysel yöntemle elde ettiği bir eğri olup, matematiksel yapısı:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad [3.1]$$

şeklinde ifade edilmiştir. Burada  $\tau$  kayma gerilmesi,  $\mu$  mutlak viskozite,  $du/dy$  ise deformasyon hızını ifade etmektedir. Burada  $\mu$  katsayısı sabit olup, A eğrisinin eğimini verir. Newton tipi akışkanlarda  $\mu$  sabit olduğundan  $\tau$  kayma gerilmesi ile  $du/dy$  deformasyon hızı arasındaki bağıntı lineerdir (23).

Akışkanlar her zaman küçük moleküllerden oluşmayabilir. Örneğin, polimer çözeltileri, polimer eriyikleri çok büyük moleküllerden oluşan akışkanlardır. Büyük moleküller yapıya sahip çözeltiler ve eriyiklerle, katı veya sıvı olarak birden fazla fazdan oluşan çok fazlı akışkanların bu davranışı reoloji bilimi kapsamına girer ve en fazla araştırılan alanlardan biridir. Reoloji, Newton kuralına uymayan akışkanların kayma gerilimine karşı davranışının incelenmesini, ölçülmesini ve modellemesini kapsar (23).

Bazı sıvılar belli bir  $\tau_0$  kayma gerilimine erişmeden akmazlar.  $\tau_0$ ' a eriştikten sonra ise lineer olarak akarlar. C eğrisini veren bu akışkanlara Bingham Plastiği denir.

Akışkan içinde durgun halde varolan üst yapı, bir eşik kayma gerilimi uygulanınca çok çabuk dağılıyor ve yeniden yapılanma ölçüm süresine göre çok uzun zaman alıyorsa, akışkan, belirli bir eşik kayma gerilimine sahip Newton tipi akışkan gibi davranır:

$$\tau = \tau_0 + \mu\dot{\gamma} \quad [3.2]$$

Bu durumda viskoziteyi tanımlayan denklem:

$$\mu = (\tau - \tau_0) / \gamma \quad [3.3]$$

haline dönüşür. Denklem [3.3]'den, kayma gerilimi  $\tau_0$  değerinin altında ise, akışkanın akmayacağını anlayabiliriz. Bu değer üzerindeki akışkanda deformasyon sağlayan, kayma gerilimi  $\tau$ 'un kendisi değil, eşik kayma gerilimiyle arasındaki fark  $(\tau - \tau_0)$ 'dır. [3.3] denkleminin sağ tarafı, Bingham akışkanının görünür viskozitesini deformasyon hızıyla verir. Düşük deformasyon hızlarında, akışkanın viskozitesi, deformasyon hızındaki artışla ters orantılı olarak azalır. Yüksek deformasyon hızlarında, [3.3] denkleminin sağ tarafındaki parantez içindeki  $\tau_0$  terimi,  $\tau$  terimin yanında ihmal edilebilecek kadar küçülür ve akışkan Newton akışkanı gibi davranır (23).

B eğrisi Pseudoplastik denilen akışkanlara örnektir. Eğri orijinden geçer. Aşağı doğru konkav olmakla beraber, yüksek kayma derecelerinde lineer artışlar göstermektedir. Kauçuk lastiği, kağıt hamuru ve mayonez bu tipin örnekleridir. Bunlar Newton tipi olmayan akışkanların en kalabalık sınıfını oluştururlar (23).

D eğrisini veren akışkanlara Dilatant akışkanlar denir. Düşük kayma derecelerinde, eğri yukarı doğru konkavdır ve yüksek kayma derecelerinde lineer duruma gelebilmektedir. Kumlu emisyonlar bu davranışı göstermektedir (23).

Pseudoplastiklere kayma hızlandıkça incelen, Dilatant akışkanlara kayma hızlandıkça koyulaşan plastikler denilmektedir (23).

Akışkanı oluşturan moleküller veya damla, tane gibi birimler arasındaki etkileşim kuvvetleri büyükse, akımın sağlanabilmesi için akışkanın önemli oranda deformasyona uğrayıp bu birimlerin arasındaki ikincil bağların koparılması ve birimlerin serbest hale getirilmesi gerekir. Bu deformasyonu yaratan akımı sağlayan gerilime eşik kayma gerilimi denir. Eşik değerinin üzerinde bir kayma gerilimi uygulandığında akışkan plastik davranış gösterir. Akışkana bu değer altında bir gerilim uygulanırsa, akışkan elastik davranış gösterir. Kuvvet uygulanan süre içinde

akışkan deforme olur; kuvvetin etki yönüne göre basınç veya kayma gerilimi altında yönelimi değişen kimyasal bağlardaki gerilme bağ enerjisi olarak depolanır. Kuvvet ortadan kalktığı anda, kimyasal bağlar tekrar minimum enerji konumuna döner ve akışkan eski şeklini alır. Eğer bağların bir kısmı kopuyor ve bir kısmı tekrar oluşuyorsa akışkan viskoelastik özellik gösterir. Kuvvet şeklinde uygulanan mekanik enerjinin ancak bir kısmı akıma (kinetik enerjiye) dönüşür, diğer bölümü önce bağ enerjisi (potansiyel enerji) şeklinde depolanır; kuvvet ortadan kalkıp bağlar minimum enerji konumuna dönünce, depolanan enerji ısıya dönüşür. Akım başladıktan sonra koparılan bağların eski (minimum enerji) konumlarına dönmesi zaman alıyorsa, akışkanın direnci uygulanan deformasyonla azalır (tikotropik akışkanlar). Akışkanın üzerine uygulanan kuvvet akışkanın yapısını değiştirerek daha fazla sayıda moleküler grup veya yapı birimlerinin ortaya çıkmasına neden oluyorsa, akışkanın direnci uygulanan deformasyonla artar (reopetik akışkanlar) (24).

Polimer moleküllerinin bel kemiğini oluşturan hidrokarbon zincirlerinin uzunluğu çok fazla, moleküler ağırlıkları merteye olarak  $10^4$ - $10^6$  (kg/mol) aralığındadır. Polimer, bağ enerjilerini minimum düzeyde tutabilecek şekilde rastgele bükümler veya granüller halinde bulunur. Polimer zincirinin kendi parçaları içinde veya diğer moleküllerle arasında oluşan van der Waals kuvvetleri bu rastgele konumun bozulmasına karşı direnç gösterir. Çözelti içinde polimer konsantrasyonu arttıkça, polimer zinciri bir ağ yapısı oluşturur. Uygulanan kayma gerilimi fazla değilse, ağ yapısı akıma karşı direnç gösterir ve akmaz. Moleküller arasında kalan boşluk kayma gerilimi veya basınç altında molekülün esnemesine müsait olduğundan, ağ yapısı elastik özellik gösterir. Uygulanan kuvvet ortadan kalktığında polimerler yeniden eski şekillerine dönerler. Akım ancak, polimerler arasındaki karşı bağları koparmaya yetecek düzeyde bir  $\tau_0$  eşik kayma gerilimi değeri başlar.  $\tau_0$  değerinin üzerinde bir kayma gerilimi uygulanırsa, yumak şeklinde duran polimer zincirleri açılır ve kayma yönüne paralel hale gelir. Moleküllerin paralel olarak yönelimi akıma karşı direnci önemli ölçüde azaltır. Çözeltinin viskozitesi kayma gerilimine veya eşdeğer olarak deformasyon hızına bağımlı hale gelir (24).

### 3.4.3. Mutlak viskozite

Mutlak viskozitenin cgs sistemindeki birimi g/cm.s olup poise olarak isimlendirilir ve p şeklinde kısaltılır. Bunun yüzde biri ise centi-poise olup, cp şeklinde kısaltılır. Mutlak viskozite  $\mu$ 'ye dinamik viskozite de denir (23).

### 3.4.4. Kinematik viskozite

Kinematik viskozite, akışkanın viskozitesinin yoğunluğa oranıdır:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad [3.4]$$

MKS birim sistemine göre, cgs sistemi daha yaygın olarak kullanılır: Nasıl Poise g/cms birimine verilen isimse; Stoke da, St = cm/s birimine verilen bir addır. Aynı şekilde, normal gaz ve sıvılar için St çok büyük bir birim olduğundan, birimin yüzde biri centistoke (cSt) yaygın olarak kullanılır (23).

### 3.4.5. Özgül Viskozite

Bir akışkanın özgül viskozitesi, o akışkanın dinamik viskozitesinin 20 °C'deki suyun dinamik viskozitesine oranıdır (23).

$$\text{Özg. vis} = \frac{\mu_{(akışık)}}{\mu_{su(293K)}} \quad [3.5]$$

Molekülleri arasındaki etkileşim kuvvetlerinin önemli olmadığı Newton tipi akışkanlar için viskozite aynı zamanda fiziksel bir özelliktir. Viskozitenin birimi MKS sisteminde Pa.s=kg/ms'dir. Fakat akışkanların viskozitesi genellikle çok az olduğundan, bu birim çok küçük kesirlerin kullanılmasını gerektirir. Bu nedenle daha elverişli bir birim çok küçük kesirlerin kullanılmasını gerektirir. Bu nedenle daha

elverişli bir birim sistemi olan cgs sisteminde, poise ( $P=g/cms$ ) veya bunun yüzde biri olan centipoise (cP) birimleri kullanılır. 1 cP, 0.001 Pa.s'ye eşdeğerdir (23).

### 3.5. Viskozite Üzerine Sıcaklık ve Basıncın etkisi

#### 3.5.1. Sıcaklığın etkisi

Viskoziteyi etkileyen en önemli etken sıcaklıktır. Akışkanların viskoziteleri sıcaklıkla önemli ölçüde değişmektedir. Sıvıların viskozitesi, artan sıcaklıkla azalır. Boşluk teorisine göre, bir sıvı içerisinde boşluklar bulunmaktadır ve moleküller sürekli boşluklara doğru hareket ederler. Bu olay akışa izin verir, fakat bir molekülün bir boşluğa taşınması bir aktivasyon enerjisine ihtiyaç duyduğundan, enerji gerektirir. Yüksek sıcaklıklarda, aktivasyon enerjisi daha kolay temin edilebildiğinden, sıcaklık yükseldikçe sıvı daha kolay akar. Viskozitenin sıcaklıkla değişimi Arrhenius denklemiyle verilebilir (23):

$$\mu = A \exp (E_a / RT) \quad [3.6]$$

bu denklemde A ön katsayı,  $E_a$  viskoz akışa ait aktivasyon enerjisi, R gaz sabiti 8.314 J/K mol, T(K) ise sıcaklıktır (23).

Sıcaklık arttıkça gaz moleküllerinin hareketi artacağından moleküller arasındaki momentum transferi de artacaktır. Gazlarda viskozite daha ziyade momentum transferine bağlı olduğundan viskozite de artar. Gazların viskozitesi;

$$\mu = \frac{1}{\pi D^2} \left( \frac{8kTm}{9\pi} \right)^{1/2} \quad [3.7]$$

denkleminde tanımlanır. Burada m atomların kütlesi, D atom çapı, k sabittir. Denklem T ve  $T_0$  referans sıcaklıklarında yazılıp oranlanırsa, viskozitenin sıcaklıkla değişimini veren;

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^{1/2} \quad [3.8]$$

denklemleri elde edilir. Teorik olarak viskozitenin sıcaklığın  $1/2$ ' inci kuvvetiyle orantılı olarak artması beklenir. Ancak, deneysel olarak viskozitenin sıcaklıkla daha farklı bir katsayı ile değiştiği bulunmuştur. Genel olarak viskozite sıcaklık ilişkisi;

$$\mu = \mu_0 \left( \frac{T}{T_0} \right)^a \quad [3.9]$$

denklemleriyle tanımlanır (24).

### 3.5.2. Basıncın etkisi

Normal şartlar altında basıncın viskoziteye etkisi ihmal edilecek kadar azdır. Artan basınçla bir sıvının viskozitesi artar, çünkü basıncın artırılması sıvı içerisindeki boşluk sayısını azaltır ve bunun sonucu moleküllerin hareketi zorlaşır (23).

Basınç arttıkça, gaz molekülleri arasındaki çarpışmalar sıklaşacağı ve çarpışmalardan sonra yön değişimleri de artacağı için, gaz molekülleri belirli bir mesafeye daha uzun bir sürede ulaşabilirler. Bu görünür viskozite artışının bir temeli olmadığı için, viskozitenin basınçla değişimini doğrudan veren bir denklem de bulunmamaktadır. Viskozite artışı dolaylı olarak, indirgenmiş viskozite  $\mu_r$  ile ( $\mu_c$  = kritik viskozite,  $\mu_r = \mu/\mu_c$ ) indirgenmiş basınç  $P_r$  'nin ( $P_c$ =kritik basınç,  $P_r = P/P_c$ ) değişimini veren grafikten bulunabilir (24).

### 3.6. Çözeltilerin Viskozitesi

Temel prensiplere dayalı olarak çözeltilerin viskozitelerinin iyi bir şekilde irdelenmesi zor bir iştir. Bundan dolayı çözeltilerin viskoziteleri daha ziyade deneysel olarak incelenmektedir. Özellikle, polimer çözeltilerinin viskoziteleri

incelenerek polimer moleküllerinin büyüklüğü ve şekli hakkında bilgiler elde edilir. Su gibi bir sıvıya bir çözünen eklendiği zaman, genellikle viskozite artar (22). Literatürde kullanılan farklı denklemleri aşağıda yedi grupta toplamak mümkündür:

1. *Eklenen denklemler:*

$$f(\eta) = x_1 \cdot f(\eta_1) + x_2 \cdot f(\eta_2) \quad [3.10]$$

Burada birinci bileşen  $x_1$  ve ikinci bileşen  $x_2$  'nin değerleri ağırlık, mol veya hacim cinsinden olabilir. Viskozite fonksiyonu  $f(\eta)$ ;  $\eta$ ,  $\log \eta$  olabilir. Bu denklem  $x_2$  'nin oluşumu olarak  $f(\eta)$  ile bulunur (25).

2. *Parabolik denklemler:*

$$f(\eta) = x_1 \cdot f(\eta_1) + x_2 \cdot f(\eta_2) + 2x_1x_2C \quad [3.11]$$

Parabolik denklemlerde etkileşim parametreleri olarak ele alınan C sabiti genellikle konsantrasyon oranı üzerinden optimizasyon ile bulunur. Parabolik denklemlere örnek Grunberg denklemidir. Grunberg denkleminde  $f(\eta)$ ,  $\ln \eta$  'dir ve konsantrasyon mol oluşumu birimidir. Grunberg denklemi aşağıda verilmiştir (25):

$$\ln \eta = m_1 \ln \eta_1 + m_2 \ln \eta_2 + 2m_1m_2C \quad [3.12]$$

3. *Karışım yoğunluk denklemi:* Bu denklemler karışımın yoğunluğunu gerektirir. Bağımsız hacim denklemleride yoğunluk gerektirir, fakat sınıflandırma için aşağıda ayrı olarak listelenmiştir (25).

4. *Bağımsız hacim denklemleri:*

$$f(\eta) = Ax^2 + Bx + C \quad [3.13]$$

tipi denklemlerdir. Yoğunluk gerektiren denklemlerdir. C sabiti değerleri farklı sıcaklıklarda viskozite ve yoğunluktan bulunabilir (25).

5. *Kinematik viskozite denklemleri:* Viskoziteler kinematik viskoziteden çok dinamik viskozite olarak rapor edilir. Kinematik viskozite denklemleri dinamik viskozitenin kinematik viskoziteye dönüştürülmesiyle elde edilebilir.

6. *Diğer parametrelili denklemler:* Bu denklemler genelde geniş çapta kullanılmazlar. Çünkü istenen sabitler kolay ve hızlı elde edilemezler (25).

7. *Sınıflandırılmamış denklemler:* Biraz önce anlatılan gruplar arasında rastlanmayan ondört denklem vardır. Her bir denklem ya ağırlık ya mol ya da hacim fonksiyonu cinsinden verilir. Seçilecek denklem test edilerek karar verilir (25).

### 3.6.1. Polimer çözeltilerinin viskozitesi

Boya, yüzey kaplama, gıda, tekstil, kozmetik, deterjan sanayilerindeki önemi nedeniyle polimer çözeltilerinin viskoziteleri ilgi görmüş, çok yönlü olarak incelenmiş ve özel birimlerle tanımlanmıştır (22).

Çözelti içinde polimer konsantrasyonu artarsa, uzun polimer zincirleri akıma karşı direnç göstererek viskoziteyi artırır. Viskozitedeki artış oranı, polimerin konsantrasyonuna olduğu kadar molekül ağırlığına da bağlıdır. Bu nedenle çözeltinin viskozitesinin çözgenin viskozitesine oranı  $\eta_r$  ile ifade edilir (24):

$$\eta_r = \frac{\mu_{\text{çözelti}}}{\mu_{\text{çözgen}}} \quad [3.14]$$

Polimer çözeltilerinin viskozitesi kuşkusuz saf çözücünün viskozitesinden büyük olup,

1. Çözücünün cinsine
2. Polimerin cinsine
3. Polimerin molekül ağırlığına
4. Çözeltinin derişimine
5. Sıcaklığa

bağlıdır (26). Diğer viskozite tanımları viskozite oranı ve bağıl viskozitenin birer fonksiyonudur. Bu tanımlar Çizelge 3.1’de özetlenmiştir. Bu çizelgede C (g/L), polimer konsantrasyonunu simgelemektedir (24).

Çizelge 3.1. Polimer Çözeltileri İçin Kullanılan Viskozite Tanımları

Viskozite Tanımı	Denklem
Viskozite oranı veya bağıl viskozite	$\eta_r$
Özgül viskozite	$\eta_{sp} = (\eta_r - 1)$
Viskozite sayısı veya indirgenmiş özgül viskozite	$\eta_{sp} / C$
Logaritmik viskozite sayısı (inherent viskozite)	$\ln (\eta_r / C)$
Limit viskozite sayısı (intrinsik viskozite)	$[\eta] = (\eta_{sp}/c)_{c \rightarrow 0}$
Limit logaritmik viskozite sayısı (intrinsik viskozite)	$\ln [\eta] = \ln (\eta_r/c)_{c \rightarrow 0}$

### 3.6.2. Sıvıların viskozitesi

Genellikle bir sıvının viskozitesi kılcal (kapiler) bir tüpten akış hızını ölçerek tayin edilebilmektedir. Bu hız verisi elde edildikten sonra, tüpün boyutlarına etkiyen basınçtan, Poiseuille tarafından geliştirilen teoriye dayanarak viskozite hesaplanır. Sıkıştırılmayan bir akışkanın; uçlarındaki basınçları  $P_1$  ve  $P_2$ , yarıçapı  $r$  ve uzunluğu  $l$  olan bir kapiler tüpten aktığını varsayalım. Borunun duvarındaki sıvı durgun haldedir, akış hızı borunun merkezinde maksimuma erişir. Yarıçapı  $r$ , uzunluğu  $l$ , olan bir tüpten akmakta olan bir sıvının viskozitesi, Poiseuille tarafından geliştirilen teoriye dayanarak viskozite hesaplanır. Sıvı  $2\pi r l$  alanına sahipse, sürtünme kuvveti;

$$F = \eta \frac{dv}{dr} . 2\pi r l \quad [3.15]$$

denklemiyle verilir. Burada hız gradyanı ( $dv/dr$ ) negatif değerlidir. Sıvının borudan akabilmesi için, basınç farkından oluşan yürütücü kuvvetin, akmayı engelleyen sürtünme kuvvetine eşit veya daha büyük olması gerekir (24).

F (basınç kuvveti) = F (sürtünme kuvveti)

$$(P_1 - P_2)\pi r^2 = -\eta \frac{dv}{dr} . 2\pi r l \quad [3.16]$$

[3.15] bağıntısının düzenlenmesi ile elde edilen [3.16] bağıntısının integrali alındığında [3.18] bağıntısı bulunur (27).

$$dv = \frac{-(P_1 - P_2)}{2.l.\eta} . r dr \quad [3.17]$$

$$v = -\frac{P_1 - P_2}{4.l.\eta} r^2 + \text{sabit} \quad [3.18]$$

$r = R$  olduğunda hız sıfıra eşit olur ve sabit;

$$\text{sabit} = \frac{P_1 - P_2}{4.l.\eta} R^2 \quad [3.19]$$

$$v = \frac{P_1 - P_2}{4.l.\eta} (R^2 - r^2) \quad [3.20]$$

ifadesinde hız profili bağıntısı elde edilir. Birim zamanda akan sıvının toplam hacmi ( $dV/dt$ ), her bir kesit alanı için integral alınarak bulunur. Kesit alanı  $2\pi r dr$  olduğundan,

$$\frac{dv}{dr} = \int_0^R 2\pi r v dr \quad [3.21]$$

$$\frac{V}{t} = \frac{P_1 - P_2}{4.l.\eta} \left( R^2 \int_0^R r dr - \int_0^R r^3 dr \right) \quad [3.22]$$

$$\frac{V}{t} = \frac{(P_1 - P_2)\pi R^4}{8.l.\eta} \quad [3.23]$$

Bu bağıntı Poiseuille eşitliği olarak bilinir ve  $\eta$ ' nın hesaplanmasında kullanılır. [3.23] bağıntısında  $(P_1 - P_2)$  yerine;

$$\Delta P = l.d.g \quad [3.24]$$

yazılır. Burada  $l$  uzunluk,  $d$  sıvının yoğunluğu,  $g$  ise yer çekim ivmesidir. Bağıntı düzenlenirse;

$$\eta = \frac{\pi^4 R^4 d g t}{8V} \quad [3.25]$$

bağıntısı elde edilir. Burada  $g$ ; yerçekim ivmesi,  $d$ ; sıvının yoğunluğu,  $t$  ise akış süresidir. Bir sıvının viskozitesi [3.25] bağıntısı ile belirlenmesi oldukça güçtür. Bu nedenle  $V$ ,  $R$  değerlerinin aynı olması koşulu ile [3.25] bağıntısı iki ayrı sıvı için yazılarak taraf tarafa oranlanırsa;

$$\frac{\eta_1}{\eta_2} = \frac{d_1 t_1}{d_2 t_2} \quad [3.21]$$

bağıntısı elde edilir. Bu bağıntının kullanılabilmesi için, aynı hacimli iki sıvının akış süresinin ölçülmesi gereklidir (27).

### 3.6.3. Karışımların viskozitesi

Akışkanlar tek bir bileşen veya tek bir fazdan oluşmayıp, birbiri içinde çözünen gaz-gaz, gaz-sıvı, sıvı-sıvı karışımlarından da oluşabilir. Karışımın viskozitesi bileşenlerin fiziksel özellikleriyle karışım oranlarının bir fonksiyonudur. Sıvı karışımlarda bir parametrelili değişkenler için Grunberg-Nissan [3.26], iki parametrelilerde McAllister [3.27] ve üç parametrelili değişkenler için Auslander [3.28] denklemleri kullanılabilir (13,16).

$$\ln \eta_{12} = x_1 \ln \eta_1 + x_2 \ln \eta_2 + x_1 x_2 G_{12} \quad [3.26]$$

$$\ln \nu_{12} = x_1 \ln \nu_1 + 3x_1 x_2 \ln Mc_{12} + 3x_1 x_2 \ln Mc_{21} + x_2 \ln \nu - \ln \left( x_1 + \frac{x_2 M_2}{M_1} \right) + 3x_1 x_2 \ln \left( \frac{2}{3} + \frac{M_2}{3M_1} \right) + 3x_1 x_2 \ln \left( \frac{1}{3} + \frac{2M_2}{3M_1} \right) + x_2 \ln \left( \frac{M_2}{M_1} \right) \quad [3.27]$$

$$x_1(x_1 + B_{12}x_2)(\eta_{12} - \eta_1) + A_{21}x_2(B_{21}x_1 + x_2)(\eta_{12} - \eta_2) = 0 \quad [3.28]$$

$\eta$  dinamik viskozite,  $\nu$  kinematik viskozite,  $x$  mol kesri,  $G$  Grunber-Nissan sabiti,  $Mc$  ve  $M$  ise sabitlerdir (13).

### 3.7. Viskometreler

Viskozite ölçümü için birbirinden farklı birkaç yöntem vardır. Viskozite esas olarak moleküler mekanizmayla momentum aktarımını simgelediğinden, ölçüm yönteminde de rejimin laminer olması, akıma karşı direncin sadece viskoziteden kaynaklanması çok önemlidir. Viskozite ölçümde kullanılacak üç akım türü bulunur (24):

1. Küresel cisimlerin Stokes rejiminde hareket etmesi: Düşen küreli viskometreler
2. Couette akımı: Rotaviskometreler
3. Laminer rejimle borulardan akım (poiseuille akımı): Kapiler viskometreler

### 3.7.1. Düşen küreli viskometreler

Viskozite akıma karşı direncin bir ölçüsü olduğu için, akımda etkili olan mekanik enerji ve momentumla ilgili ilkeler viskozite ölçüm yöntemlerinde de geçerlidir (24).

ASTM D1343-56 standartına göre, viskozite ölçümünde kullanılacak düşen küreli viskometrenin boyutları aşağıdaki şekilde standartlaştırılmıştır: Kullanılacak cam şişenin çapı 6.4 cm, yüksekliği 6.70 cm olmalı, kapağın üzerinde bilyenin düşebileceği rulmanlı bir delik bulunmalıdır. Test yöntemine göre rulman bilyelerinin arasından şişe içindeki sıvıya inen kürenin serbestçe düşebilmesi gerekir. Şişe içinde 2.0 inç (5.08 cm)'lik bir mesafe işaretlenir. Reynolds sayısının 2'nin altında tutulması kaydıyla düşme zamanından terminal hızı hesaplanır. Şişe duvarı serbest düşmeyi engelleyeceğinden (duvar kenarında duvarın kapladığı hacim kadar bir sıvı yukarıya doğru karşı akım yaratacağından) düşme hızı bir düzeltme faktörü  $f'$ 'e bölünür:

$$f = 1 - 2.104 r/R + 2.09 (r/R) - 0.95 (r/R) \quad [3.29]$$

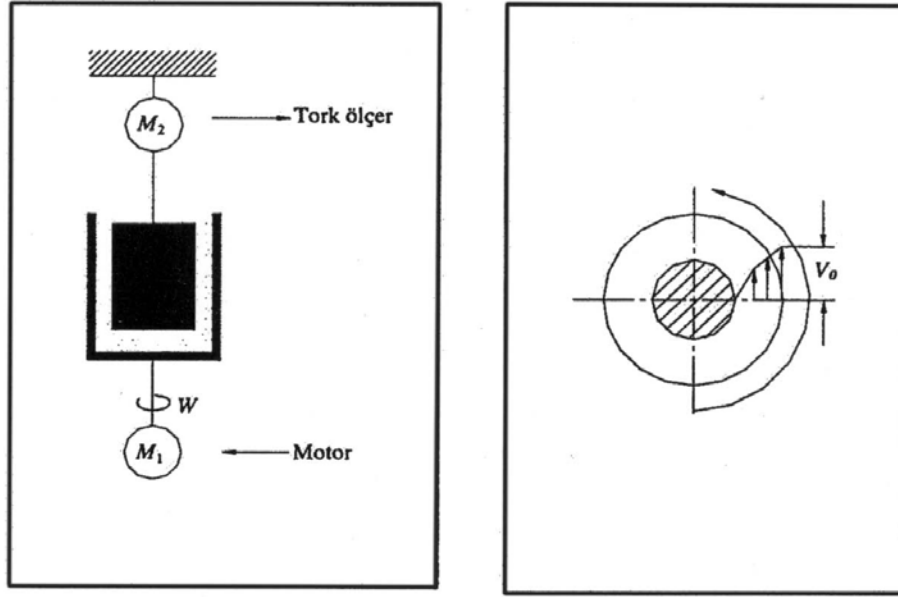
Burada  $r$  düşen kürenin yarıçapı (cm),  $R$  cam şişenin yarıçapıdır (cm). Laboratuarlarda kullanılan düşen küreli viskometreler de genellikle sıvının bulunduğu cam silindirin çapı bilyenin çapına yakındır. Ölçümde kullanılacak paslanmaz çelik bilyelerin boyutları 0.0794, 0.1190, 0.1585, 0.2775 cm olarak standartlaştırılmış. Ayrıca, düşme hızını azaltmak için viskometre dik değil eğimli durur. Bu durumda viskozite, ampirik bir denklemle verilir:

$$\mu = fg \cos\theta d(\rho - \rho_0)t/18L = K(\rho - \rho_0)t \quad [3.30]$$

Burada  $f$ , duvar etkisi düzeltme faktörü,  $\theta$  viskometrenin dikeyle yaptığı açı,  $t$  bilyenin viskometre üzerinde bulunan iki çizgi arasındaki  $L$  mesafesini düşme zamanı,  $K$  denklemdeki sabitleri içeren viskometre kalibrasyon sabitidir (24).

### 3.7.2. Rotaviskometreler

Akışkanın reolojik davranışı rotaviskometre ölçümleriyle tayin edilir. Şekil 3.3'de görülen rotaviskometre, eşmerkezli içiçe iki silindirden oluşur. Viskozitesi ölçülecek sıvı bu iki silindirin arasında bulunur. Couette türü viskometrelerde dış silindir kontrol edilebilen sabit hızla döner; tork iç silindire bağlı olarak ölçülür (24).



Şekil 3.3. Rotaviskometre.

Genellikle kullanılan searle tipi viskometrelerde iç silindir ayarlanabilen bir açısal hızla (CR) veya ayarlanabilen kayma gerilimi (CS) ile döner; dış silindir sabittir. İç silindirin dönmesiyle yaratılan burkulma (tork)  $T$ , iç silindirin bağlı olduğu dinamometre ile ölçülür (24).

$$T = FR = \tau AR \quad [3.31]$$

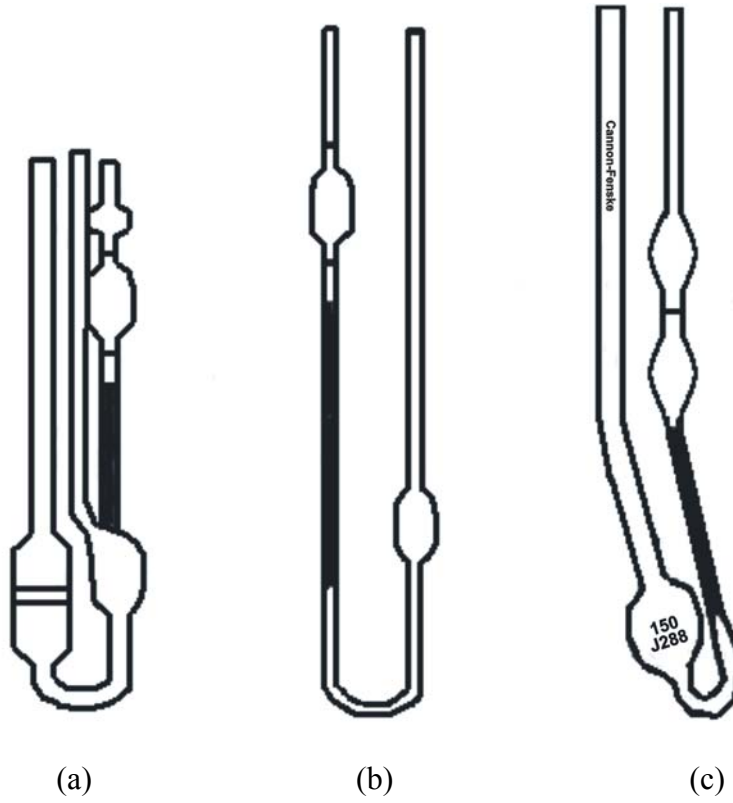
Burada  $F$  kuvvettir. Ölçülen tork değeri  $T$ , iç silindirin yarıçapı  $R$  ve yanal alanı  $A$ 'dan kayma gerilimi  $\tau$  hesaplanabilir. Hız gradyanı (deformasyon hızı)  $\dot{\gamma}$ , iç silindirin dönme hızı  $\omega$ 'dan,

$$\dot{\gamma} = 2\pi\omega \quad [3.32]$$

formülüyle hesaplanır. Genellikle rotaviskometreler, iç veya dış silindirin dönme hızına bağlı olarak kayma gerilimini, deformasyon hızını, burkulma ve bu değerlerden hesaplanan viskoziteyi, içlerine yerleştirilmiş bir mikroişlemciye hesaplatılarak bulunur (24).

### **3.7.3. Kapiler viskometreler**

Burada önemli nokta, Poiseuille denkleminin borulardan sürekli akım için geçerli olmasıdır. Oysa laboratuvarlarda viskozite 1-50 mL gibi az miktarlarda tayin edilir. Bu durumda viskometrenin kapiler tüpünden akımın sabit kaldığı kabul edilerek debi, örnek hacminin akış süresine bölümü şeklinde tanımlanır. Bu amaçla Şekil 3.4'de gösterilen Ostwald, Ubbelohde veya Cannon-Fenske tipi viskometreler kullanılır. Ubbelohde viskometresinin diğer kapiler viskometrelerden üstünlüğü, kapiler tüpün sonunda atmosfere açılan üçüncü bir tüpünün bulunması ve böylelikle kapilerdeki akımın karşı basınç etkisinden kurtarılarak sabit basınç farkı altında akıma daha yakın şartlarda çalışabilmesidir. Her üç viskometrenin de çalışma prensibi aynıdır. Sıvı kapiler tüpün üzerindeki hazneye çekilir. Sıvı seviyesinin haznenin üstündeki çizgiden altındaki çizgiye düşebilmesi için gerekli zaman kaydedilir (24).



Şekil 3.4. Kapiler viskometreler, (a) Oswald, (b) Ubbelohde, (c) Cannon-Fenske viskometreleri

Hagen-Poiseuille denklemi hacimsel debi cinsinden,

$$\theta = \frac{v}{t} = \left( \frac{\Delta P + \rho g l}{128\mu} \right) \pi d^4 \quad [3.33]$$

şeklinde yazılabilir. Bu denklemde,  $d$  kapiler tüpün çapı,  $l$  uzunluğunu,  $\rho$  ve  $\mu$  sıvının yoğunluk ve dinamik viskozitesini,  $v$  hazne hacmini,  $t$  ölçüm zamanını göstermektedir. Boru veya kapiler tüp yatay konumda duruyorsa akım, borunun iki ucu arasındaki basınç farkı  $\Delta P$  nedeniyle, dikey konumda duruyorsa yerçekimi kuvvetinin veya hidrostatik basınç  $\rho g l$ ' nin etkisiyle meydana gelir (24).

Kapiler viskometrelerde akım hidrostatik basınç  $\rho g l$ ' nin etkisiyle meydana gelir. Örnek hacmi fazla olmadığı için bu viskometrelerde hacimsel debi sabit değildir. Hazne içindeki sıvı seviyesi azaldıkça, hidrostatik basınç da azalacağından denklemin integralinin alınması gerekir:

$$\int_0^v dv = \int_0^t \frac{\rho g \pi d^4}{128 \mu} dt \quad [3.34]$$

Ancak, kapiler viskometrenin şekli basit olmadığı için integralin alınması güçtür. Bunun yerine, ASTM (American Society for Testing Materials)' in kabul ettiği 20 °C sıcaklıkta suyun kinematik viskozite değeri 1.0038 cSt, standart olarak kabul edilir ve yukarıdaki denklemde sabitleri içeren bir kalibrasyon katsayısı  $K_v$  bulunur. Ölçülen akma zamanıyla bu katsayı çarpılarak kinematik viskozite elde edilir (24).

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

### 4.1. Kullanılan Malzemeler

Deneysel çalışmada PEG-3350 (Sigma, lot# 44H0122), potasyum monohidrojen fosfat ( $K_2HPO_4$ , Merck lot# A944701), potasyum dihidrojen fosfat ( $KH_2PO_4$ , Merck lot# K23823671), amonyum sülfat ( $(NH)_2SO_4$ , Sigma lot# 68H0001) kullanılmıştır.

*PEG (Polietilen glikol):* Polietilen glikol molekül ağırlığı 200-40.000 arasında, doğrusal ve yapay bir polimerdir. Genel formülü ;  $HO-CH_2-CH_2(-O-CH_2-CH_2)-O-CH_2-CH_2-OH$  şeklinde olup dekstran' dan daha hidrofobiktir. Polimerin düşük molekül ağırlıkta olanları sıvı veya hamur kıvamındadır. Oda ısısında saklanması uygundur. +4 °C'de saklama ve antioksidan ilavesi oksitlenmeyi yavaşlatır. Oksitlenme durumunda PEG rengini değiştirmektedir.

*Amonyum sülfat:* Amonyum sülfat beyaz renkte kristal yapıdadır. Kimyasal bileşimi  $(NH)_2SO_4$  'dır. Molekül ağırlığı 132,1 ve pH'sı 5,1'dir. Ağırlıkça % 0,5 nem, % 0,06 serbest asit, % 20,9 azot içerir.

*Potasyum dihidrojen fosfat:* Potasyum dihidrojen fosfat beyaz kristal renktedir. Kimyasal bileşimi  $KH_2PO_4$ 'dır. Molekül ağırlığı 136,0'dır. pH'sı 4,2-4,5 arasındadır. Ağırlıkça % 0,05 nem içerir. Suda tamamen çözünür.

*Dipotasyum hidrojen fosfat:* Potasyum dihidrojen fosfat beyaz kristal renktedir. Kimyasal bileşimi  $K_2HPO_4$ 'dır. Molekül ağırlığı 174,18'dir. pH'sı 8,7-9,4 arasındadır. Ağırlıkça % 0,02 nem içerir. Suda tamamen çözünür.

## 4.2. Kullanılan cihazlar

- ◆ Scientech SA 80 Terazı
- ◆ AT 110 Isıtıcı
- ◆ Termometre
- ◆ Kronometre
- ◆ Puar
- ◆ Pipet
- ◆ Su banyosu
- ◆ Cannon-Fenske Viskometresi (Şekil 4.1)



Şekil 4.1. Cannon-Fenske viskometresi

### 4.3. Deney Düzenegi



Şekil 4.2. Deney düzenegi

Cannon-Fenske viskometresi su banyosunun içine yerleştirilmiştir. Isıtıcı yardımıyla istenilen sıcaklıklar ayarlanmıştır.

### 4.4. Kullanılan Yöntem

Çalışmada PEG (%40 a/a), potasyum fosfat ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  karışımları kullanıldı) (%40 a/a), amonyum sülfat (%40 a/a) stok çözeltiler hazırlanmış, çalışılacak konsantrasyonlara seyreltilmiştir. PEG-3350 için ağırlıkça % 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20; potasyum fosfat için ağırlıkça % 5, 5.9, 6.5, 7.5, 8.2, 9.6, 11, 13; amonyum sülfat için ağırlıkça % 7.5, 8.5, 8.75, 10.5, 11.5, 12, 13, 14 çözeltileri kullanılmıştır. Ölçümler Canonn-Fenske (150 J2 88) viskometresiyle yapılmıştır. Su banyosu (AT 110) ısıtıcısı yardımıyla ölçüm yapılacak sıcaklığa getirilip, ölçüm

yapılacak çözeltilerden 7 mL alınıp viskometreye konulmuştur. Puar yardımıyla çözeltilerin istenilen yüksekliğe gelmesi sağlanıp çözeltilerin iki çizgi arasından geçiş süresi kronometre ile ölçülmüştür. Her ölçümden sonra viskometre saf su ile temizlenmiştir. Tüm bu işlemler her konsantrasyon ve 20, 25, 30, 35, 40 °C'de sıcaklıklar için tekrarlanmıştır. Viskometre konduğu su banyosunun sıcaklığı, ısıtıcı yardımıyla ölçümün yapılacağı sıcaklıkta sabit tutulmuş. Sıcaklığın viskozite üzerindeki etkisi nedeniyle su banyosunun sıcaklığı devamlı olarak bir termometre ile ölçülmüş ve ölçümlerin yapıldığı sürece sabit tutulmaya çalışılmıştır. Bütün konsantrasyonlardaki ölçümler üç defa tekrarlanmış, ölçümlerin ortalaması alınmış ve viskozite değerlerinde ölçümden dolayı herhangi bir hatanın oluşmamasına özen gösterilmiştir.

Sıcaklık 20 °C'de sabit tutularak, PEG-3350 için ağırlıkça % 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5, 20; potasyum fosfat için ağırlıkça % 5, 5.9, 6.5, 7.5, 8.2, 9.6, 11, 13; amonyum sülfat için ağırlıkça % 7.5, 8.5, 8.75, 10.5, 11.5, 12, 13, 14 konsantrasyonların viskoziteleri ölçülmüştür. Daha sonra sıcaklığı 25 °C'de sabitleyip tekrar viskozite değerleri ölçülmüştür. Bu ölçümler 20, 25, 30, 35, 40 °C'de sıcaklıklarda tekrarlanarak viskoziteler bulunmuştur.

## 5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Yapılan deneyler sonucu belirli sıcaklık ve konsantrasyonlarda ölçülen akış süreleri Cannon-Fenske viskozimetre sabiti olan  $0,01505 \text{ cSt.s}^{-1}$  ile teker teker çarpıldıktan sonra PEG(3350)-su, potasyum fosfat-su, amonyum sülfat-su içeren ikili sistemler ile PEG-potasyum fosfat-su, PEG-amonyum sülfat-su içeren üçlü sistemlerin viskozite değerleri hesaplanmıştır. Daha sonra bulunan viskozite değerleri grafiğe geçirilmiştir (Ek3). Aynı şekilde potasyum fosfat-su, amonyum sülfat-su, PEG-potasyum fosfat-su ve PEG-amonyum sülfat-su sistemlerin viskoziteleri 20, 25, 30, 35, 40 °C'de sıcaklıklarda bulunarak Ek 3'de grafiğe geçirilmiştir. Viskozitenin sıcaklığa ve konsantrasyona bağlı ilişkisini gözlemlemek için iki model kullanılmıştır. Bu modeller Arrhenius ve Grunberg-Nissan denklemleridir.

### 5.1. Arrhenius Denklemi:

Çalışılan sabit konsantrasyonlardaki her bir sistemin viskozitesinin sıcaklık ile değişimini görmek ve bu sabit konsantrasyondaki aktivasyon enerjisini hesaplamak için Arrhenius denklemi kullanılmıştır. Aktivasyon enerjisini bulmada en çok kullanılan denklemlerden biridir. Literatürde polietilen glikol monoetilen eter çözeltileri, dekstran, sükroz ve polisakkarit çözeltileri, farklı molekül ağırlıklı PEG karışımlarında Arrhenius denklemi [3.6] kullanılmıştır (6, 8).

İkili ve üçlü sistemlerde Arrhenius [3.6] denklemiyle hesaplanan ve deneysel olarak bulunan kinematik viskozite değerleri Çizelge 5.1, Çizelge 5.2, Çizelge 5.3, Çizelge 5.4, Çizelge 5.5' de verilmiştir.

Hesaplanan viskozite değerleriyle deneysel viskozite değerleri karşılaştırılmış ve aralarındaki farklılık relatif hata ( $e_i$ ) ile bulunmuştur;

$$e_i = \frac{v_{\text{deneysel}} - v_{\text{hesaplanan}}}{v_{\text{deneysel}}} \times 100 \quad [5.1]$$

Burada amaç tutarlı ve güvenilir sonuçlar vermek olduğu için  $v_{\text{deneysel}}$  değerleri ile  $V_{\text{hesaplanan}}$  değerleri arasında fark olmaması ya da az fark olması istenir. Hesaplanan relatif hatalar Çizelge 5.1, Çizelge 5.2, Çizelge 5.3, Çizelge 5.4 ve Çizelge 5.5’de verilmiştir.

Çizelge 5.1’de PEG3350-su içeren ikili sistemlerinin çalışılan denklem [3.6] (Arrhenius) ile bulunan viskozite verileri, deneysel viskoziteler ve relatif hata değerleri verilmiştir. Önce sıcaklık sabit tutulmuş, konsantrasyonun viskoziteye etkisi gözlemlenmiştir. Daha sonra sıcaklık değiştirilerek sıcaklığın viskoziteye etkisi incelenmiştir. Bu sistem için relatif hata mutlak değer olarak 1,4 ile 19,9 aralığında değişmiştir. Bu sistem için en düşük ve en yüksek sapma 35 °C’de görülmüştür. Çalışılan sistemler arasında en yüksek relatif hata bu sistemde görülmüştür.

Çizelge 5.1. PEG3350-su çözeltilerin deneysel ve hesaplanan viskoziteleri [3.6]

T(°C)	W PEG (%a/a)	$v_{\text{deneysel}}$ (cSt)	$v_{\text{hesaplanan}}$ (cSt)	$\epsilon$ relatif hata
20	2,5	1,294	1,203	7,0
20	5	1,671	1,795	-7,4
20	7,5	2,138	2,433	-13,8
20	10	3,071	3,291	-7,8
20	12,5	3,356	3,452	-2,9
20	15	4,169	4,032	3,3
20	17,5	5,177	4,613	10,9
20	20	5,283	4,986	5,6
25	2,5	1,121	0,934	16,7
25	5	1,422	1,547	-8,8
25	7,5	1,821	2,067	-13,5
25	10	2,227	2,547	-14,4
25	12,5	2,807	3,021	-7,6
25	15	3,356	3,431	-2,3
25	17,5	4,154	3,862	7,0
25	20	5,237	4,858	7,2
30	2,5	0,993	0,864	13,0
30	5	1,287	1,374	-6,8
30	7,5	1,731	1,817	-5,0
30	10	1,911	2,214	-15,9
30	12,5	2,348	2,578	-9,8
30	15	2,724	2,945	-8,1
30	17,5	3,657	3,234	11,6
30	20	4,304	3,548	17,6

Çizelge 5.1. (Devamı)

T(°C)	W PEG (%a/a)	$v_{\text{deneysel}}$ (cSt)	$v_{\text{hesaplanan}}$ (cSt)	e relatif hata
35	2,5	0,888	0,7684	13,4
35	5	1,129	1,1785	-9,7
35	7,5	1,360	1,4963	-10,0
35	10	1,648	1,8532	-12,5
35	12,5	1,956	2,1317	-9,0
35	15	2,393	2,4687	-3,17
35	17,5	2,709	2,6724	1,4
35	20	3,732	2,9875	19,9
40	2,5	0,807	0,7015	13,0
40	5	1,001	1,0522	-5,1
40	7,5	1,196	1,3339	-11,5
40	10	1,430	1,578	-10,4
40	12,5	1,692	1,7985	-6,3
40	15	1,900	2,0009	-5,7
40	17,5	2,030	2,1897	-7,9
40	20	3,206	2,5473	10,2

PEG-tuz-su sistemlerinde tuz olarak potasyum fosfat ve amonyum sülfat kullanılmıştır. PEG-PF-su ve PEG-amonyum sülfat-su üçlü sistemlerin viskoziteleri belirlenmiştir. Potasyum fosfat-su ve amonyum sülfat-su çözeltilerinin 20 °C’de viskozitelerinin konsantrasyonla değişimleri gözlenmiş daha sonra belirtilen sıcaklıklarda viskoziteleri ölçülmüştür. Denklem [3.6] (Arrhenius) yardımıyla hesaplanan viskozite değerleriyle deneysel viskozite değerleri karşılaştırılmış ve aralarındaki farklılık relatif hata ile bulunmuştur. Relatif hatalar mutlak değer olarak 0,0 ile 17,8 aralığında değişmiştir.

Çizelge 5.2. Potasyum fosfat-su çözeltilerin deneysel ve hesaplanan viskoziteleri

T (°C)	W PF (%a/a)	V <sub>deneysel</sub> (cSt)	V <sub>hesaplanan</sub> (cSt)	e (relatif hata)
20	5	1,061	0,987	6,9
20	5,9	1,084	1,056	2,5
20	6,5	1,110	1,081	2,6
20	7,5	1,120	1,174	-4,9
20	8,2	1,129	1,211	-7,3
20	9,6	1,144	1,283	-12,2
20	11	1,159	1,365	-17,8
20	13	1,195	1,405	-17,6
25	5	0,930	0,922	0,81
25	5,9	0,938	0,941	-0,33
25	6,5	0,948	0,951	-5,5
25	7,5	0,963	0,968	-0,47
25	8,2	0,978	0,978	0,0
25	9,6	0,993	0,996	-0,31
25	11	1,016	1,012	0,33
25	13	1,035	1,033	0,26
30	5	0,873	0,879	-0,74
30	5,9	0,885	0,898	-1,47
30	6,5	0,918	0,909	1,0
30	7,5	0,938	0,928	1,07
30	8,2	0,945	0,939	0,68
30	9,6	0,956	0,957	-0,09
30	11	0,973	0,973	0,0
30	13	0,986	0,993	-0,71

Çizelge 5.2. (Devamı)

T(°C)	W PF ( %a/a)	v <sub>deneysel</sub> (cSt)	v <sub>hesaplanan</sub> (cSt)	e (relatif hata)
35	5	0,802	0,802	0,01
35	5,9	0,810	0,817	-0,85
35	6,5	0,828	0,825	0,31
35	7,5	0,843	0,838	0,58
35	8,2	0,850	0,846	0,48
35	9,6	0,858	0,861	-0,31
35	11	0,873	0,873	0,0
35	13	0,888	0,888	0,0
40	5	0,730	0,617	15,5
40	5,9	0,737	0,747	-1,3
40	6,5	0,758	0,756	0,3
40	7,5	0,777	0,769	1,0
40	8,2	0,780	0,777	0,4
40	9,6	0,796	0,792	0,0
40	11	0,813	0,805	0,93
40	13	0,808	0,822	-1,7

Literatürde PEG 3400-potasyum fosfat-su ve PEG4000-amonyum sülfat-su sistemlerinin faz diyagramları verilmiştir. Çizelge 5.2 ve Çizelge 5.3’de verilen çözeltilerimizin konsantrasyonunu belirlerken bu faz diyagramlarından yararlanılmıştır. Sistemimizde iki faz oluşturmaması için homojen bölge karışımları alınmıştır. Çalışılan sistemler arasında en düşük sapma potasyum fosfat-su sistemlerinde görülmüştür.

Çizelge 5.3'de amonyum sülfat-su içeren ikili sistemlerin viskoziteleri verilmiştir. Amonyum sülfat-su sisteminin Arrhenius denklemiyle [3.6] hesaplanan ve deneysel olarak bulunan viskoziteler arasındaki farktan relatif hata bulunmuştur. Relatif hataları mutlak değer olarak 0,19 ile 11,1 aralığında değişmiştir.

Çizelge 5.3. Amonyum sülfat-su çözeltilerin deneysel ve hesaplanan viskoziteleri [3.6]

T(°C)	W Amon.Sül. (%a/a)	V <sub>deneysel</sub> (cSt)	V <sub>hesaplanan</sub> (cSt)	e (relatif hata)
20	7,5	1,053	1,056	-0,22
20	8,5	1,069	1,074	-0,38
20	8,75	1,072	1,075	-0,47
20	10	1,093	1,095	-0,22
20	11	1,106	1,108	-0,19
20	12	1,126	1,120	0,52
20	13	1,133	1,131	0,2
20	14	1,144	1,142	0,19
25	7,5	0,951	0,946	0,52
25	8,5	0,963	0,967	-0,42
25	8,75	0,971	0,976	0,55
25	10	0,993	0,990	0,37
25	11	1,007	1,004	0,38
25	12	1,022	1,017	0,51
25	13	1,031	1,029	0,2
25	14	1,038	1,040	-0,15
30	7,5	0,855	0,855	1,0
30	8,5	0,872	0,873	-0,16
30	8,75	0,880	0,878	0,29
30	10	0,900	0,898	0,23
30	11	0,924	0,913	1,23
30	12	0,929	0,926	0,23

Çizelge5.3 (Devamı)

T(oC)	w Amon.Sül. ( %a/a)	vdeneyşelcŞt	vhesaplanancŞt	e (relatif hata)
30	13	0,941	0,939	0,16
30	14	0,948	0,951	-0,3
5	7,5	0,775	0,754	2,7
35	8,5	0,794	0,758	4,5
35	8,75	0,799	0,759	5,0
35	10	0,819	0,764	6,7
35	11	0,828	0,768	7,3
35	12	0,835	0,771	7,7
35	13	0,843	0,774	8,2
35	14	0,856	0,776	9,3
40	7,5	0,728	0,809	-11,1
40	8,5	0,734	0,814	-1,1
40	8,75	0,739	0,816	-1,0
40	10	0,758	0,821	-8,2
40	11	0,768	0,824	-7,4
40	12	0,781	0,828	-6,0
40	13	0,790	0,831	-5,1
40	14	0,801	0,833	-4,0

Viskozite değerleri beklenildiği gibi konsantrasyon artmasıyla artmış, sıcaklık artmasıyla azalmıştır. Potasyum fosfat-su, amonyum sülfat-su çözeltilerinin viskoziteleri aynı sıcaklıklarda saf suyun viskozitesinden büyük çıkmıştır.

Çizelge 5.4’de PEG-potasyum fosfat-su sistemlerinin viskoziteleri verilmiştir. Aynı sıcaklık ve konsantrasyonlarda PEG-potasyum fosfat-su çözeltilerinin konsantrasyonu PEG-su çözeltilerinin konsantrasyonundan yüksek çıkmıştır. Denklem [3.6] (Arrhenius) yardımıyla hesaplanan viskozite değerleriyle deneysel viskozite değerleri karşılaştırılmış ve aralarındaki farklılık relatif hata ile bulunmuştur. Relatif hatalar mutlak değer olarak 1,3 ile 19,4 aralığında değişmiştir. PEG-PF-su sisteminde % 15 PEG içeren çözeltilerinde relatif hata değerleri diğer konsantrasyonlardaki çözeltilerinden daha düşük çıkmıştır. Bu durum Arrhenius denkleminin % 15 PEG için çözeltisi iyi çalıştığını göstermiştir.

Çizelge 5.4. PEG3350-Potasyum fosfat-su çözeltilerin deneysel ve hesaplanan viskoziteleri

T(°C)	W PEG (%a/a)	W PF (%a/a)	$v_{\text{deneysel}}$ (cSt)	$v_{\text{hesaplanan}}$ (cSt)	e relatif hata
20	2,5	5	1,451	1,297	10,6
20	5	5,9	1,976	2,074	-5
20	7,5	6,5	2,393	2,854	-17,3
20	10	7,5	3,130	3,467	-10,8
20	12,5	8,2	3,672	4,093	-11,5
20	15	9,6	4,771	4,687	1,9
20	17,5	11	5,508	5,255	4,7
20	20	13	7,028	5,897	16,1
25	2,5	5	1,323	1,199	9,4
25	5	5,9	1,752	1,878	-7,2
25	7,5	6,5	2,176	2,531	-16,3
25	10	7,5	2,780	3,128	-12,5
25	12,5	8,2	3,460	3,688	-6,7
25	15	9,6	4,327	4,215	2,4
25	17,5	11	5,349	4,730	10,2
25	20	13	5,714	5,211	8,8
30	2,5	5	1,365	1,184	13,2
30	5	5,9	1,550	1,697	-9,5
30	7,5	6,5	1,939	2,315	-19,4
30	10	7,5	2,453	2,817	-11,9
30	12,5	8,2	3,046	3,282	-5,9

Çizelge 5.4. (Devamı)

T(°C)	W PEG (%a/a)	W PF (%a/a)	V <sub>deneysel</sub> (cSt)	V <sub>hesaplanan</sub> (cSt)	e (relatif hata)
30	15	9,6	3,756	3,714	1,3
30	17,5	11	4,726	4,324	8,5
30	20	13	5,246	4,617	11,9
35	2,5	5	1,156	0,975	15,7
35	5	5,9	1,370	1,512	-10,4
35	7,5	6,5	1,716	1,961	14,3
35	10	7,5	2,161	2,441	-12,9
35	12,5	8,2	2,649	2,831	-7,3
35	15	9,6	3,365	3,216	4,2
35	17,5	11	3,937	3,575	8,9
35	20	13	4,447	3,986	11,7
40	2,5	5	1,038	0,892	14,0
40	5	5,9	1,234	1,364	-10,5
40	7,5	6,5	1,535	1,714	-11,7
40	10	7,5	1,880	2,177	-14,2
40	12,5	8,2	2,388	2,530	5,9
40	15	9,6	2,950	2,860	2,7
40	17,5	11	3,522	3,172	9,9
40	20	13	3,982	3,490	12,4

Çizelge 5.5’de PEG- amonyum sülfat-su çözeltilerinin viskozite değişimleri gözlenmiştir. PEG-amonyum sülfat-su çözeltilerinin viskoziteleri aynı sıcaklık ve konsantrasyonda PEG-PF-su çözeltisinin viskozitesinden büyük çıkmıştır. Denklem [3.6] (Arrhenius) yardımıyla hesaplanan viskozite değerleriyle deneysel viskozite değerleri karşılaştırılmış ve aralarındaki farklılık relatif hata ile bulunmuştur. Relatif hatalar bu sistem için mutlak değer olarak 0,09 ile 6,2 aralığında değişmiştir. Relatif hataların düşük olması Arrhenius denkleminin bu sistemler için iyi çalıştığını göstermiştir.

Çizelge 5.5. PEG3350-Amonyum sülfat-su çözeltilerin deneysel ve hesaplanan viskoziteleri [3.6]

T(°C)	W PEG (%a/a)	W Amon.Sül.( %a/a)	V <sub>deneysel</sub> (cSt)	V <sub>hesaplanan</sub> (cSt)	e (relatif hata)
20	2,5	7,5	1,595	1,590	0,35
20	5	8,5	1,806	1,799	0,4
20	7,5	8,75	2,269	2,259	0,42
20	10	10,5	2,677	2,667	0,38
20	12,5	11,5	3,084	3,078	0,18
20	15	12	5,605	5,599	0,10
20	17,5	13	7,600	7,590	0,13
20	20	14	9,241	9,148	1,0
25	2,5	7,5	1,354	1,337	1,3
25	5	8,5	1,604	1,596	0,51
25	7,5	8,75	2,015	2,001	0,7
25	10	10,5	2,522	2,497	1,0
25	12,5	11,5	2,589	2,580	0,34
25	15	12	5,162	5,153	0,17
25	17,5	13	6,476	6,470	0,09
25	20	14	8,127	8,029	1,21
30	2,5	7,5	1,211	1,203	0,67
30	5	8,5	1,445	1,432	0,88
30	7,5	8,75	1,827	1,811	0,86
30	10	10,5	2,303	2,211	4,0

Çizelge 5.5. (Devamı)

T(°C)	W PEG (%a/a)	W Amon.Sül. (%a/a)	V <sub>deneysel</sub> (cSt)	V <sub>hesaplanan</sub> (cSt)	e (relatif hata)
30	12,5	11,5	2,513	2,499	1,45
30	15	12	3,633	3,591	1,16
30	17,5	13	4,304	4,293	0,27
30	20	14	7,370	7,299	1,0
35	2,5	7,5	1,082	1,070	0,9
35	5	8,5	1,187	1,178	0,76
35	7,5	8,75	1,399	1,381	1,3
35	10	10,5	1,964	1,960	0,20
35	12,5	11,5	2,069	2,102	-1,6
35	15	12	3,294	3,303	-0,2
35	17,5	13	4,584	4,569	0,3
35	20	14	6,780	6,830	-3,7
40	2,5	7,5	0,959	0,950	1,0
40	5	8,5	1,094	1,026	6,2
40	7,5	8,75	1,124	1,121	0,27
40	10	10,5	1,201	1,140	5,1
40	12,5	11,5	2,510	2,493	0,78
40	15	12	3,461	3,443	-0,6
40	17,5	13	4,620	4,610	1,0
40	20	14	6,482	6,480	3,4

Konsantrasyon birim hacimdeki madde miktarı olduğuna göre, konsantrasyonu arttırdığımızda aynı hacimdeki molekül sayısını arttırmış oluyoruz demektir. Dolayısıyla bu da aktivasyon enerjisinin artmasına neden olur. PEG-su, potasyum fosfat-su, amonyum sülfat-su, PEG-potasyum fosfat-su, PEG-amonyum sülfat-su içeren ikili ve üçlü sistemlerin sıcaklık ile aktivasyon enerjisi değişimleri Çizelge 5.6-5.10'da ve Ek 3'de verilmiştir. İkili ve üçlü sistemlerde beklenildiği gibi sıcaklıkla aktivasyon enerjisi çizelge ve şekillerde de görüldüğü gibi fazla değişmemiştir (Şekil Ek-3.6- Ek-3.10). Arrhenius denklemiyle bulunan A sabiti değerleri Çizelge 5.11'de ve  $R^2$  değerleri ise Çizelge 5.12'de verilmiştir.

Çizelge 5.6. PEG-su çözeltilerinin aktivasyon enerjisi

W PEG (%a/a)	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)				
	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
2,5	522,7	522	521,5	522,1	523
5	1045,5	1045,1	1046	1045	1045,6
7,5	1568,3	1567,9	1568,1	1568	1568
10	2091,1	2092	2091	2091,2	2092
12,5	2613,8	2614,3	2615	2614	2614
15	3136,6	3136	3137	3136,4	3137
17,5	3659,4	3659,3	3660	3659	3659
20	4182,1	4181,9	4181	4182	4181,5

Çizelge 5.7. Potasyum fosfat-su çözeltilerinin aktivasyon enerjisi

W PF (%a/a)	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)				
	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
5	151,7	152,1	152,9	152	152,5
5,9	303,5	304	303,9	304	303
6,5	455,9	455	456	456,3	455,5
7,5	607	607,2	607,3	607,9	607
8,2	758,1	758,5	758,3	759,1	758,6
9,6	910,5	910	911	910	910
11	1062,9	1062,2	1062	1063	1063,9
13	1214	1214	1214,6	1214,3	1214,6

Çizelge 5.8. Amonyum sülfat-su çözeltilerinin aktivasyon enerjileri

W Amon.Sül. (%a/a)	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)				
	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
7,5	88	87	88	87,5	88,1
8,5	175,9	176	175,3	176,2	177
8,75	263,9	263,5	264	263	264
10,5	351,8	351,2	352,1	352	351,6
11,5	438,5	438,6	438,3	439,2	438
12	527,7	527,6	527,4	528,1	528,1
13	614,4	615	614,3	614,4	614,5
14	703,6	703,5	703	703,7	704

Çizelge 5.9. PEG-Potasyum fosfat-su çözeltilerinin aktivasyon enerjileri

W PEG (%a/a)	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)				
	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
2,5	542,6	542	543	542,3	542,2
5	1085,2	1085,1	1085,6	1085,4	1085,1
7,5	1627,8	1627,8	1628	1628,1	1628,2
10	2170,3	2170,4	2170,6	2170	2171
12,5	2712,9	2713	2713,1	2713,1	2713,2
15	3255,5	3255,5	3255,7	3255,7	3255,9
17,5	3798,1	3798,2	3798,2	3798,3	3798,5
20	4340,7	4340,7	4340,9	4341	4341

Çizelge 5.10. PEG-Amonyum sülfat- su çözeltilerinin aktivasyon enerjileri

W PEG (%a/a)	Aktivasyon Enerjisi (kJ/mol)				
	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
2,5	32,8	32,7	32,5	32,6	32,6
5	65,6	66	66,2	66,3	66,5
7,5	98,5	98,7	98,7	99	99,1
10	131,3	131,5	131,6	131,2	131,6
12,5	164,1	164	164,3	164,5	164,7
15	197	197	197,3	197,5	197,6
17,5	229,8	229,9	230	231,1	231,3
20	262,6	262,6	262,8	262,9	262,9

Çizelge 5.11. A sabitinin farklı sıcaklıklardaki değeri

	A Sabiti Değerleri				
	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
PEG-Su	1,1164	0,9257	0,8501	0,7486	0,6922
PF-Su	0,9307	0,8665	0,8235	0,759	0,6898
Amon.Sül-Su	0,9604	0,856	0,7602	0,7012	0,6466
PEG-PF-Su	1,2369	1,1342	1,0747	0,9467	0,8478
PEG-Amon.Sül.-Su	1,04	0,9385	0,8452	0,7699	0,7141

Çizelge 5.12. R<sup>2</sup>'nin farklı sıcaklıklardaki değeri

	R <sup>2</sup> Değerleri				
	20 °C	25 °C	30 °C	35 °C	40 °C
PEG-Su	0,983	0,9987	0,9905	0,9939	0,9673
PF-Su	0,8228	0,9907	0,8235	0,9497	0,8735
Amon.Sül-Su	0,9604	0,9883	0,9823	0,9844	0,9913
PEG-PF-Su	0,9949	0,989	0,9945	0,9942	0,9956
PEG-Amon.Sül.-Su	0,9852	0,9836	0,9738	0,9778	0,986

R<sup>2</sup> değerinin 1'e yakın bulunması, bağımlı değişkendeki değişimin büyük bir kısmının bağımsız değişkenler tarafından açıklanabildiğini gösterir. Bu da çözümlenmede en çok istenen sonuçtur. Eğer iki değişken arasındaki korelasyon + 1,00 ise tüm değerler regresyon doğrusu üzerine düşecektir. Diğer bir deyişle, ideal tam bir ilişki varsa açıklanamayan değişim olmayacaktır. Fakat, gerçekte korelasyon ideallikten daha azdır. Dolayısıyla değerlerin bir çoğu regresyon doğrusu üzerine düşmeyecektir. Regresyon doğrusundan değerlerin sapması, değişimi verecektir ki, bu sapmalar küçük olduğu oranda değişimde küçük olacaktır.

## 5.2. Grunberg-Nissan Denklemi:

Grunberg-Nissan denklemi [3.26] farklı sistemlerin viskozitelerini bulmak için literatürde yaygın olarak kullanılan empirik denklemlerden biridir. İkili sıvı karışımlar için en iyi tanımlayıcı denklemdir ve en geniş uygulanabilirliğe sahiptir.

Literatürde PEG-tuz-su, metil, etil, bütül asetat + etilen, dietil, trietilen ve propilen glikoz, PEG 350 monometilen eter içeren sistemlerin viskozitelerini bulmak için kullanılmıştır (2, 6, 10, 15-17).

Grunberg-Nissan denklemi [3.26] literatürde ikili sistemler için önerilmiştir. Kullanılan Grunberg-Nissan denklemiyle dinamik viskoziteler hesaplanmıştır. Bu denklemde  $x$  değerleri mol cinsinden verilmiştir. Bu denklem çalışmamızda polimer-tuz-su içeren üçlü sistemlerin viskozitelerini bulmak için kullanılmıştır. Çalışılan PEG-tuz-su sistemlerinin deneysel viskoziteleri kullanarak yapılan regresyon analizi hesaplamaları Ek 4' de verilmektedir.

PEG3350-PF-su içeren üçlü sistemlerin Grunberg-Nissan denklem [3.26] ile hesaplanan ve deneysel olarak bulunan viskozite değerleri ve relatif hataları Çizelge 5.15 verilmiştir. Bu veriler Ek 3’de grafiğe geçirilmiştir. Relatif hatalar bu sistem için mutlak değer olarak 0,054 ile 13,13 aralığında değişmektedir. En yüksek sapma PEG-potasyum fosfat-su sisteminde görülmektedir.

Çizelge 5.13. PEG3350-PF-Su çözeltilerinin deneysel ve hesaplanan viskoziteleri [3.26], ( $G = 22,2$ )

T(°C)	W PEG (%a/a)	W PF (%a/a)	$V_{\text{deneysel}}$ (cSt)	$V_{\text{Grunber}}$ (cSt)	$e_{\text{relatif hata}}$
20	2,5	5	1,451	1,260	13,13
20	5	5,9	1,976	1,811	8,37
20	7,5	6,5	2,393	2,234	2,2
20	10	7,5	3,130	2,980	4,8
20	12,5	8,2	3,672	3,540	3,5
20	15	9,6	4,771	4,650	2,5
20	17,5	11	5,508	5,381	2,3
20	20	13	7,028	7,009	0,275
25	2,5	5	1,323	1,290	2,5
25	5	5,9	1,752	1,640	6,4
25	7,5	6,5	2,176	2,230	-2,5
25	10	7,5	2,780	2,610	6,1
25	12,5	8,2	3,460	3,230	3,5
25	15	9,6	4,327	4,250	1,77
25	17,5	11	5,349	5,230	2,22
25	20	13	5,714	5,634	1,407
30	2,5	5	1,365	1,370	-0,37
30	5	5,9	1,550	1,540	0,64
30	7,5	6,5	1,939	1,810	6,6
30	10	7,5	2,453	2,213	9,8
30	12,5	8,2	3,046	2,970	2,5
30	15	9,6	3,756	3,730	0,7
30	17,5	11	4,726	4,601	2,6
30	20	13	5,246	5,196	0,95

Çizelge 5.13. (Devamı)

T(°C)	W PEG (%a/a)	W PF (%a/a)	V <sub>deneysel</sub> (cSt)	V <sub>Grunber</sub> (cSt)	e (relatif hata)
35	2,5	5	1,156	1,045	0,44
35	5	5,9	1,370	1,219	11,0
35	7,5	6,5	1,716	1,609	6,2
35	10	7,5	2,161	2,100	2,83
35	12,5	8,2	2,649	2,590	2,23
35	15	9,6	3,365	3,240	3,7
35	17,5	11	3,937	3,710	5,8
35	20	13	4,447	4,350	2,2
40	2,5	5	1,038	1,020	1,8
40	5	5,9	1,234	1,301	-0,05
40	7,5	6,5	1,535	1,490	2,92
40	10	7,5	1,880	1,790	4,8
40	12,5	8,2	2,388	2,288	4,2
40	15	9,6	2,950	2,790	5,4
40	17,5	11	3,522	3,410	3,2
40	20	13	3,982	4,042	-1,45

PEG3350-amonyum sülfat-su içeren üçlü sistemlerin Grunberg-Nissan denklem [3.26] ile hesaplanan ve deneysel olarak bulunan viskozite değerleri ve relatif hataları Çizelge 5.16 verilmiştir. Bu veriler Ek 3’de grafiğe geçirilmiştir. Relatif hatalar bu sistem için mutlak değer olarak 0,017 ile 9,7 aralığında değişmektedir. Grunberg-Nissan deklemiyle çalışılan üçlü sistemler için ortalama sapma % 4,9 olarak bulunmuştur.

Çizelge 5.14. PEG3350-Amonyum sülfat-su çözeltilerinin deneysel ve hesaplanan viskoziteleri [3.26], (G =29,8)

T(°C)	W PEG (%a/a)	W Amon.Sül.( %a/a)	$v_{\text{deneysel}}$ (cSt)	$v_{\text{Grunberg}}$ (cSt)	e (relatif hata)
20	2,5	7,5	1,595	1,481	7,15
20	5	8,5	1,806	1,952	8,08
20	7,5	8,75	2,269	2,139	5,73
20	10	10,5	2,677	2,571	3,96
20	12,5	11,5	3,084	2,970	3,7
20	15	12	5,605	5,473	2,35
20	17,5	13	7,600	7,530	0,92
20	20	14	9,241	9,130	1,2
25	2,5	7,5	1,354	1,294	4,43
25	5	8,5	1,604	1,570	2,12
25	7,5	8,75	2,015	2,210	-9,7
25	10	10,5	2,522	2,490	1,3
25	12,5	11,5	2,589	2,997	-15,5
25	15	12	5,162	5,030	2,6
25	17,5	13	6,476	6,580	-1,6
25	20	14	8,127	8,110	0,21
30	2,5	7,5	1,211	1,190	1,8
30	5	8,5	1,445	1,390	3,8
30	7,5	8,75	1,827	1,757	3,83
30	10	10,5	2,303	2,210	4,0
30	12,5	11,5	2,513	2,431	3,3
30	15	12	3,633	3,510	3,39
30	17,5	13	4,304	4,410	-2,5
30	20	14	7,370	7,450	-1,09

Çizelge 5.14. (Devamı)

T(°C)	W PEG (%a/a)	W Amon.Sül. (%a/a)	V <sub>deneySEL</sub> (cSt)	V <sub>hesaplanan</sub> (cSt)	e (relatif hata)
35	2,5	7,5	1,082	1,052	2,97
35	5	8,5	1,187	1,130	4,83
35	7,5	8,75	1,399	1,276	9,7
35	10	10,5	1,964	1,930	1,73
35	12,5	11,5	2,069	2,084	-0,05
35	15	12	3,294	3,415	-3,5
35	17,5	13	4,584	4,690	-2,31
35	20	14	6,780	6,710	1,03
40	2,5	7,5	0,959	0,930	3,0
40	5	8,5	1,094	1,040	4,94
40	7,5	8,75	1,124	1,101	2,064
40	10	10,5	1,201	1,174	2,6
40	12,5	11,5	2,510	2,431	3,21
40	15	12	3,461	3,481	-0,053
40	17,5	13	4,620	4,780	-0,017
40	20	14	6,482	6,621	-1,82

PEG-amonyum sülfat-su çözeltilerinin viskoziteleri aynı sıcaklık ve konsantrasyonda PEG-potasyum fosfat-su çözeltilerinin viskozitesinden büyük çıkmıştır. 20 °C' de PEG-potasyum fosfat-su ve PEG-amonyum sülfat-suyu içeren üçlü sistemlerin deneysel olarak bulunan ve Grunberg-Nissan denklemiyle hesaplanan viskozite değerleri Ek 3'de verilmiştir.

Bu çalışmada amaç endüstride biyomoleküllerin saflaştırılmasında yararlanılan faz viskoziteleri hakkında bilgi edinmek için, viskozitenin madde cinsine, sıcaklığa ve konsantrasyona bağlı ilişkiyi gözlemlemek ve sıcaklıkla konsantrasyon arasında ilişki kurmaktır.

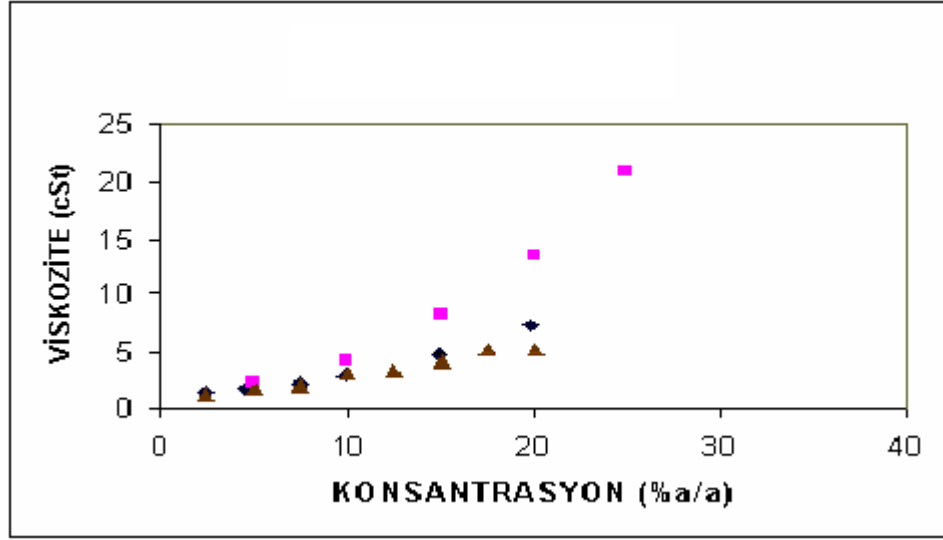
Bu denklemler kullanılarak hesaplanan relatif hatalara bakılacak olursa hemen hemen hepsi için iyi (düşük relatif hata) sonuçlar vermiştir. Sadece PEG-su sistemi için relatif hata 19,9 gibi büyük değer göstermiştir. Arrhenius denklemi ikili ve üçlü sistemlere uygulanmıştır. Grunberg-Nissan denklemi ise üçlü sistemlere uygulanmıştır. Grunberg-Nissan denklemi literatürde ikili sistemler için çok kullanılan denklemlerden biridir. Biz bu denklemi üçlü sistemlere uyguladık. Aynı sistemler için kullanılan bu iki model farklı relatif hataların oluşmasına neden olmuştur. Bazı sistemler için relatif hata değeri çok düşük bulunmuştur. Bu bulunan relatif hatalarda en düşük değer Grunberg-Nissan deklemiyle PEG-PF-su sistemi için 0,054'tür. Grunberg-Nissan denklemi bu sistem için iyi (düşük relatif hata) sonuçlar vermiştir. Arrhenius denklemiyle bulunan en düşük relatif hata potasyum fosfat-su sistemi için 0,00'dır. Arrhenius denklemi literatürde genellikle aktivasyon enerjisini bulmak için kullanılan denklemlerden biridir. Biz bu çalışmada bu denklemi kinematik viskoziteyi bulmak için de kullandık. Arrhenius denklemi amonyum sülfat-su, PEG-amonyum sülfat-su sistemlerinde iyi sonuçlar vermiştir. Relatif hatalar mutlak değer olarak amonyum sülfat-su için 0,19 ile 11,1 aralığında, PEG-amonyum sülfat-su için 0,09 ile 6,2 aralığın da değişmektedir.

Grunberg-Nissan denkleminin üçlü sistemlere uygulanabilirliğine bakılacak olursa, Grunberg-Nissan denklemi PEG-PF-su sistemi için iyi sonuçlar (relatif hatalar düşük çıkmıştır) verdiği söylenebilir. Bu sistemin relatif hataları mutlak değer olarak 0,054 ile 13,13 aralığındadır. PEG-amonyum sülfat-su sistemleri için 35 ve 40 °C'de iyi sonuçlar vermiştir. Düşük sıcaklıklarda relatif hatada Ek 3'de görüldüğü gibi sapmalar olmuştur.

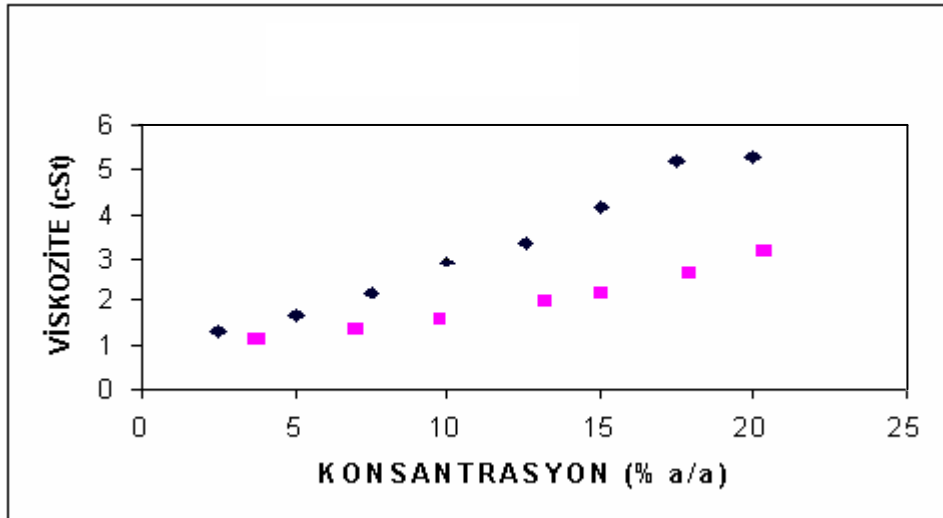
Grunberg denkleminin G parametresi genellikle optimizasyon ile elde edilir. Bu prosedürde optimizasyonun elde edilemediği yerde ortalama G veya G değerlerinden biri kullanılmalıdır. Fakat bu prosedür doğruluğunun bir kaybıdır. G parametresi, verilen bir karışımın sıcaklığıyla düzgünce değişir. G parametresini önceden bildirmek için bir metod elde edilememiştir. Bir çok çalışma bu problemi verebilir.

Çalıştığımız bu sistemde tuz yerine polimer kullanılabilir ve polimer-polimer-su sistemlerin viskoziteleri ölçülebilir. Literatürde (4) polimer-dekstran-su sistemleriyle çalışılarak bu sistemlerin viskoziteleri hesaplanmıştır. Polimer-polimer-su sistemlerinde en çok PEG ve dekstran tercih edilmektedir. Çünkü bunlar zehirsizdir ve bir çok ilacın bileşimde yer alırlar. Saflaştırma işleminde PEG-dekstran-su yerine PEG-tuz-su daha çok kullanılmaktadır. Bunun nedeni bu teknik ayırmada yüksek verimli ve basittir ayrıca ucuzdur. Literatür verileriyle bizim viskozite verileri karşılaştırılmış benzer sonuçlar alınmıştır. Ayrıca bu değerlerle literatür değerleri (13, 14, 19) grafiğe geçirilerek bu değerlerin birbiriyle ilişkisi grafikte gösterilmeye çalışılmıştır. Ayrıca literatürden farklı molekül ağırlıklı PEG'in viskozite değerleri de alınarak molekül ağırlığının viskoziteye etkisi gösterilmiştir (molekül ağırlığı arttıkça viskozitenin arttığı gözlemlenmiştir).

Literatürde PEG-3350 için çok fazla veriye ulaşamamıştır. Ancak bazı farklı konsantrasyonlar ve farklı sıcaklık çalışmaları yer almaktadır. Literatürde (14) PEG-3350'nin 25 °C ve ağırlıkça % 10 konsantrasyonu için viskozite değerlerini 2,329 cSt, 30 °C ve ağırlıkça % 10 için 1.838 cSt bulmuşlardır. Bizim sonuçlarda ise PEG-3350'nin 25 °C ve ağırlıkça % 10 konsantrasyonu için viskozite 2,230 cSt, 30 °C ve ağırlıkça % 10 için 1,648 cSt bulunmuştur. Aynı sıcaklıkta literatürde (13, 14, 19) konsantrasyonca 2,5-20, 3-25, 2-20 gibi aralıklarda çalışılmıştır. 20 °C PEG 1000 (19), PEG 6000 (13), PEG 3350 (14) literatür verileri kullanılmıştır. Bu deneysel viskozite verileriyle bizim deneysel verilerimiz grafiğe geçirilerek Şekil 5.1 ve Şekil 5.2 de verilmiştir. Bunlarda genellikle empirik modelleme çalışmaları yapılmıştır. Sonuçlar literatür verileriyle yakın değerler göstermiştir.



Şekil 5.1. 20°C'de farklı konsantrasyonlarda PEG-su sistemi için viskozite değişimleri (■: PEG6000 literatür (13), ◆: PEG3350 literatür (14), ▲: PEG3350 bu çalışma)



Şekil 5.2. 20 °C'de farklı konsantrasyonlarda PEG-su sistemi için viskozite değişimleri (■: PEG1000 literatür(19), ◆: PEG3350 bu çalışma)

Numune hazırlama prosedürlerinin uzun olması, gerekli malzemelerin pahalılığı, bazı işlemlerin zor ve zaman istemesi gibi sebepler analizleri büyük ölçüde sınırlayıp zorlaştırmaktadır.

## 6. ÖNERİLER

Polimer-polimer sistemleri yerine polimer-tuz sistemleri yüksek verime sahip olması ve ayrıca ekonomik olması nedeniyle tercih edilebilir.

Ne kadar dikkat edilirse edilsin viskozite ölçme işlemlerinde aksamalar olacaktır. Mümkün olduğu kadar bu işlemlerde hataları en aza indirmek gerekir. Ama hatayı sıfıra indirmek mümkün olmamaktadır.

Viskozite ölçümlerinde dikkat edilmesi gereken en önemli hususlardan birisi de sıcaklığın korunmasıdır. Sıcaklığın korunması için gerekli şartlar optimum hale getirilmeye çalışılmalıdır. Eğer sıcaklık değişimi çok fazla olursa yapılan çalışmaların hiçbir anlamı kalmaz.

Hangi tür kaynaktan olursa olsun biyomoleküllerin saflaştırma prosesleri oldukça zaman alıcı ve yüksek maliyetlidir. Bu tür çalışmalarda kullanılan araç-gereçler, kimyasal maddeler çok pahalıdır. Bunların seçimi çok iyi planlanıp eldeki imkanlara göre yapılmaya çalışılmalıdır. Kullanılabilecek alternatif yollar, araçlar, kimyasal maddeler belirlenmelidir. Yapılacak çalışmaların çok uzun süreler alacağı hesap edilerek buna göre de gerekli tedbirler alınmalıdır. Belirli yerlerde yapılacak hatalar çok miktarda zaman kaybına neden olacaktır. Bu aynı zamanda maliyetin de artması anlamına gelir ki bu da hataların en aza indirilmesi için gerekli şeylerin mutlaka yapılması gerektiği düşünülmelidir.

Her ürünün birbirlerinden farklı özellikleri olduğu için birbirlerinden değişik yöntemlerle saflaştırılması zorunludur. Bu nedenle de o zamana kadar elde olan ürünle ilgili verilerin toparlanıp ortaya konması hayati öneme sahiptir. Bu verilere göre de saflaştırma basamakları ve onların sıraya konması gerçekleştirilebilir. Ölçümlerin yüksek hassasiyette, ucuz ve çabuk bir şekilde yapılması için olanaklar sağlanmalıdır.

Temel ve uygulamaya yönelik bir bilim dalı olması nedeniyle biyoteknoloji laboratuvar uygulamalarının özellikle temel bilimsel araştırmalar düzeyinde gelişim sürecinin hız kazanmasında oldukça büyük bir öneme sahip olduğu belirgin ve şüphe götürmez bir gerçektir. Bu nedenle biyoteknoloji laboratuvarlarında doğru, güvenilir ve tekrarlanabilir sonuçlar alabilmek; gerek laboratuvarlarda uygulama öncesi bazı önemli kural ve koşulların ve gerekse deneysel çalışmalarda yararlanılan enzimler, kimyasal maddeler, çözenler, saf su, küçük aletler ve analitik cihazların seçimi, kullanımı ve korunmasına yönelik olarak uyulması ve uygulanması zorunluluk isteyen temel bazı kuralların gereği gibi yerine getirilmesiyle sağlanabilir.

## KAYNAKLAR

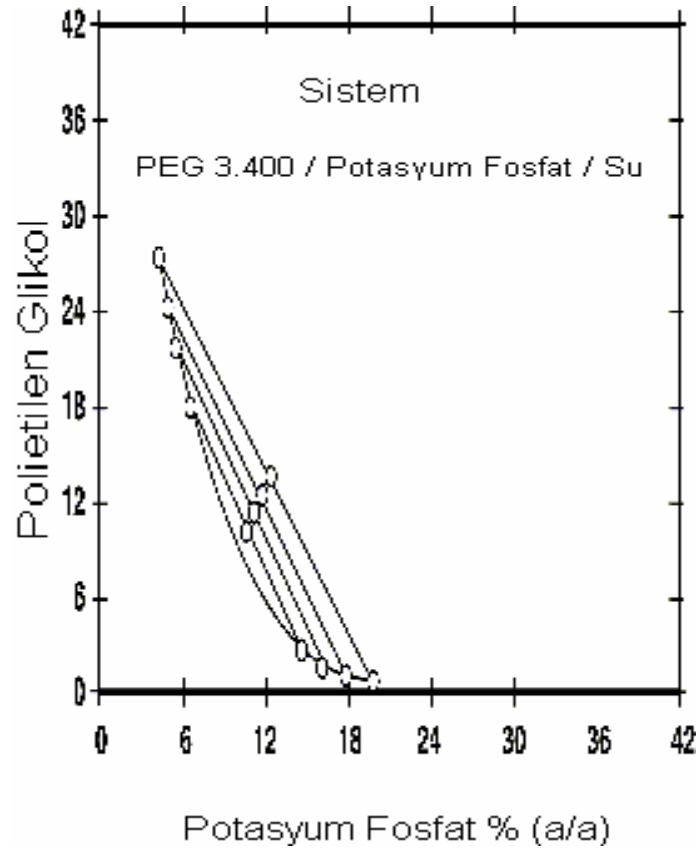
1. Korkmaz, K., "Sulu İki-Faz Sistemlerinde Protein Dağılımı". Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 16-17, (1999).
2. Gündüz, U., "Viscosity prediction of polyethylene glycol-dextran-water solution used in aqueous two phase systems", *Journal of Chromatography B*, (743): 181-185, (2000).
3. Zeybek, Z., "Değişik Polimer Çözeltilerinde Gaz/Sıvı Kütle Aktarımı ", *Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 3-5, (1993).
4. Pandit, A., Sawant, S.B., Joshi, J.B., Perkins, R.A., Sikdar, S.K., "Two Phase Aqueous Extraction", *Biotechnology Techniques*, (32): 125-129, (1989).
5. Tello, P.G., Camacho, F., Blazquez, G., "Density and viscosity of Concentrated Aqueous Solutions of Polyethylene Glycol", *J. Chem. Eng. Data B*, (39): 611-614, (1994).
6. Holgada, R., Schaefer, C.R., Arancibia, E.L., "Viscosity study of 1-propanol with polyethylene glycol 350 monomethyl ether systems at different temperatures" *Journal of Molecular Liquids*, (79): 257-267, (1999).
7. Cheng, R., Yang, Y., Yan, X., "The Wall Effect on Viscosity Measurement of Dilute Aqueous Solution of Poly(ethylene glycol) and Polyvinyl Alcohol Using a Paraffin-Coated Capillary Viscometer", *Polymer*, (40): 3773-3778, (1999).
8. Cruz, M.S., Chumpitaz, D.A.C., Alves, J.G.L.F., Meirelles, A.J.A., "Kinematic Viscosity of Poly(ethylene glycols)", *J.Chem. Eng. Data*, (45): 61-63, (2000).
9. Graber, T.A., Galleguillos, H., Asenjo, J.A., Andrews, B.A., "Refractive Index, Density, and Viscosity in the  $\text{NaNO}_3\text{-H}_2\text{O}$ -Poly(ethylene glycol) System at Various Temperatures", *J.Chem. Eng. Data*, (47): 174-177, (2002).
10. Naidu, V.K., Rao, K.C., Subha, M.C.S., "Densities and Viscosities of Mixtures of Some Glycols and Polyglycols in Dimethyl Sulfoxide at 308,15K", *J.Chem. Eng. Data*, (47): 379-381, (2002).
11. Baylaucq, A., Comunas, M.J.P., Boned C., Allal, A., Fernandez, J., "High Pressure Viscosity and Density Modeling of Two Dialkyl Carbonates", *Fluid Phase Equilibria*, 249-251-254, (2002).
12. Ninni, L., Burd, Fung, W.H., "Kinematic Viscosities of Poly(ethylene glycol)", *J.Chem. Eng. Data*, (47): 835-838, (2002).

13. Ninni, L., Burd, H., Fung, W.H., Merilles, A.J.A., “Kinematic Viscosity of Poly(ethylene glycol) Aqueous Solutions”, *J.Chem. Eng. Data*, (48): 324-328, (2003).
14. Rahbari, M., Taghizadeh, M., Eliassi, A., “Density and Viscosities of Binary Mixtures of Poly(ethylene glycol) and Poly(propylene glycol) in Water and Ethanol in the 293,15-338,15 K Temperature Range”, *J.Chem. Eng. Data*, 1221-1223, (2003).
15. Sastry, N.V., Patel, M.C., “Densities, Excess Molar Volumes, Viscosities, Speed of Sound, Excess Isentropic Compressibilities, and Relative Permittivities for Alkyl(Methyl, Ethyl, Butyl, and Isoamyl) Acetates-Glycols at Different Temperatures”, *J.Chem. Eng. Data*, (48): 1019-1026, (2003).
16. Romero T.J., “Dynamic Viscosity of Binary and Ternary Mixtures Containing Poly(Ethylene Glycol)”, *J.Chem. Eng. Data*, (45): 1340-1343, (2004).
17. Gündüz, U., “Evaluation of Viscosities of Aqueous Two-Phase System Containing Protein”, *Journal of Chromatography B*, (807): 157-161, (2004).
18. Ottani, S., Vitalini, D., Comelli, F., Castellari, C., “Densities, Viscosities and Refractive Indices of New Mixtures of Poly(ethylene glycols)-Dialkyl Carbonates at 313,15 K”, *J. Chem. Eng. Data*, (49): 148-150, 152, (2004).
19. Gonçalves, C.B., Trevisan, N., Meirelles, A.J.A., “Kinematic Viscosity of System Containing Polyethylene Glycol + Salt + Water at 298.2 K”, *J. Chem. Eng. Data*, (50): 177-181, (2005).
20. Singh, S., Sethi, B.P.S., Katyal, R.C., Rattan, V.K., “Viscosities, Densities, and Speed of Sound of Binary Mixtures of o-Xylene, p-Xylene, and Isopropylbenzene with 2-Butanone at 298.15 K”, *J. Chem. Eng. Data*, (50): 125-127, (2005).
21. Strioli, A., “Vapor-Liquid Equilibria for Some Concentrated Aqueous Polymer Solution”, *Polimer 41*, 1109-1117, (2000).
22. Serpil, A., “Polimer Teknolojisi”. Yüksek Lisans Dersi Ödevi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 1-5, (2003).
23. Soğukoğlu, M.M., “Akışkanlar Mekaniği”, *Fatih Ofset*, İstanbul, 7-15, (1995).
24. Peker, S., Helvacı, Ş.Ş., “Akışkanlar Mekaniği Kavramlar, Problemler, Uygulamalar”, *Literatür Yayınları*, İstanbul, 43-101, (2003).
25. Irving, J.B., “Viscosities of Binary liquid mixtures the effectiveness of mixture equations”, *Dept. of Industry*, London, 3-10, (1977).

26. Gürten, A.A., Narin, İ., Şahmetlioğlu, E., “Fizikokimya Laboratuvarı Deney Föyü”, *Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, 53, (2000).
27. Karakış, V., “Amino Asit Çözeltilerinin Viskoziteleri ”, *Kimya Mühendisliği Lisans Araştırma Projesi*, Ankara, 9-11, (2003).

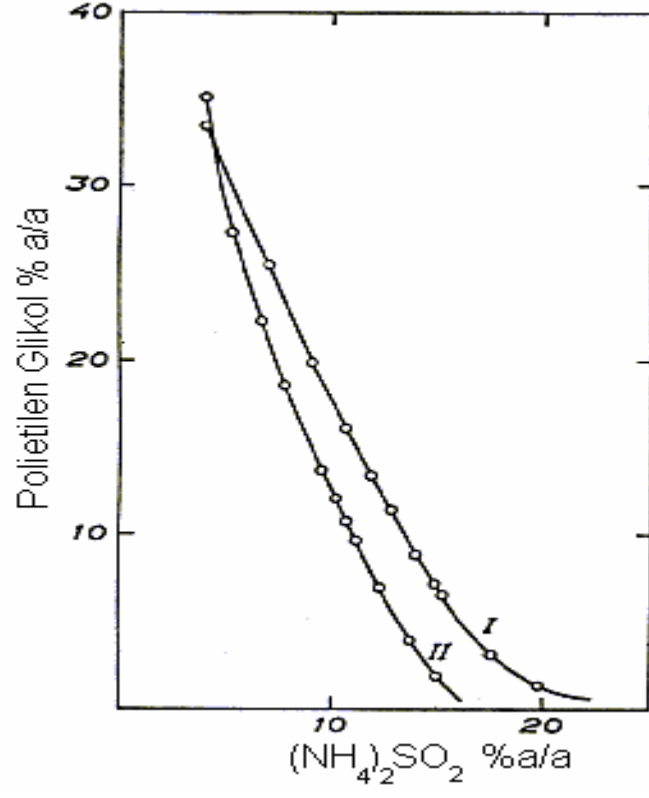
**EKLER**

## Ek-1



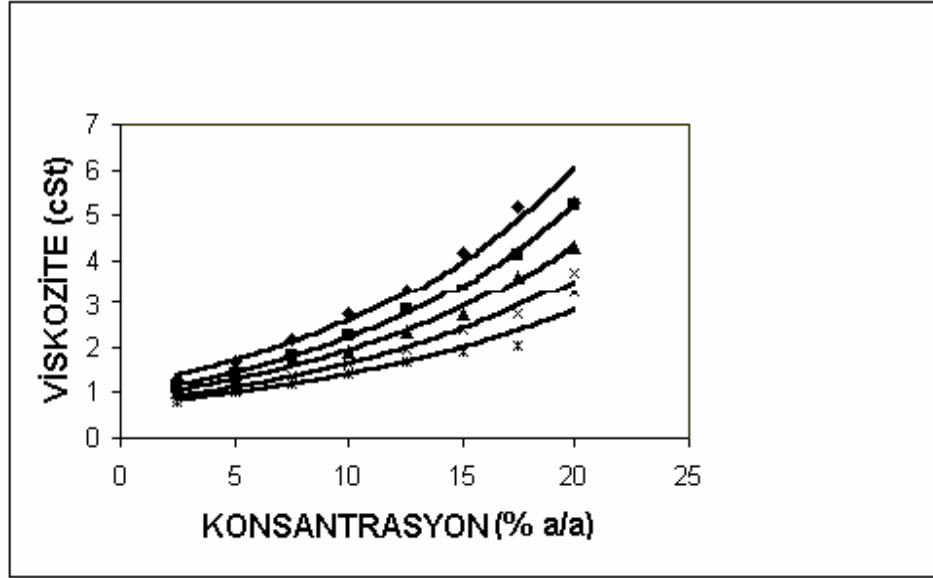
Şekil Ek-1.1. Polietilen glikol-potasyum fosfat-su faz diyagramı

## Ek-2

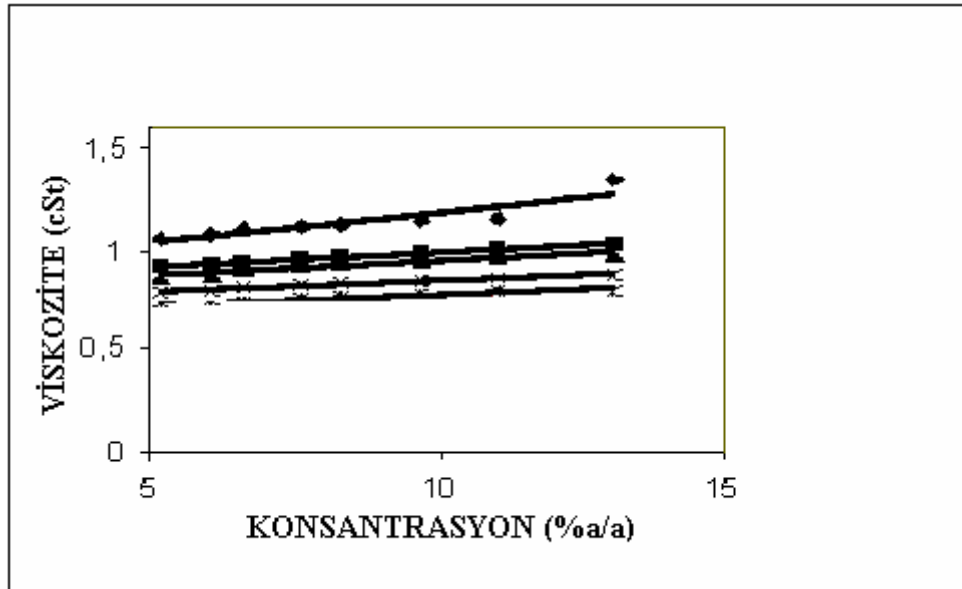


Şekil Ek-2.1. Polietilen glikol-amonyum sülfat –su faz diyagramı

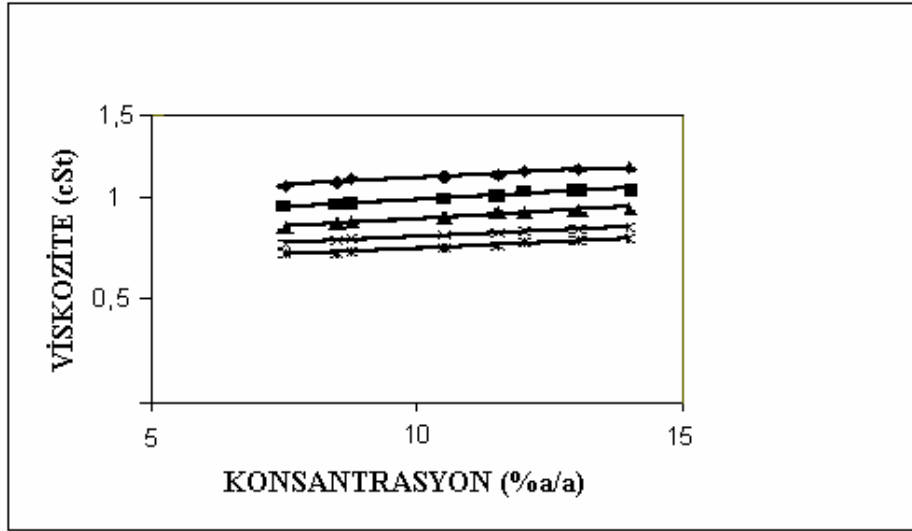
**Ek-3**  
**Grafikler**



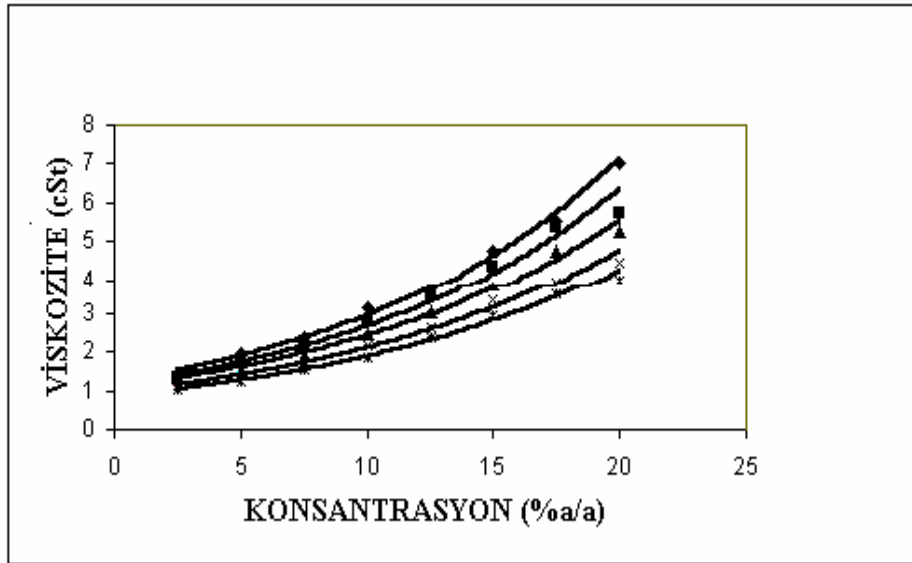
Şekil Ek-3.1. PEG3350-su çözeltisinin değişik sıcaklık ve konsantrasyonlarındaki viskozite değerleri (◆: 20 °C, ■: 25, ▲: 30 °C, ×: 35 °C, \*: 40 °C)



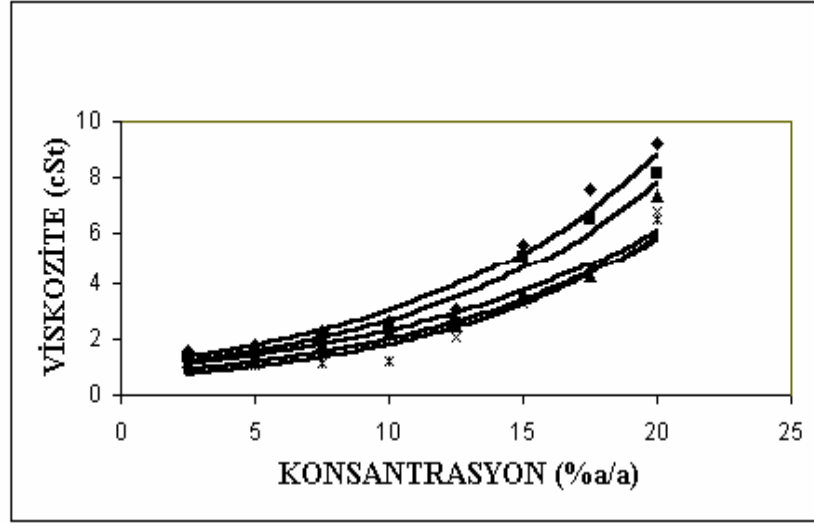
Şekil Ek-3.2. PF-su çözeltisinin değişik sıcaklık ve konsantrasyonlarındaki viskozite değerleri (◆: 20 °C, ■: 25, ▲: 30 °C, ×: 35 °C, \*: 40 °C)



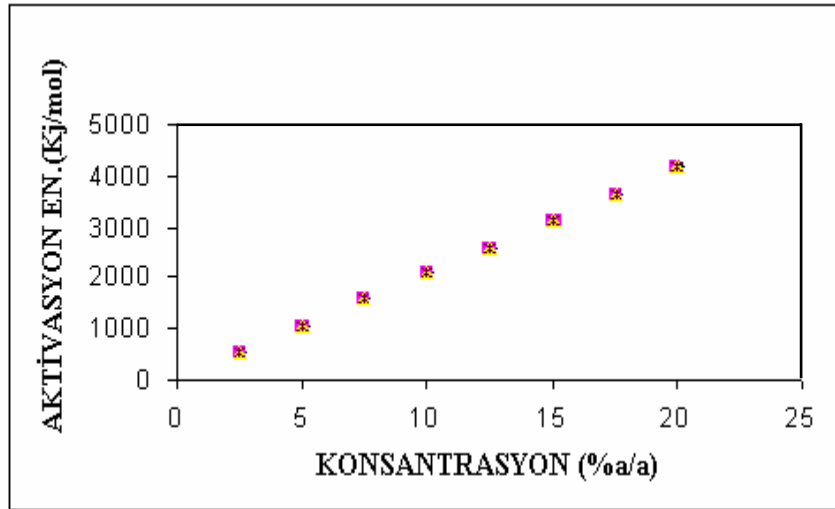
Şekil Ek-3.3. Amonyum Sülfat-su çözeltisinin değişik sıcaklık ve konsantrasyonlarındaki viskozite değerleri (◆: 20 °C, ■: 25, ▲: 30 °C, × : 35 °C, \*: 40 °C)



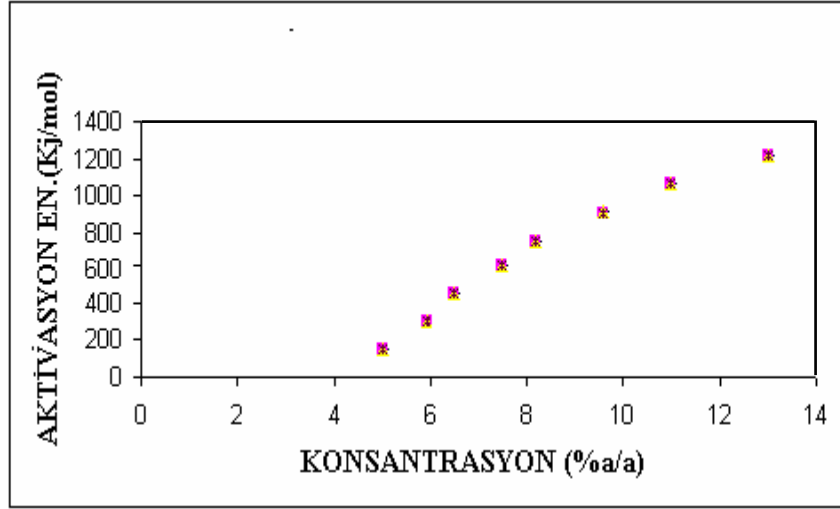
Şekil Ek-3.4. PEG3350-PF-su çözeltisinin değişik sıcaklık ve konsantrasyonlarındaki viskozite değerleri (◆: 20 °C, ■: 25, ▲: 30 °C, × : 35 °C, \*: 40 °C)



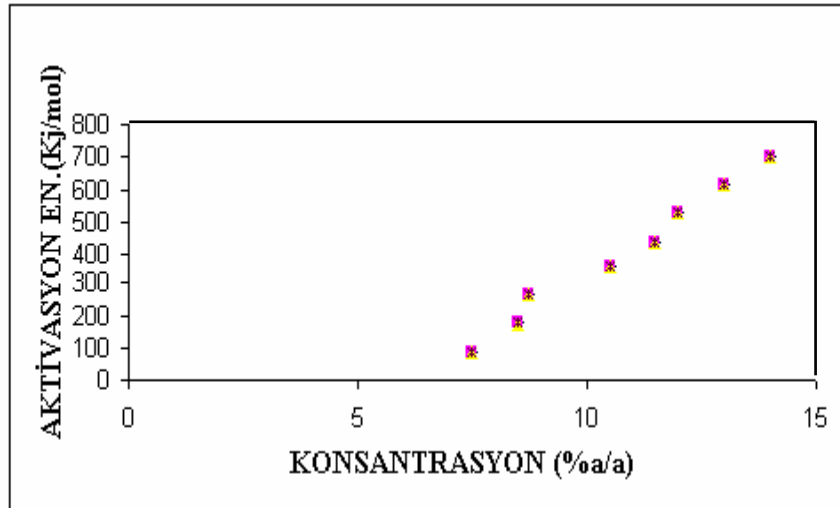
Şekil Ek-3.5. PEG3350-Amonyum Sülfat-su çözeltisinin değişik sıcaklık ve konsantrasyonlarındaki viskozite değerleri (◆: 20 °C, ■: 25, ▲: 30 °C, ×: 35 °C, \*: 40 °C)



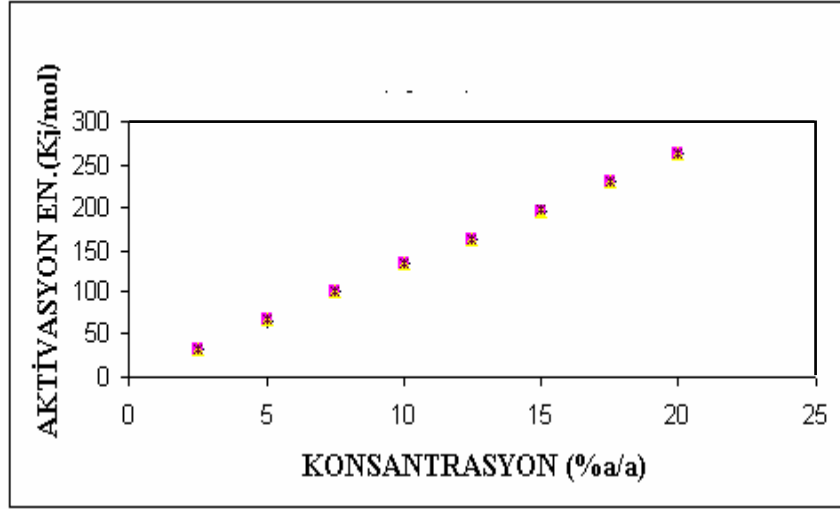
Şekil Ek-3.6. Aktivasyon enerjisinin sıcaklık ve konsantrasyonla değişimi (◆: 20 °C, ■: 25 °C, ▲: 30 °C, ×: 35 °C, \*: 40 °C)



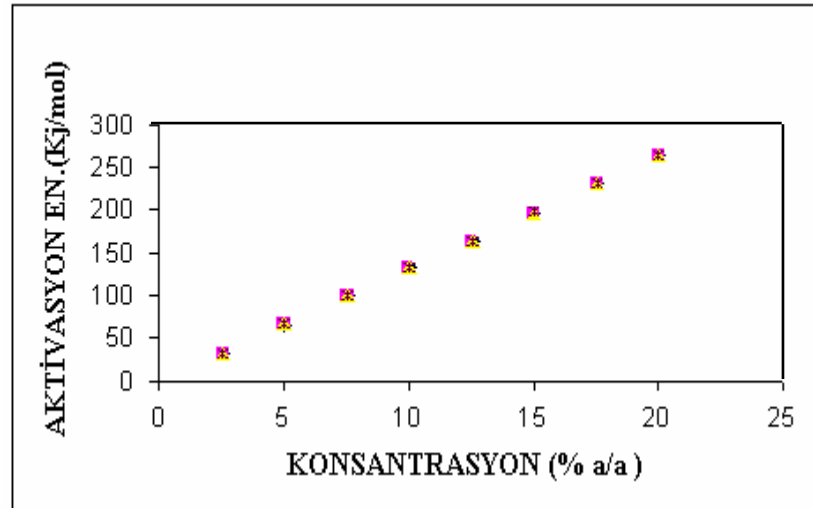
Şekil Ek-3.7. Aktivasyon enerjisinin sıcaklık ve konsantrasyonla değişimi (◆: 20 °C, ■: 25°C, ▲: 30 °C, ×: 35 °C, \*: 40 °C)



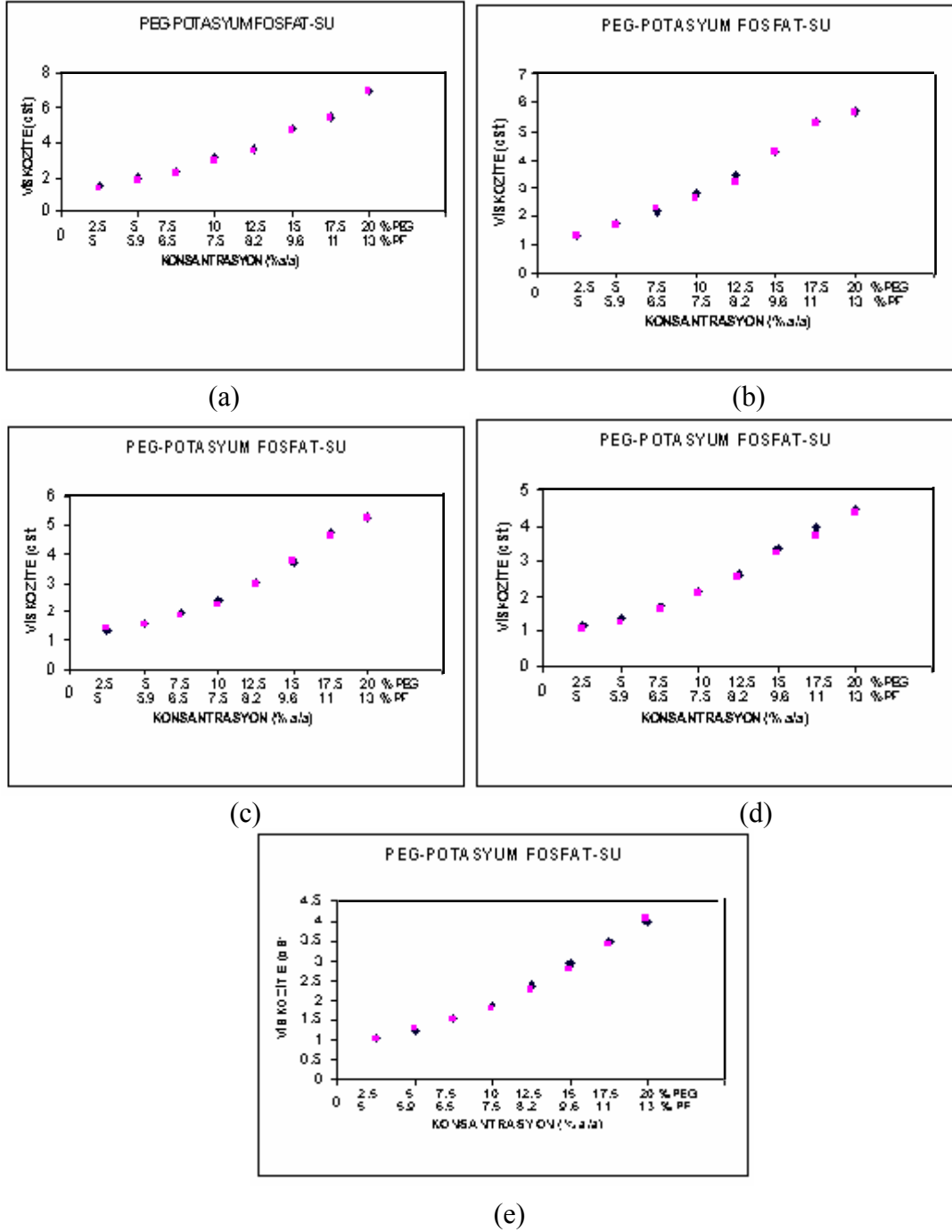
Şekil Ek-3.8. Aktivasyon enerjisinin sıcaklık ve konsantrasyonla değişimi (◆: 20 °C, ■: 25°C, ▲: 30 °C, ×: 35 °C, \*: 40 °C)



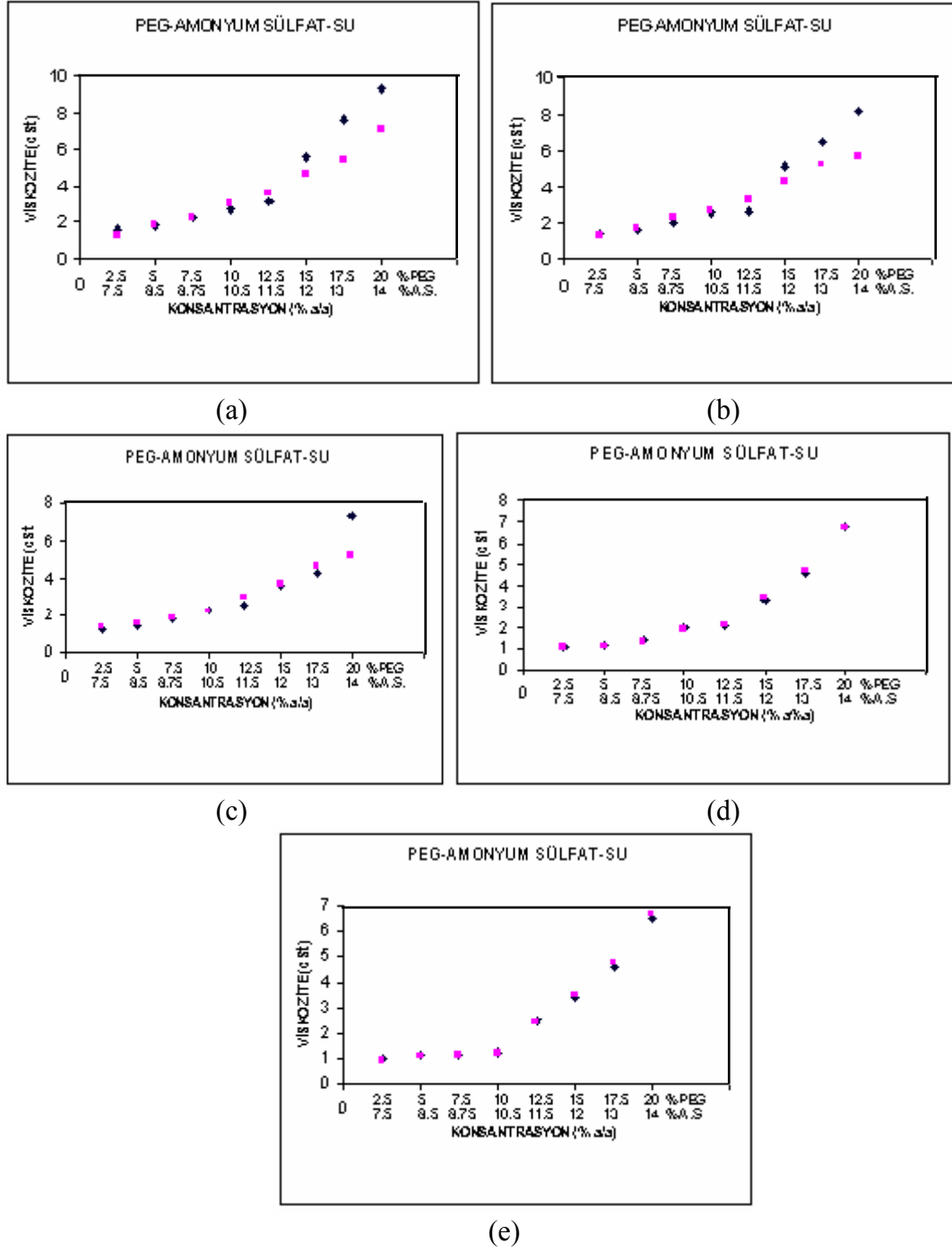
Şekil Ek-3.9. Aktivasyon enerjisinin sıcaklık ve konsantrasyonla değişimi (◆: 20 °C, ■: 25°C, ▲: 30 °C, ×: 35 °C, \*: 40 °C)



Şekil Ek-3.10. Aktivasyon enerjisinin sıcaklık ve konsantrasyonla değişimi (◆: 20 °C, ■: 25°C, ▲: 30 °C, ×: 35 °C, \*: 40 °C)



Şekil Ek-3.11. Farklı sıcaklıklarda PEG-potasyum fosfat-su grafiği ♦: deneysel veriler, ■: Grunberg-Nissan denklemi ile elde edilen veriler, (a) 20 °C, (b) 25 °C, (c) 30 °C, (d) 35 °C, (e) 40 °C



Şekil Ek-3.12. Farklı sıcaklıklarda PEG-amonyum sülfat-su grafiği ♦: deneysel veriler, ■: Grunberg-Nissan denklemi ile elde edilen veriler, (a) 20 °C, (b) 25 °C, (c) 30 °C, (d) 35 °C (e) 40 °C

#### Ek 4

### Grunberg-Nissan Denklemiyle İlgili Hesaplamalar

$$\ln v_{\text{karışım}} = x_1 \ln v_1 + x_2 \ln v_2 + 2G_{x_1.x_2}$$

$\ln$ 'li terimleri bir tarafa toplarsak,

$$\ln v_{\text{karışım}} - (x_1 \ln v_1 + x_2 \ln v_2) = 2G_{x_1.x_2}$$

$$\ln (v_{\text{karışım}} / v_1^{x_1} \cdot v_2^{x_2}) = 2G_{x_1.x_2}$$

$(x_1.x_2)$ 'ye,  $x$  ve  $\ln v_{\text{karışım}} / (\ln^{x_1} v_1 \cdot \ln^{x_2} v_2)$ 'e,  $y$  dersek )

$$y = mx$$

gibi bir doğru denklemi elde edilir.  $\ln v_{\text{karışım}} / (x_1 \ln v_1 + x_2 \ln v_2)$  karşı  $x_1.x_2$  grafiğe geçirilerek  $G$  sabiti bulunur.

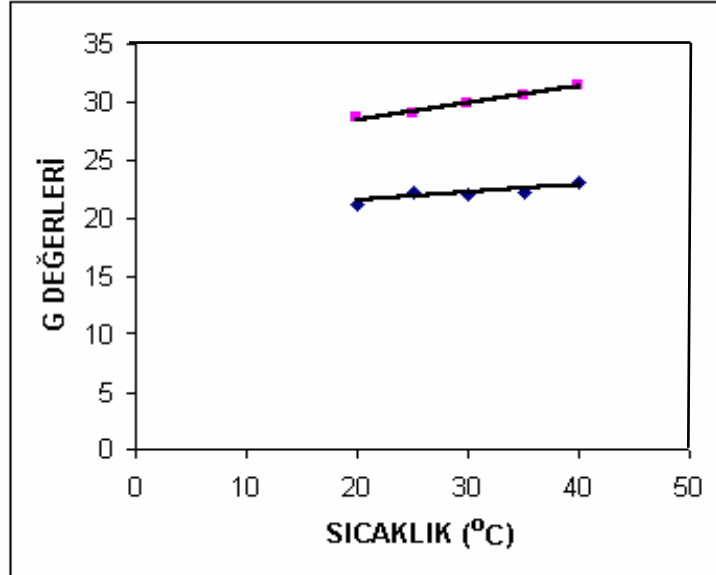
Çizelge 1 ve Çizelge 2'de  $G$  sabitinin sıcaklıkla değişimleri verilmiştir. Bu değerler Şekil 1'de grafiğe geçirilmiştir. Bu grafikten  $G$  sabitinin çok fazla değişmediğini görülmüştür. Bu nedenle  $G$  değerlerinin ortalaması alınarak  $G$  sabitinin sayısal değerlerini hesaplanmıştır.  $G$  sabitini, PEG-potasyum fosfat-su için 22,2 ve PEG-amonyum sülfat-su için 29,8 olarak alınmıştır.

Çizelge Ek-4.1. Farklı sıcaklıklarda PEG-potasyum fosfat-su için G sabiti değerleri

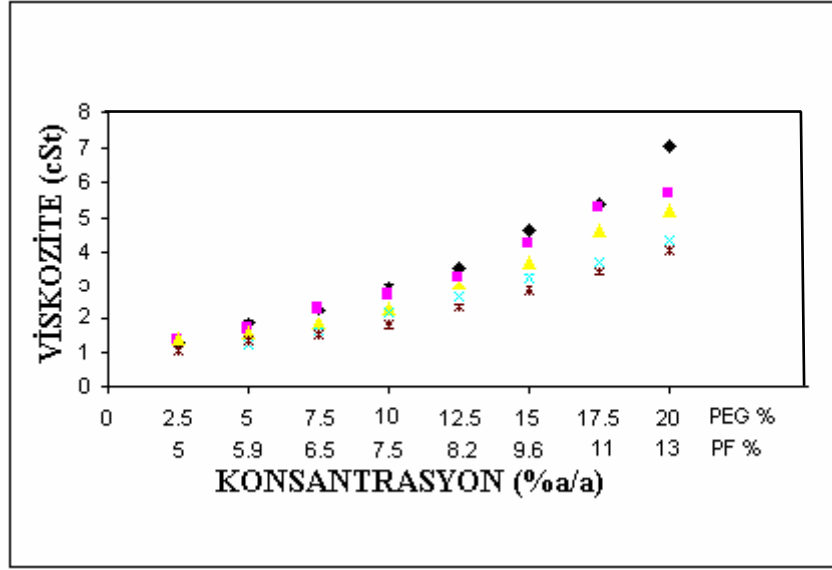
T(°C)	G
20	21,28
25	22,01
30	22,29
35	22,30
40	23,26

Çizelge Ek-4.2. Farklı sıcaklıklarda PEG-amonyum sülfat-su için G sabiti değerleri

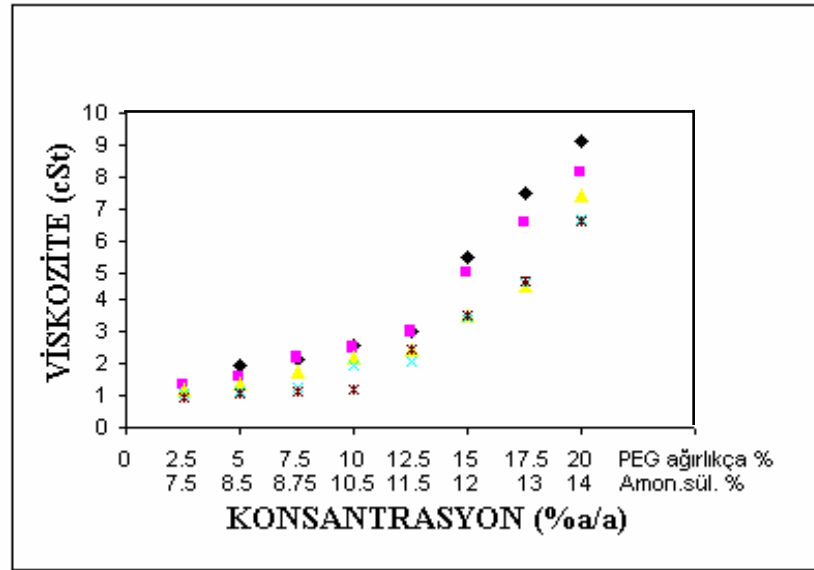
T(°C)	G
20	28,63
25	28,89
30	29,81
35	30,51
40	31,43



Şekil Ek-4.1. G sabitinin sıcaklıkla değişimi (■: PEG-amonyum sülfat-su , ◆: PEG-PF- su)



Şekil Ek-4.2. PEG-PF-su çözeltisinin değişik sıcaklık ve konsantrasyonlarındaki deneysel viskozite değerleri (◆: 20 °C, ■: 25, ▲: 30 °C, ×: 35 °C, \*: 40 °C)



Şekil Ek-4.3. PEG-amonyum sülfat-su çözeltisinin değişik sıcaklık ve konsantrasyonlarındaki deneysel viskozite değerleri (◆: 20 °C, ■: 25, ▲: 30 °C, ×: 35 °C, \*: 40 °C)

## **ÖZGEÇMİŞ**

1978'de Kırşehir'de doğdum. 2001 yılında Niğde Üniversitesi Kimya Bölümünden mezun oldum. Aynı yıl Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliğinde yüksek lisansa başladım.