

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

134728

GAZ-SIVI AKIŞ SİSTEMLERİNİN DİNAMİK DAVRANIŞI

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Hakan YOĞURTÇU

YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALI

Tez Yöneticisi: Doç. Dr. Fethi KAMIŞLI

134728

ELAZIĞ
2003

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

GAZ-SIVI AKIŞ SİSTEMLERİNİN
DİNAMİK DAVRANIŞI

Hakan YOĞURTÇU

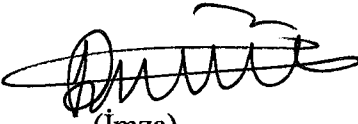
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİMDALİ

Bu Tez, 04/07/2023 Tarihinde, Aşağıda belirtilen Jüri Tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~
ile Başarılı / ~~Başarısız~~ Olarak Değerlendirilmiştir.


(İmza)

Danışman

Doç.Dr. Fethi KAMIŞLI


(İmza)

(Üye)

Doç.Dr. Arsun ÖZER


(İmza)

(Üye)

Doç.Dr. Mustafa KALLI

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu' nun 08/08/2023.....tarih
ve29/2.....sayılı kararıyla onaylanmıştır.

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

GAZ-SIVI AKIŞ SİSTEMLERİNİN
DİNAMİK DAVRANIŞI

Hakan YOĞURTÇU

Fırat Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı
2003, Sayfa 90

Gaz-sıvı birlikte akış türlerinden biri de gaz yardımıyla yer değiştirme olayıdır. Bu olayda dairesel veya dairesel olmayan geometriye sahip bir ortam içerisindeki sıvı kendisinden daha az viskoz olan bir akışkan (gaz) yardımıyla yer değiştirilmektedir. Bu yer değiştirme olayı gerçekleşirken gaz arkasında bir miktar sıvıyı bırakarak hareket eder. Bu boru veya kanal duvarında biriken bu sıvının miktarı ve şekli, akışkanın türü, gaz basıncı ve akışın olduğu ortamın şekli gibi faktörlere bağlıdır.

Bu tez çalışmasında, CMCNa ve HECNa polimerlerinden hazırlanan kütlece % 2.0, 2.5, 3.0 ve 3.5 konsantrasyonlarındaki çözeltiler kullanılarak gaz yardımıyla yer değiştirme olayı incelendi. Gaz akışkan olarak hava kullanıldı ve hava 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 psi basınçlarında enjekte edildi. Deneyler 5.3 mm iç çapa sahip 55 cm uzunlukta cam borular kullanılarak izotermal şartlarda gerçekleştirildi.

Kullanılan akışkanların reolojik özellikleri belirlendi ve Ca sayısı ile boru duvarında biriken sıvı fraksiyonunun değişimi farklı sıcaklıklarda (20, 30, 40, 50 ve 60 °C) incelendi.

Kullanılan polimer çözeltilerinin kayma hızı ile viskozitelerindeki değişim incelendi ve bu akışkanların pseudo plastik tipte akışkan oldukları tespit edildi.

Çalışma sıcaklığındaki artış ile boru duvarında biriken sıvı fraksiyonunda azalma olduğu görüldü. Diğer taraftan, akışkan konsantrasyonundaki artış ile boru duvarında biriken sıvı fraksiyonunda artma görüldü.

CMCNa çözeltileri ile yapılan deneylerden elde edilen sıvı fraksiyonu değerlerinin, HECNa çözeltileri ile elde edilenlerden daha büyük olduğu görüldü.

Anahtar kelimeler: İki fazlı akış, Gaz yardımı ile yer değiştirme, Newtonian olmayan akışkan.

SUMMARY

Master Thesis

DYNAMIC BEHAVIOUR OF GAS-LIQUID FLOW SYSTEMS

Hakan YOĞURTÇU

University of Fırat

Graduate School of Natural and Applied Science

Department of Chemical Engineering

2003, Pages 90

One of the flow type in the gas-liquid system is a gas-assisted displacement process. In this process a fluid confined in either circular or non-circular geometry is displaced by a less viscous fluid. In this displacement, a gas-bubble moves with leaving some liquid on the walls of geometry. The amount of liquid deposited on the walls of the geometry and its shape depend on the type of liquid, gas pressure and the shape of geometry.

In this master thesis, the solutions of CMCNa and HECNa having 2.0, 2.5, 3.0 and 3.5 % in terms of weight-base are used to examine the gas-assisted displacement. The air used as a displacing fluid is injected at pressures of 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 and 3.0 psi. The experiments are performed in a tube having inner diameter of 5.3 mm and a length of 55 cm is used at isothermal conditions.

Rheologic properties of fluids used in the experiments are determined by using Brookfield RVDV-II+ model viscometer and the relationships between Ca and the fraction of liquid deposited on the walls of the geometry are determined at the temperature of 20, 30, 40, 50 and 60 °C.

The viscosities of polymer solutions used in the experiments are determined as a function of shear rates and it reveals that fluids are pseudo plastic. It is observed that the fraction of liquid deposited on the walls of the tube decreases with increasing temperature of the fluid. On the other hand, it is observed that the film thickness on the

walls increases with increasing concentration of polymers solutions. In all the concentrations used in the experiments, it is found that the fraction of CMCNa solutions is larger than that of HECNa solutions.

Key words: Two-Phase Flow, Gas-Assisted Displacement, non-Newtonian Fluids.



TEŞEKKÜR

Tez konumun seçilmesinde, gerekli literatürün temininde ve çalışmaların yönlendirilmesinde büyük yardımlarını gördüğüm ve bilgilerinden faydalandığım değerli hocam Doç. Dr. Fethi KAMIŞLI' ya teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimi tarafından 554 nolu proje ile desteklenmiştir. Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri birimine ve bu imkanı sağlayan sayın yetkililere teşekkür ederim.

Ayrıca öğrenim hayatımın her aşamasında olduğu gibi bu tez çalışmasında da manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve tezimin gözden geçirilmesinde yardımcı olan nişanlım Sema AK' a teşekkürlerini sunarım.



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖZET.....	I
SUMMARY.....	III
TEŞEKKÜR.....	V
İÇİNDEKİLER.....	VI
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	VIII
TABLolar LİSTESİ.....	XI
1. GİRİŞ.....	1
2. GENEL BİLGİLER.....	10
2.1. Silindirik Kesitli Borularda Akış.....	10
2.1.1. Newtonian Akışkanların Akışı.....	10
2.1.2. Newtonian Olmayan Akışkanların Akışı.....	16
2.2. Silindirik Olmayan Borularda Akış.....	21
2.2.1. Newtonian Akışkanların Akışı.....	21
2.2.2. Newtonian Olmayan Akışkanların Akışı.....	26
3. TEORİK ANALİZ.....	29
3.1. Yağlanmış Bir Tüp İçerisinde Eksenel-Simetrik Akış.....	29
3.2. Bir Kapiler İçerisinde Sıvı Filminin Birikmesi.....	32
3.3. Gaz Yardımı ile Yerdeğiştirme Olayında Kütle Dengesi.....	38
4. MATERYAL ve METOD.....	48
4.1. Deney Düzenegi.....	48
4.2. Polimer Çözeltilerinin Hazırlanması.....	51
4.3. Çözeltilerin Viskozitelerinin Ölçülmesi.....	52
4.4. Çözeltilerin Yüzey Gerilim ve Yoğunluklarının Ölçülmesi.....	52
4.5. Verilerin Değerlendirilmesi.....	52
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA.....	54
5.1. Akışkanların Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi.....	54

5.2. Gaz Yardımı ile Yer Değiştirme Deneyleri.....	60
5.2.1. Hava-CMCNa Çöçzeltisi Sistemi.....	60
5.2.2. Hava-HECNa Çöçzeltisi Sistemi.....	68
6. SONUÇ.....	74
KAYNAKLAR.....	76
EKLER.....	80



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa No

Şekil-1.1. Gaz-sıvı birlikte akış olayında karşılaşılan bazı akış türleri.....	1
Şekil-1.2. Geleneksel enjeksiyon kalıplama ile gaz yardımcı enjeksiyon kalıplama proseslerinde akış sırasında basıncın değişimi.....	4
Şekil-1.3. Gaz yardımcı kalıplamanın ilk üç basamağı: (a) kısmen kalıp doldurma, (b) birincil gaz penetrasyonu, (c) ikincil gaz penetrasyonu.....	5
Şekil-2.1. Taylor tarafından yapılan deneylerden elde edilen veriler ile Fairbrother ve Stubbs' un verilerinin birlikte olduğu Ca sayısı- m sıvı fraksiyonu ilişkisi.	12
Şekil-2.2. Saydam bir boru içerisindeki viskoplastik akışkan ve gaz kabarcığının birlikte akışı.....	16
Şekil-2.3. Gaz önü ve sıvı önü için zamanla hareketteki değişim, (a) zamanla pozisyon, (b) zamanla hız değişimi.....	17
Şekil-3.1. Yağlanmış bir boru içerisinde laminar akış. Akışkan II, h kalınlığında yağlayıcıdır.....	29
Şekil-3.2. Taylor' un çalışmasına göre m sıvı fraksiyonunun Ca sayısı ile değişimi.....	32
Şekil-3.3. Gaz yardımıyla yer değiştirme olayında görülen akışın geometrik şekli.....	32
Şekil-3.4. Sıvı ile kısmen doldurulmuş sıvı içerisinde sıvının gaz yardımı ile yer değiştirmesi. (a) gaz enjeksiyonundan önce, (b) gaz enjeksiyonu esnasında.....	38
Şekil-4.1. Gaz yardımı ile yer değiştirme olayının gerçekleştirildiği deney düzeneği. (1) Kuru hava tankı, (2) Sirkülasyonlu su ceketi, (3) Dijital terazi, (4) U manometresi, (5), (6) vanalar, (7) Klips, (8) Platform.....	49
Şekil-4.2. Deney düzeneğine ait fotoğraflık görüntüler. (a) deney düzeneğinin önden görünüşü, (b) sirkülasyonlu su ceketi ve içerisinde takılı durumda bulunan cam boru.....	50
Şekil-5.1. %2.0' lık CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.....	54
Şekil-5.2. %2.5' lik CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.....	55

Şekil-5.3. %3.0' lık CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.....	56
Şekil-5.4. %3.5' lik CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.....	56
Şekil-5.5. %2.0' lık HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.....	57
Şekil-5.6. %2.5' lik HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.....	58
Şekil-5.7. %3.0' lık HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.....	58
Şekil-5.8. %3.5' lik HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.....	59
Şekil-5.9. %2.0 CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	60
Şekil-5.10. İçine CMCNa çözeltisi doldurulmuş cam boru içerisindeki gaz kabarcığının hareketi.....	62
Şekil-5.11. %2.5 CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	63
Şekil-5.12. %3.0 CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	63
Şekil-5.13. %3.5 CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	64
Şekil-5.14. 20 °C' de farklı konsantrasyonlardaki CMCNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	64
Şekil-5.15. 30 °C' de farklı konsantrasyonlardaki CMCNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	65
Şekil-5.16. 40 °C' de farklı konsantrasyonlardaki CMCNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	66
Şekil-5.17. 50 °C' de farklı konsantrasyonlardaki CMCNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	67
Şekil-5.18. 60 °C' de farklı konsantrasyonlardaki CMCNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	67

Şekil-5.19. %2.0 HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	68
Şekil-5.20. %2.5 HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	69
Şekil-5.21. %3.0 HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	70
Şekil-5.22. %3.5 HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	70
Şekil-5.23. 20 °C' de farklı konsantrasyonlardaki HECNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	71
Şekil-5.24. 30 °C' de farklı konsantrasyonlardaki HECNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	72
Şekil-5.25. 40 °C' de farklı konsantrasyonlardaki HECNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	72
Şekil-5.26. 50 °C' de farklı konsantrasyonlardaki HECNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	73
Şekil-5.27. 60 °C' de farklı konsantrasyonlardaki HECNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.....	73

TABLÖLAR LİSTESİ

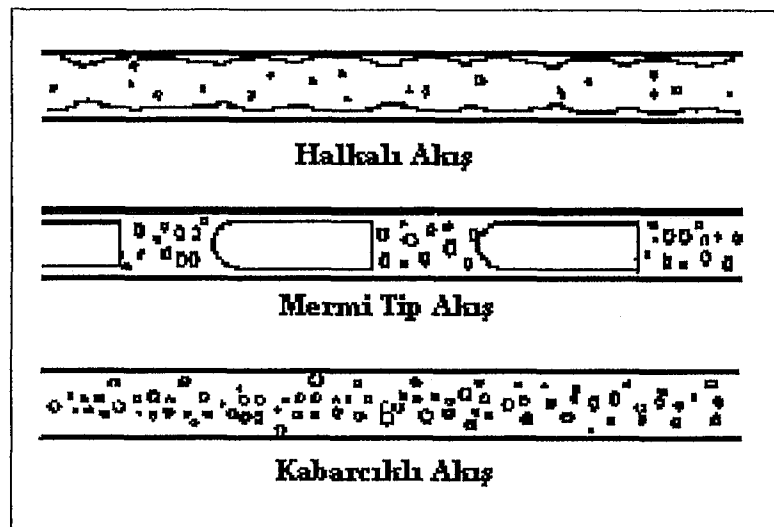
Sayfa No

Tablo-2.1. m fraksiyonu ile Ca sayısı arasındaki ilişkiler.....	28
Tablo-4.1. Hazırlanan CMCNa ve HECNa çözeltileri konsantrasyonları.....	51



1. GİRİŞ

Akışkanların durgun veya akış halindeki davranışları, akışkanlar mekaniği ve akışkanlar dinamiği problemlerinin temelini oluşturmaktadır. Fiziksel olarak gaz veya sıvı halde bulunabilen akışkanların, akışları tek fazda olabildiği gibi katı bir fazın katılımı ile iki veya üç fazlı olarak da gerçekleşebilmektedir. Bu akış türlerinden biri de iki fazlı gaz-sıvı akış olayıdır. İki fazlı gaz-sıvı akışı, kimyasal işletmelerde, güç ve enerji üretimi alanlarında olduğu gibi, normal yerçekimi şartlarında çeşitli durumlarda meydana gelir. Bu normal yerçekimi uygulamalarına ilave olarak bu tür akış olayları aktif termal kontrol sistemleri, güç çevrimleri, itici güç aygıtları ve kriyojenik akışkanların depolanması ve transferi gibi uzay işlemlerinde de meydana gelir. İki fazlı akışlar, birkaç farklı akış türleri içinde gruplandırılabilir. Bu akış türleri gaz ve sıvı fazın uzaysal ve zaman boyutunda dağılımını esas alır. Farklı yoğunluklara sahip olan fazlar üzerine etki eden yer çekimi kuvveti tabakalaşmalara neden olur. Bu kuvvetin büyüklüğüne ilave olarak, akışın yönündeki değişimler, gözlemlenen akış türleri ve bu akış türleri arasındaki geçiş sınırları üzerinde güçlü bir etkiye sahiptir. Gaz ve sıvının birlikte akışı, kullanılan akışkanların fizikokimyasal özelliklerine ve akışın türüne, laminar/türbülent akış, bağlı olarak çeşitli davranışlar göstermektedir. Deneysel çalışmalardan elde edilen veriler, çok düşük yerçekimi şartlarında iki fazlı akış türlerinin oldukça basitleşmiş olduğunu göstermektedir. Bu şartlarda gözlemlenen akış türleri Şekil-1.1' de görülmektedir.



Şekil-1.1: Gaz-sıvı birlikte akış olayında karşılaşılan bazı akış türleri.

Bu akış türlerinden halkalı akış, geniş bir gaz-sıvı akış aralığında elde edilebilir. Uzaydaki iki fazlı akış çalışmaları için halkalı akış tercih edilir. Mermi tip akıştan ise kaçınılır. Çünkü, mermi şeklindeki iri gaz kabarcıkları tarafından oluşturulan titreşimler istenmeyen ivmelenmelere neden olmaktadır. Kabarcıklı akıştan mermi tip akışa geçişi engelleme güçlüğünden dolayı çoğu kez kabarcıklı akıştan da kaçınılır. Bu nedenle, gaz-sıvı akışında mevcut çalışma şartları altında oluşacak akış türünü tahmin etmek önemlidir. Şöyle ki, halkalı akışta meydana gelen dalgalı sıvı filminin gaz ve sıvı arasındaki momentum ve ısı transferi üzerinde derin bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Bu nedenle de, dalgalı sıvı filminin davranış şeklini anlamak ve ortaya koymak, transfer hızlarını tahmin etmek gayesi ile kullanılacak korelasyonları geliştirmek için gereklidir, (ISSO Y2000).

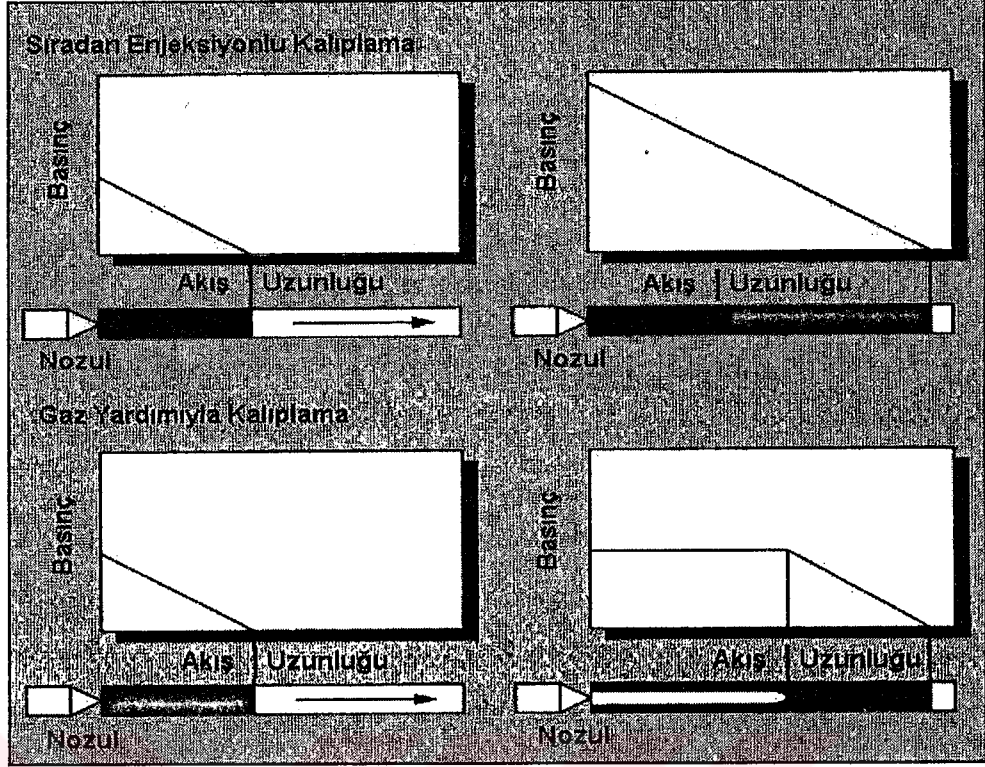
Kağıt üretiminde su ile doyurulmuş fiber bağlantıları içine havanın zorla girişi, kapiler ortamlar içerisinde emülsiyonların veya köpüklerin akışı ve petrol taşıyan tabakalardan hidrokarbonların yer değiştirmesi örneklerinde olduğu gibi küçük çaplı dairesel borularda veya dikdörtgen kesitli küçük boşluğa sahip kanallarda gaz kabarcıklarının sıvı ile birlikte akışı, gözenekli ortamlar içerisindeki iki fazlı akış ile alakalıdır. Yerkabuğu altındaki petrolün yeryüzüne çıkarılmasında kullanılan belli yöntemler de iki fazlı akışların ilk kullanım alanlarından biriydi. Bu yöntemde ham petrol kuyularına su veya buhar pompalanmakta ve su ile ham petrolün yer değiştirmesi sağlanmaktaydı.

Yatay haldeki silindirik borular ve dikdörtgen kesitli kanallar (Hele-Shaw hücresi) da bulunan Newtonian akışkanlar içinde uzun gaz kabarcıklarının hareketi çeşitli zamanlarda incelenmiştir. Birbirine yakın paralel plakalar arasındaki yarıktaki düşük viskoziteli akışkan kendisinden daha viskoz bir akışkanın yer değiştirmesine neden olduğu zaman, iki akışkan arasındaki ara yüzey daha viskoz akışkan içinde penatre olan düşük viskoziteli akışkan sayesinde dile benzer bir şekil alarak gelişir. Benzer şekilde, içinde viskoz bir akışkan bulunduran dairesel kesitli bir borunun bir ucundan içeri doğru hava gönderildiği zaman, hava arkasında m kadar sıvı fraksiyonunu bırakacak şekilde bir miktar sıvıyı tüpün diğer ucundan dışarı atarak hareket eder. Bu sırada hareket eden hava, etrafı çevrelenmiş bir kolon veya mermiye benzer bir görünüme sahiptir. Hava, arkasında bu m fraksiyonunu bırakırken boru veya kanal duvarını kaplayan bir iç tabaka oluşturur. Kare kanal olması durumunda, daha viskoz

akışkan içinde penatre olan az viskoz akışkanın şekli bu az viskoz akışkanın hızına bağlıdır. Bu akış olayı esnasında viskoz kuvvetler, yüzey kuvvetleri ve akışkan hızı arasındaki ilişki, Ca (Capillary) sayısı, $Ca = \mu u_b / \sigma$, ile ifade edilir. Burada μ , viskoz akışkanın viskozitesi, u_b , az viskoz akışkanın (bundan sonra kabarcık olarak adlandırılacak) akış hızı ve σ , gaz-sıvı arayüzey gerilmesidir.

Benzer iki fazlı akış olayı gaz yardımıyla enjeksiyon kalıplama prosesinde de görülür ve bu prosesin esasını gaz yardımıyla yer değiştirme problemi oluşturur. Erimiş polimer, sadece oyuklar oluşturmayan ayrıca gaz kanalları içerisinde homojen bir gaz basıncı ileten inert bir gaz yardımıyla yer değiştirilir, (Kamışlı, 1997). Gaz yardımıyla enjeksiyon kalıplama, oyuklu termoplastik parçaları üretmek için kullanılabilen geleneksel enjeksiyon kalıplamanın daha düşük basınçlı bir varyasyonudur. Kalıp içerisindeki erimiş plastiğin şekillenmesi basınçlı bir gaz tarafından gerçekleştirilir. Gaz, parça içinde etrafı kalın kısımlarla çevrili oyuklar oluştururken erimiş plastiği kalıbın diğer ucuna doğru iter, (GE bülteni, 1995). Bu olay sırasında erimiş plastiğin bir kısmı kalıptan dışarı atılırken, geri kalan kısmı kalıp duvarı üzerinde birikir. Biriken bu plastik tabakasının kalınlığı, gaz enjeksiyonunun yapıldığı noktaların konumu, enjekte edilen erimiş polimerin miktarı, enjekte edilen gazın basıncı, gaz enjeksiyonu için bekleme süresi vb. işletme parametrelerine bağlıdır.

Gaz yardımıyla enjeksiyon kalıplama prosesinde, şekillenme basamağı sırasında gerekli basınç gaz kabarcığı tarafından sağlanır. Geleneksel enjeksiyon kalıplamadaki gibi vida yardımıyla oluşturulmaz. Basınç gaz kabarcığı boyunca uniformdur ve kabarcık tüm oyuk boyunca baştan başa dağılır. Buda katılma sırasında oyukun yaklaşık olarak uniform bir basıncı koruduğu anlamına gelir. Geleneksel enjeksiyon kalıplamada, yüksek viskoziteli reçine içerisinde basınç uniform olarak dağılmadığından dolayı uniform olmayan gerilmeler meydana gelmektedir. Gaz yardımıyla enjeksiyon kalıplama prosesi ile geleneksel enjeksiyon kalıplama prosesi arasındaki basınç profili Şekil-1.2' de görülmektedir.

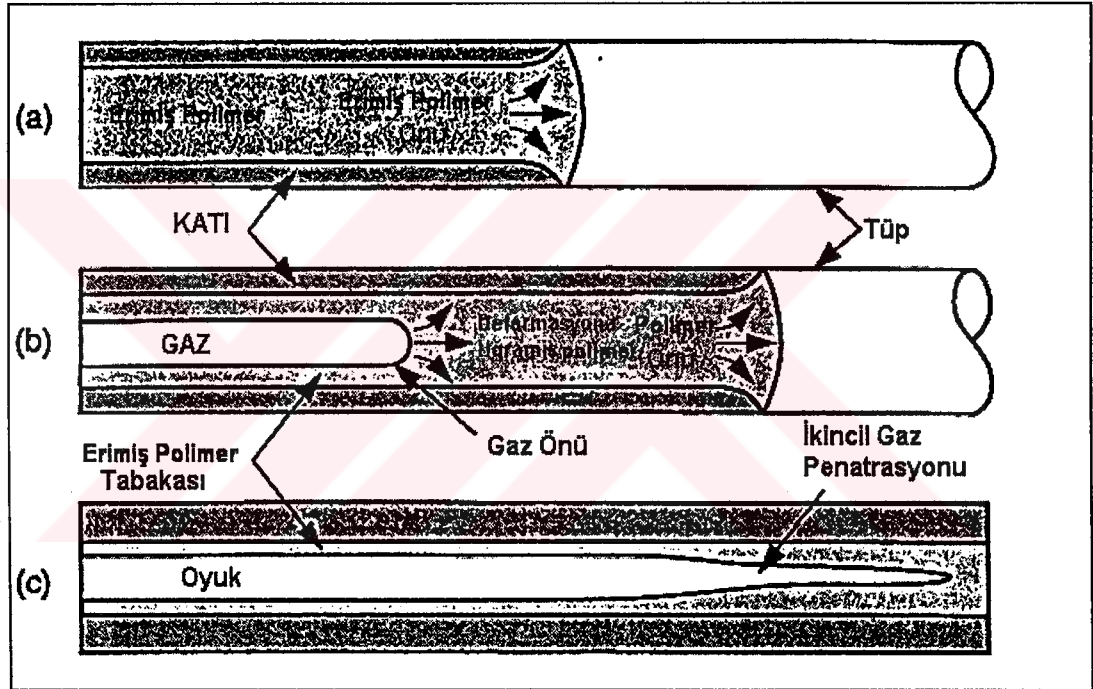


Şekil-1.2: Geleneksel enjeksiyon kalıplama ile gaz yardımcı enjeksiyon kalıplama proseslerinde akış sırasında basıncın değişimi.

Gaz yardımıyla enjeksiyon kalıplama oyuklu plastik parçaların üretiminde maliyet yönünden oldukça etkilidir. Bu proses geleneksel enjeksiyon kalıplama prosesinde karşılaşılan yüzeydeki eğrilikleri ve kötü görünüm arzeden izleri azaltması yönüyle de son zamanlarda oldukça ilgi uyandırmıştır. Ayrıca bunların yanında yüksek rijitlik, destek kuvvetinin azalması, daha düşük basınçlarda çalışılabilmesi, parça kütlelerinin azalması, çevrim süresinin kısalması, değişken duvar kalınlığına sahip ve daha kaliteli yüzeye sahip parçaların üretilebilmesi gibi avantajlara sahiptir.

Gaz yardımıyla enjeksiyon kalıplama olayı ardışık olarak gerçekleşen dört temel basamağa sahiptir. İlk basamak, içerisine gaz enjekte edilecek olan sıvının (gaz yardımıyla enjeksiyon kalıplamada erimiş plastik ham madde) kalıba (akış olayının gerçekleşeceği ortam) doldurulmasıdır. Bu basamakta kalıp % 75-98' lik bir doluluk oranına sahiptir. Bu oran üretilecek olan parçanın dizaynına bağlı olarak değişmektedir. Kalıp doldurma basamağından sonra, sıkıştırılmış gaz kalıp içerisindeki sıvının içerisine gönderilir. Bu ikinci basamak birincil gaz penetrasyonu olarak adlandırılır. Kalıp içerisindeki sıvıya gazın nereden enjekte edileceği, üretilecek parçanın dizaynına ve

geometrisine bağlıdır. Birincil gaz penetrasyonu esnasında kendisine bir oyuk oluşturan gaz kabarcığı, içerisinde bulunduğu sıvının veya plastiğin yüzeyindeki büzölmelerin sonucu olarak, burun kısmında ikinci bir penetrasyona neden olur. Buda ikincil gaz penetrasyonu olarak adlandırılır. Son basamak ise, gaz enjeksiyonunun durdurulması ve parçanın kalıptan çıkarılması basamağıdır. Eğer bu olay basit bir tüp içerisinde gaz-sıvı birlikte akışı ile gaz yardımıyla yer değıştirme olayı şeklinde gerçekleştirilecek ise gaz yardımıyla enjeksiyon kalıplamadaki ilk üç basamak burada da görülür. Şekil-1.3' de yukarda tanımlanan bu ilk üç basamak görölmektedir.



Şekil-1.3: Gaz yardımcı kalıplamanın ilk üç basamağı: (a) kısmen kalıp doldurma, (b) birincil gaz penetrasyonu, (c) ikincil gaz penetrasyonu.

İlk basamaktaki akış, (a), Poiseuille akıştır. İkinci basamaktaki gaz-sıvı birlikte akışı, (b), petrol kazanımı, otomobillerin katalitik konverterlerinin üretimi gibi birçok endüstriyel uygulamalarda yer almaktadır ve bu tez çalışmasının konusunu oluşturmaktadır. Küçük yarıçaplı dairesel kesitli borularda, farklı Newtonian olmayan akışkanların farklı sıcaklık ve basınç şartlarında hava yardımı ile yer değıştirmesi ve tüp duvarında biriken sıvı kalınlığı incelenmiştir. Ancak bu çalışmada, ilk basamaktaki sıvı

doldurma oranı % 100 olarak alınmıştır yani gaz-sıvı birlikte akışı kullanılan boru boyunca gerçekleşmektedir.

Birincil gaz penetrasyonu esnasında, gaz önündeki sıvıyı (polimeri) ileri doğru iterken dört farklı akış bölgesi oluşmaktadır. Bu akış bölgeleri Şekil-1.3 (b)' de görülmektedir. Gaz polimeri ileri doğru iterken, polimerin en uç noktasında sürekli ileri doğru hareket eden ve polimer önü diye adlandırılan bir akış bölgesi vardır. Bunun arkasında ise deformasyona uğrayan viskoz polimer bölgesi bulunmaktadır. Bu bölgenin arkasında ise hareketi ve şekillenmeyi sağlayan gaz kabarcığının önü bulunmaktadır. Bu kabarcığın ön kısmına bazen “kabarcık burnu” da denilmektedir. Son bölge ise gaz kabarcığı tarafından, polimer içerisinde oyuk açıldıktan sonra oluşan bu boşluğu çevreleyen ve bu boşluk ile boru duvarı arasında kalan durgun polimer tabakasıdır. Gaz yardımcı enjeksiyon kalıplamada elde edilecek olan parçanın kalınlığının toplam parça boyutuna oranı birden küçük olacağından dolayı, deformasyona uğrayan yığın, parça kalınlığı yönündeki kayma gerilmesi değişimi ile akış yönündeki basınç gradyenti dengelenerek tanımlanabilir. Daha doğru bir analiz ortaya koymak için, polimer önü ile gaz önü yakınlarındaki ikincil akışların etkisi de incelenmelidir, (Kamışlı, 1997). Gaz önü bölgesi, gaz yardımıyla yer değiştirme prosesinde büyük bir öneme sahiptir. Çünkü kalıp içerisindeki sıvının alacağı şekil veya oluşan sıvı tabakasının kalınlığı, gaz önü bölgesinin hareketine bağlı olarak etkili bir şekilde değişmektedir. Gaz kabarcığı sıvı içerisinde hareket ederken sıvı içerisinde çeşitli yönlerde sapabilmektedir. Ayrıca, bazen de tek bir kabarcık halinde değil de, bir elin parmakları gibi birkaç koldan sıvı içerisinde yol alabilmektedir. Bu durum literatürde “parmak etkisi” diye adlandırılmaktadır. Karşılaşılan çeşitli akış davranışları, bazı araştırmacılar tarafından dikdörtgen kesitli kanallarda incelenmiştir. Taylor ve Saffman (1958) ve Tabeling vd. (1987) tarafından yapılan çalışmalarda, gaz kabarcığının hızının artışına bağlı olarak gaz önünün kararlılığının bozulduğu ve sıvı içerisinde yukarıda zikrettiğimiz parmak şeklinde akışın olduğu gözlemlenmiştir. Bir başka ifade ile sıvı içerisine gönderilen gazın basıncına bağlı olarak farklı akış türleri oluşmaktadır. Bu akış türlerinin oluşumu ve sonuçları sadece gaz kabarcığının hızına bağlı değildir. Koelling ve Kaminski (1996) tarafından çeşitli polimerik malzemeler kullanılarak yapılan çalışmada gaz yardımıyla enjeksiyon kalıplamada akış yolu boyunca oluşan duvar (gazın arkasında kalan sıvı tabakası) kalınlığının, kalış süresi ve malzeme

reolojisi ile alakalı olduğu ifade edilmiştir. Kullanılan sıvının elastisitesine bağlı olarak sıvı tabakası kalınlığının değişimi Huzyag ve Koelling (1997) tarafından incelenmiştir. Bu araştırmacılar tarafından yapılan çalışmada, viskoelastik akışkanlar içerisinde gaz kabarcığının penetrasyonu incelenmiş ve akışkanın elastisitesindeki artışın sıvı tabakası kalınlığında artmaya neden olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca sıvının içinde bulunduğu tüpün boyutu da oluşacak sıvı tabakasının kalınlığını etkilemektedir. Dairesel kesitli bir boruda gerçekleşen akışlarda, artan boru çapı ile sıvı tabakasının arttığı gözlemlenmiştir (Kamışlı, 1997).

Geleneksel enjeksiyon kalıplama prosesini modellemek üzere çeşitli sayısal yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar, gaz yardımıyla enjeksiyon kalıplama prosesinin ilk adımına uygulanabilir. Polimer önü bölgesini modellemek için sayısal yöntemler geliştirilmiş iken, gaz önü bölgesi için yeni yaklaşımlara ihtiyaç vardır. Toplam akış bölgesine kıyasla çok daha küçük olmasına rağmen, gaz penetrasyonunun ve gaz yardımıyla şekillendirilen parçalarda oyuk göbeği etrafındaki duvar kalınlığının gelişimini gaz önü bölgesi belirler. Bu iki niceliğin doğru bir şekilde tahmin edilmesi elde edilecek ürünün yapısal performansını değerlendirmek için gereklidir. Turng ve Wang, (1991) ve Lanvers ve Michaeli, (1992) ilerleyen gaz önünün arkasında kalan durgun sıvı tabakasının kalınlığını belirlemek için sadece ısı transferi yaklaşımını kullanan çeşitli çeşitli çalışmalar yapmışlardır. Poslinski vd. (1995) tarafından incelenen izotermal gaz yardımıyla yer değiştirme problemi için, izotermal basit bir model geliştirilmiş ve bu model tek boyutlu ısı transferi ile birleştirilerek sıvı içerisinde gazın penetrasyonu incelenmiştir. Bu matematiksel yaklaşımların yanı sıra temel taşınım eşitliklerini ve proses şartlarını esas alacak şekilde gaz yardımıyla yer değiştirme problemini simüle edecek bilgisayar yazılımları da geliştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında gaz yardımı ile yer değiştirme problemi farklı sıcaklıklarda ve farklı gaz basıncı çalışma şartlarında farklı konsantrasyonlarda Newtonian olmayan sıvılar için incelenmiştir. Deneysel çalışmalar, iç çapı 0.53 cm ve uzunluğu 55 cm olan saydam cam borular kullanılarak gerçekleştirildi. Bu cam borular içerisine doldurulan hazır polimer çözeltileri içerisine gaz olarak kuru hava enjekte edilerek, bu çözelti içerisinde gaz kabarcığının akışı gözlemlendi ve enjeksiyon sonunda cam borunun iç duvarında biriken sıvı tabakası kalınlığı tayin edildi. Kullanılan çözeltiler, hazır polimer tuzlarından hazırlandı. Bu polimer tuzları Fluka marka olup ince toz halinde CMCNa

(karboksimetilseluloz sodyum) ve HECNa (hidroksietilseluloz sodyum) tuzlarıdır. Bu kimyasalların teknik özellikleri dikkate alınarak, kütlece % 2.0, 2.5, 3.0, 3.5' luk sulu CMCNa ve HECNa çözeltileri hazırlandı. Deneyleri gerçekleştirmek için izotermal bir çalışma ortamı sağlayacak nitelikte bir deney düzeneği kuruldu. Kullanılan cam boruların 52.5 cm' lik kısmına % 100 doluluk oranı ile çözelti dolduruldu. Gaz enjeksiyonu sırasında gazın sıvı içerisinde belli noktalardan geçiş süresini tayin etmek için cam boru sıvının başlangıç noktasından itibaren 5 cm' lik dilimler halinde işaretlendi. Deneylerde kullanılan hava, izotermal şartlardaki sıvı içerisine 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 psi gösterge basınçlarında ani olarak gönderildi ve gaz, sıvı içerisinde hareket ederken $t=0$ anında gaz enjeksiyonun başladığı andan itibaren her 5 cm' lik dilim geçildiği anda geçen süre kaydedildi. Ayrıca gaz enjeksiyonu sırasında, gazın akış hızını daha kontrollü kılabilmek için daha önceden yapılan kontrol deneylerinden elde edilen veriler dikkate alınarak, sıvının cam borudan dışarı atıldığı uc noktaya akış yolunu daraltacak şekilde vana gibi görev yapacak bir toka yerleştirildi. Bu vananın açıklık oranı, deneme yanılma yoluyla ayarlandı tüm deneylerde sabit tutuldu.

Deneylerden elde edilen, geçiş süresi ve dışarı atılan çözelti kütleleri ölçülerek ortalama gaz hızları, Ca sayıları ve cam borunun iç duvarında kalan sıvı filmi fraksiyonları, m , hesaplandı. Ca sayısının hesabında gerekli olan viskozite ölçümleri Brookfield RDV-II+ model viskozimetre ile ölçüldü. Her bir deney şartlarında Ca sayına karşılık m sıvı fraksiyonunun değişimi incelendi.

Bu tez çalışması, içerik olarak aşağıdaki kısımlardan oluşmaktadır;

1. Giriş: genel olarak gaz yardımı ile yer değiştirme probleminin ve yapılan deneysel çalışmanın tanımı,
2. Genel bilgiler: gaz yardımıyla yer değiştirme problemi ve pratikte uygulama bulunduğu alanlarda, daha önceden çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan deneysel ve teorik çalışmalar ve bu çalışmalardan elde edilen sonuçların sıralı bir şekilde aktarılması,
3. Teorik analiz: gaz yardımıyla yer değiştirme problemini matematiksel olarak tanımlayan kabuller ve bu kabulleri dikkate alarak geliştirilen eşitlikler ile bu tez çalışması için hesaplamalarda kullanılan eşitliklerin irdelenmesi,

4. Deneysel çalışma ve sonuçlar: bu tez çalışmasının konusunu oluşturan gaz yardımıyla yer değiştirme olayını incelemek üzere yapılan deneysel çalışma yöntemin irdelenmesi ve bu çalışmadan elde edilen sonuçların aktarılması.
5. Tartışma: elde edilen verilerden çıkarılacak sonuçların tartışılıp yorumlanması.



2. GENEL BİLGİLER

Bu bölümde gaz yardımı ile yer değiştirme problemi üzerine daha önceden yapılmış çalışmalar hakkında bilgi verilecektir.

2.1. Silindirik Kesitli Borularda Akış

2.1.1. Newtonian Akışkanların Akışı

Gaz yardımıyla yer değiştirme problemine yönelik ilk inceleme, Fairbrother ve Stubbs (1935) tarafından dairesel kesitli uzunca bir boru içerisindeki Newtonian davranış sergileyen viskoz bir akışkanın akışı üzerine yapılmıştır. Bu çalışmada, bu viskoz akışkan kendisinden daha az viskoz bir akışkan tarafından yer değiştirildiği (akış yönü doğrultusunda ileri doğru itildiği) zaman, borunun iç cidarı üzerinde biriken sıvı filminin kalınlığı belirlenmeye çalışılmıştır. Bu şahıslar boru içerisinde hareket eden sıvının ortalama hızını ve bu sıvıyı ileri doğru iten gaz kabarcığının hızını ölçerek boru duvarında biriken sıvı fraksiyonunu, m , belirlemişlerdir. Yapılan deneylerden, boru duvarında bir miktar sıvı biriktiğinden dolayı gaz kabarcığı önündeki sıvının gaz kabarcığına göre daha yavaş hareket ettiğini gözlemlemişlerdir. Bu akış olayı sırasında gaz kabarcığının hızı ve sıvının fiziksel özelliklerine bağlı olarak sıvı fraksiyonunun değiştiği dikkate alınarak, Ca sayısı ile m sıvı fraksiyonu arasında deneysel bir ilişki kurulmuştur ve bu ilişki aşağıdaki gibidir.

$$m = \frac{U_b - U}{U_b} = 1 - \frac{U}{U_b} = 1.0 \sqrt{Ca} = 1.0 \sqrt{\frac{\mu U_b}{\sigma}} \quad (2.1)$$

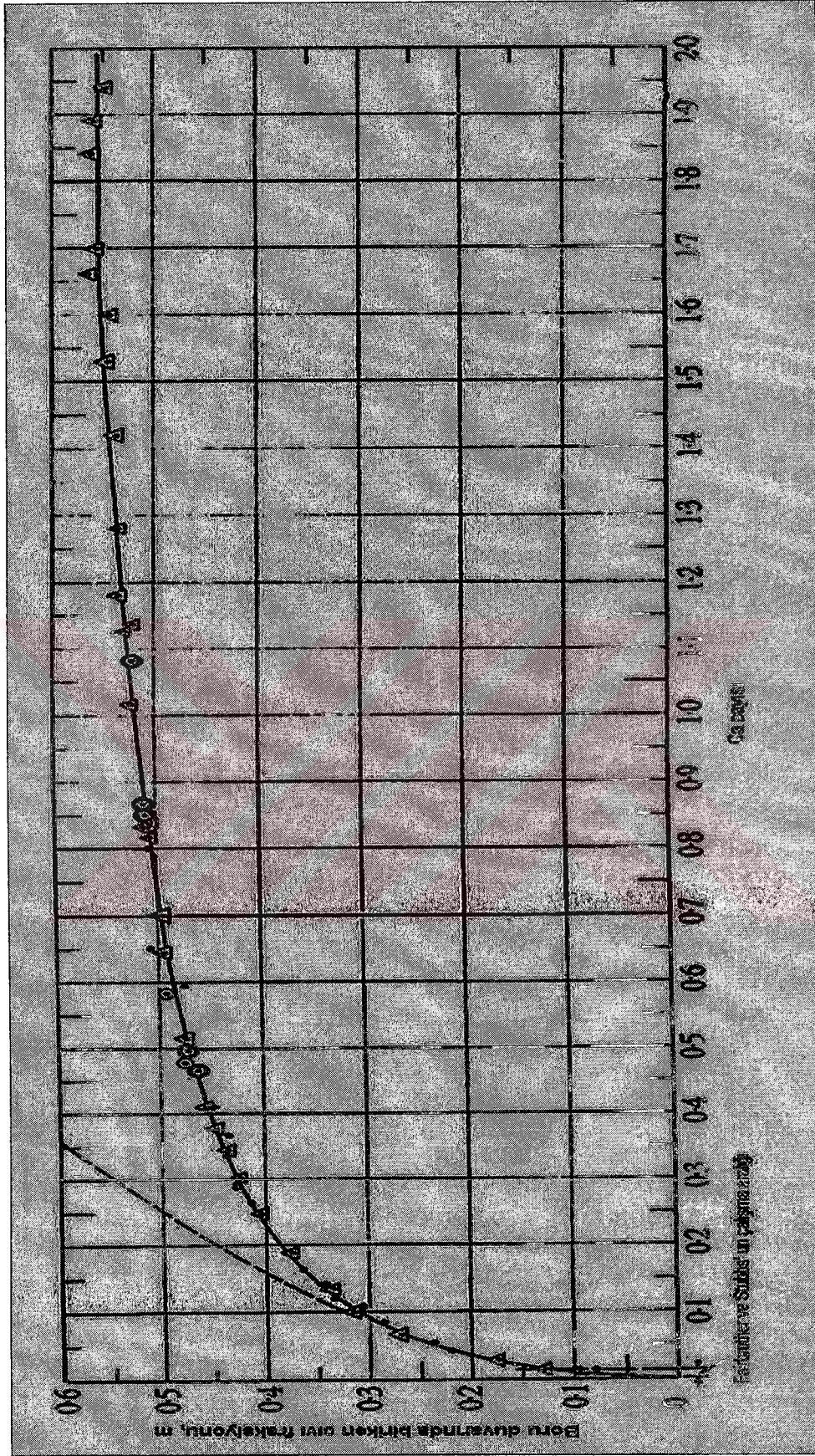
Burada m , boru duvarı üzerinde biriken sıvı fraksiyonuna karşılık gelmektedir. U_b , gaz kabarcığı hızı, U , sıvı fazın ortalama hızı, μ , sıvının viskozitesi, σ ise sıvı ile gaz fazı arasında oluşan ara yüzeydeki gerilmedir. Ca ise Capillary sayısını ifade etmektedir. m fraksiyonu, sıvı tarafından doldurulan boru kesit alanının, toplam boru kesit alanına oranı olarak ifade edilmektedir. (2.1) eşitliğindeki hız oranları, sabit yoğunlukta oldukları kabulü ile sıvının ve gaz kabarcıklarının hareketleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Fairbrother ve Stubbs tarafından yapılan bu çalışmadan elde edilen

veriler $10^{-3} - 10^{-2}$ Ca sayıları aralığında geçerlidir. Fairbrother ve Stubbs' in deneylerinden varılan en yüksek Ca değeri 0.014' dür ve (2.1) eşitliği için uygun bir sınır değeridir.

Dairesel kesitli bir boruda Newtonian bir akışkanın gaz yardımı ile yer değiştirmesi problemi, daha sonra Fairbrother ve Stubbs' in deneylerinde kullanılan sıvılardan daha viskoz sıvılar kullanılarak incelenmiştir (Taylor, 1961). Taylor tarafından yapılan deneylerde varılan en yüksek Ca sayı değeri 2' dir. Bu da m fraksiyonu 0.55' e vardığı zaman Fairbrother ve Stubbs' in Ca sayısı değerinden yaklaşık 135 kat daha büyüktür. Taylor, Ca sayısının fonksiyonu olarak boru duvarında biriken sıvı fraksiyonunun değişimini grafiksel olarak göstermiştir ve asimptotik olarak değişen tekli bir eğri elde etmiştir. Yaklaşık $Ca=2$ civarında, m fraksiyonu 0.56 değerine sahiptir. Taylor' un deneylerinin sonuçlarını gösteren bu grafik Şekil-2.1' de görülmektedir. Bu grafik aynı zamanda Fairbrother ve Stubbs' in deneylerine ait çalışma aralığını da göstermektedir. $Ca=0.09$ değeri aşıldığı zaman Fairbrother ve Stubbs tarafından önerilen (2.1) eşitliğinin, Taylor'ın deneysel verileri ile uyuşmadığı ve deneysel verilerin daha düşük m fraksiyonuna karşılık geldiği görülmektedir. Ancak incelenen Ca sayısı aralığı için Taylor' ın çalışması Fairbrother ve Stubbs' in verileri ile uygunluk göstermektedir. Viskoziteden kaynaklanan gerilmeler, yüzey geriliminden kaynaklanan gerilmelerden daha büyük olduğu zaman, bu eğrinin trendi m fraksiyonunun 0.56' nın üzerinde bir limit değere vardığını göstermektedir.

Ayrıca Taylor (aynı eser), akış olayı sırasında muhtemel akım hatlarının durumunu da tartışmıştır. $m>0.5$ olduğu durumda boru içerisindeki sıvının tamamının kabarcık burnunu (menisküsünü) ileri doğru hareket ettirdiğini belirtmiştir. $m<0.5$ şartlarında ise boru ekseninden radyal yönde olan uzaklığa bağlı olarak değişecek şekilde, kabarcık önü ile sıvı önü arasında kalan bir miktar sıvının, kabarcık ile aynı yönde hareket ettiğini, sıvının geri kalan kısmının ise kabarcığın hareket yönüne zıt yönde hareket ettiğini ifade etmiştir. Ayrıca $m<0.5$ durumunda, sıvı fraksiyonunun değerine bağlı olarak gaz önü bölgesinde küçük edilerin de olabileceğini belirtmiştir.

Dairesel kesitli boru içerisinde biriken sıvı filminin kalınlığını belirlemek üzere, Bretherton (1961)' da deneysel ve teorik içerikli bir çalışma yapmıştır. Bretherton, teorik analizinde sıvı ve kabarcık hareketini lübrikasyon yaklaşımı ile açıklamaya çalışmıştır. Lübrikasyon yaklaşımını uygulayabilmek için, sıvı ve kabarcığın yeterli



Şekil-2.1: Taylor tarafından yapılan deneylerden elde edilen veriler ile Fairbrother ve Stubbs' un verilerinin birlikte olduğu Ca sayısı- m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

derecede küçük hızlarda hareket ettiğini, yer çekiminin ihmal edilebilir olduğunu ve boru duvarı üzerinde biriken sıvı film kalınlığının daire çevresi yönünde düz bir yüzeye sahip olacağını kabul etmiştir. Akış olayının ve akış profilinin belirlenmesinde lübrikasyon yaklaşımı iyi sonuçlar vermektedir. Lübrikasyon yaklaşımı, akışkan-akışkan ara yüzey eğiminin küçük olmasını gerektirdiğinden dolayı elde edilecek olan hız profili parabolik bir eğri şeklindedir. Bu nedenle de, sıvı içindeki basınç, Young-Laplace denklemi ile ifade edilen ara yüzey profilinin kavisliği ile dengelenir. Bretherton, süreklilik denklemini ve kabul ettiği sınır şartlarını dikkate alarak, boru duvarı ile ara yüzey arasındaki uzaklığı ortaya koyacak üçüncü dereceden bir diferansiyel denklem elde etmiştir ve uygun basitleştirmelerle bu diferansiyel denklemi ara yüzey boyunca her bir bölge için çözmüştür. Bretherton, geliştirdiği teorik yaklaşım ve yaptığı deneyleri bir araya getirerek m sıvı fraksiyonu için aşağıdaki eşitlikleri elde etmiştir.

$$m = 1.29 (3 Ca)^{2/3} = 1.29 \left(3 \frac{\mu U_b}{\sigma} \right)^{2/3} \quad Ca \rightarrow 0 \quad (2.2)$$

$$P = 3.58 (3 Ca)^{2/3} \frac{\sigma}{y} \quad Ca \rightarrow 0 \quad (2.3)$$

(2.2) eşitliği, $Ca < 0.003$ olduğu şartlarda % 5 hata ile doğru sonuçlar vermektedir.

Marchessault ve Mason (1960), sulu seyreltik potasyum klorür çözeltisi içinde hava kabarcığını kullanarak yaptıkları deneylere göre aşağıdaki eşitliği önermişlerdir.

$$m = \left(\frac{\mu}{\sigma} \right)^{1/2} \left\{ -0.1 + \frac{1.78}{U_b} \right\} \quad (2.4)$$

Bu korelasyon $7.10^{-6} < Ca < 2.10^{-4}$ aralığında sağlıklı sonuçlar vermektedir. Bu çalışmada sıvı filmi kalınlığı direnç ölçüm yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar Bretherton' un sonuçlarına kıyasla daha büyük değerlere sahiptir.

Cox (1962), Taylor' un deneysel sonuçlarını $Ca=10$ ' a kadar genişleterek boru duvarı üzerinde biriken sıvı fraksiyonu değerini yaklaşık 0.6 olarak belirlemiştir. Cox , hareket denklemlerindeki basınç terimi elemine ederek dördüncü mertebeden bir diferansiyel denklem ve akım fonksiyonlarını formüle etmek üzere kullanılacak teorik bir analiz ortaya koymuştur. Bu analizde Bretherton (1961)' un yaklaşımındakine

benzer şekilde eylemsizlik ve yerçekimi terimleri ihmal edilmiş ve hiçbir kayma şartı uygulanmamıştır. Bu yapılırken de, teori ile deneysel çalışmayı destekleyecek şekilde bir yaklaşım uygulanmıştır. Elde edilen çözümde ancak belli sınırlamalar altında geçerlidir. Cox' ın deneysel ve teorik yaklaşımında kullandığı viskoz akışkanın viskozitesinin, az viskoz akışkanınkine oranı, 1-40.000 aralığında olup oldukça geniştir.

Yatay borular içerisinde akışkan akışı sırasında gelişen akım fonksiyonlarını belirlemek üzere Cox (1964) tarafından bir deneysel çalışma gerçekleştirilmiştir. Cox, sıvı içerisine ilave ettiği çok ince toz haldeki alüminyum izleyici parçaları fotoğrafik metod kullanarak takip etmiştir. $m > 1/2$ olması durumunda, Poisuille akış kabulüne göre, boru eksenine boyunca sıvı akışkanın kabarcığa doğru hareket ettiğini gözlemlemiştir ve borunun göbeğindeki tekli akım hatları kabarcıktan uzak noktalardaki bölgede düzgün bir formda iken kabarcık yüzeyine yakın noktalarda ara yüzeyin şeklini almaya başlamıştır. Kabarcık burnunun arka bölgelerinde ise uniform akışa tekrar dönmüştür. $m = 1/2$ durumunda, akışkanın merkezindeki akım hatlarının durgun olduğu boru merkezinden cidara doğru yaklaşıldıkça $m > 1/2$ durumundaki akım hatlarının geçerli olduğu görülmüştür. $m < 1/2$ durumunda ise, boru duvarına yakın bölgelerde gaz kabarcığına doğru yönelen akım hatları kabarcık burnu yakınlarında yön değiştirerek kabarcıkla aynı yönde hareket eden akım hatları görülmüştür. Bu durum Taylor (1961) tarafından açıklanmaya çalışılan muhtemel akım hatları ile benzerlik göstermektedir.

Goldsmith ve Mason (1962), dairesel kesitli kapalı, dik borularda yerçekimi şartlarında tekli uzun gaz kabarcıklarının hareketini incelemek üzere deneysel ve teorik bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada her iki faz içerisindeki akışın yapısı, kabarcığın şekli ve boru duvarında biriken sıvı film kalınlığı mikroskop altında doğrudan gözlem yoluyla belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan çalışma ile teorik yaklaşım arasında uygunluk bulunmuştur.

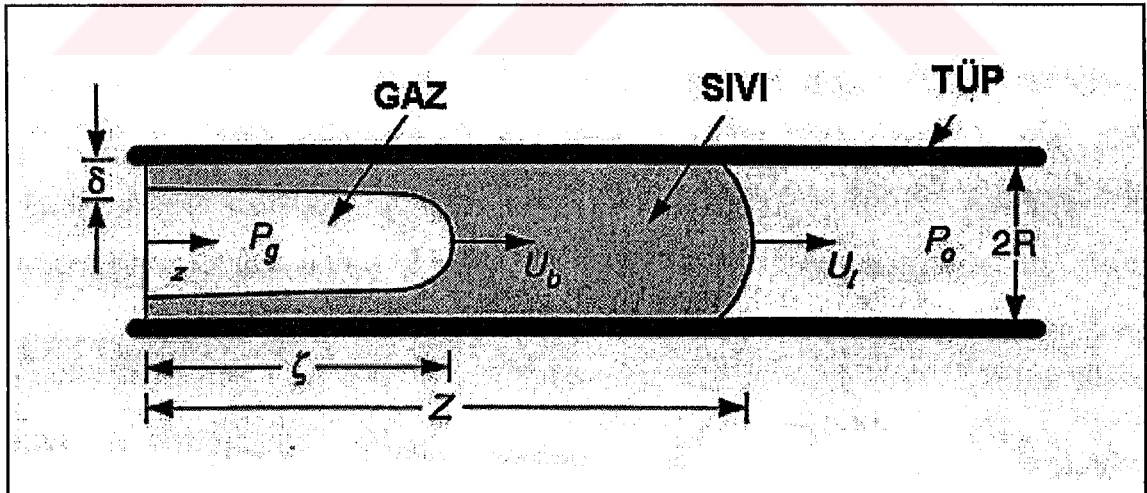
Schvartz ve ark.. (1986), uzun gaz kabarcıkları için ve kısa kabarcıklar için Bretherton (1961)' ın yaklaşımını tekrar gözden geçirmişlerdir ve boru duvarında biriken sıvı fraksiyonu için bazı farklılıklar bulmuşlardır. Bretherton' un asimptotik sonuçlarının tahminlerin altında bir film kalınlığı ortaya koyduğunu, en düşük hızlarda farkın daha büyük olduğunu ifade etmişlerdir. Diğer taraftan 20 boru yarıçapından daha küçük uzunluktaki kabarcıklar için Bretherton' ın teorisi ile iyi bir uyumun olduğu da ifade edilmiştir.

Shen ve Udell (1985) tarafından yapılan bir çalışmada, silindirik bir boru içerisindeki viskoz bir akışkan içine gönderilen gaz kabarcığının, düşük Reynolds sayılarında kararlı haldeki akışı sonlu elemanlar metodu kullanılarak incelenmiştir. Kabarcık-sıvı ara yüzeyinin pozisyonunu belirlemek için, viskoz kuvvetlerinin basınç kuvvetleri tarafından dengelendiği düşünülerek yaklaşılmıştır. $5 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$ Ca sayıları aralığında momentum ve süreklilik denklemlerinin sonlu farklar metodu ile çözümleri gerçekleştirilmiştir ve elde edilen nümerik sonuçlar yayınlanmış teorik ve deneysel çalışmalarla kıyaslanmıştır. Elde edilen verilerin serbest yüzey problemi için makul sonuçlar olduğu ve kabarcık önü karşısındaki basınç düşüşünün artan Ca sayısı ile arttığı ifade edilmiştir.



2.1.2. Newtonian Olmayan Akışkanların Akışı

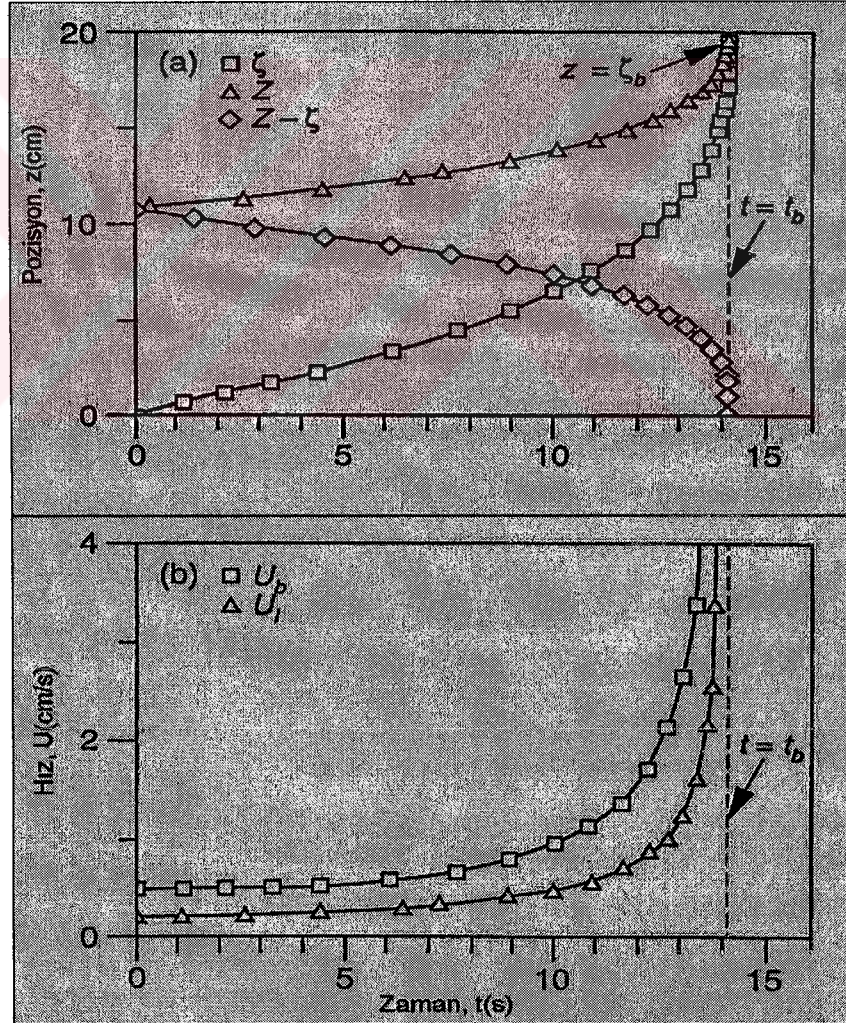
Newtonian akışkanların gaz yardımı ile yer değiştirmesi problemi hakkında bir çok teorik ve deneysel çalışma olmasına rağmen Newtonian olmayan akışkanların dairesel kesitli borularda gaz yardımı ile yer değiştirmesi problemi pek incelenmemiştir. Bu konuda general elektrik (GE) bünyesinde, dairesel kesitli bir boru duvarında Newtonian olmayan sıvıların birikmesi problemi izotermal şartlarda hem deneysel hem de teorik olarak incelenmiştir, (Poslinski vd., 1995). Bu şahıslar çalışmalarında, gaz ve sıvının birlikte akışları sırasında sergiledikleri davranışları ortaya koymak için yaptıkları gözlemlere dayanarak olayı matematiksel olarak ifade eden basit bir model geliştirmişlerdir. Poslinski vd. bu çalışmada viskoz akışkan olarak Newtonian olmayan özellik sergileyen viskoplastik akışkanlar kullanmışlardır. Buna karşın, ortaya koydukları modelde bu viskoplastik akışkanların Newtonian akışkan olarak davrandıklarını kabul etmişlerdir. Çalışmada, boru içerisine kısmen doldurulan viskoplastik akışkan içerisine gaz enjekte edilmiştir. Bu durumda gaz kabarcığının ve sıvının boru içerisindeki durumları Şekil-2.2' görülmektedir. Hareket ettirilen toplam sıvı hacmi $\pi R^2 Z_0$ olup burada, R tüpün yarıçapı, Z_0 ise gaz penetrasyonundan önce



Şekil-2.2: Saydam bir boru içerisindeki viskoplastik akışkan ve gaz kabarcığının birlikte akışı.

sıvının ortalama aksenal uzunluğudur. $t=0$ anında, $z=0$ noktasında basınçlı gaz enjekte edilir ve borunun sonuna doğru doldurulur. Yer değiştirme prosesi esnasında, gaz basıncı P_g , ortam basıncı P_0 dan daha büyük olacak şekilde sabit bir değerde tutulur. Uygulamada, P_g de zamanın bir fonksiyonu olarak kullanılabilir.

Kabarcık boyunca gaz yolunu oluşturmak ve boru içindeki sıvıyı ileri taşımak, gerekli bir $\Delta P_g = P_g - P_0$ basınç farkı ile olur. Herhangi bir t anında z , ξ , U_l ve U_b terimleri sırasıyla sıvı önünün ve kabarcığın ortalama pozisyon ve ortalama hız verileridir. Poslinski vd. tarafından yapılan çalışmaya göre bu verilerin zamanla değişimi Şekil-2.3' de görülmektedir. Şekil-2.3(a)' ya göre, zamanla sıvı önü ve gaz önü boru ekseni boyunca ilerlerken gaz önü ile sıvı önü arasındaki uzaklık, $z - \xi$, sürekli olarak azalır. Gaz ve sıvı hızları ise zamanla artmaktadır, Şekil-2.3(b).



Şekil-2.3: Gaz önü ve sıvı önü için zamanla hareketteki değişim, (a) zamanla pozisyon, (b) zamanla hız değişimi.

Kabarcık sıvı içerisinde penatre olurken, boru duvarında δ kalınlıklı bir sıvı tabakası oluşur. $Z=0$ dan $z=\xi$ ye kadar bu tabaka tarafından oluşturulan boru hacminin ϕ fraksiyonu aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

$$\phi = 1 - \frac{1}{\xi} \int_0^{\xi} (1 - \varepsilon)^2 dz \quad (2.5)$$

Burada, $\varepsilon = \delta/R$ kalınlık oranı olup genelde eksenel uzunluğun bir fonksiyonudur. $\delta=0$ sınır değerinde gaz sıvıyı tamamen taşımış olacaktır. Bu durum sadece boru duvarı boyunca ideal bir kayma olduğu zaman mümkündür. $\delta > 0$ için, $t = t_b$ ve $z = \xi_b$ anında gazın patlaması (yani patlayarak sıvının önüne geçmesi) meydana gelir. Patlama oranı, ξ_b/Z_0 , sıvının eksenel başlangıç pozisyonuna bağlı olarak sıvı önü tarafından taşınan uzaklığı karakterize etmektedir.

Poslinski vd., düşük Ca sayıları aralığında boru duvarı üzerinde biriken sıvı fraksiyonunun asimptotik olarak 0.58 değerine yaklaştığını ve bu fraksiyon değerinin gazın penetrasyon hızına ve sıvı akışkanın viskoz davranışına bağlı olduğunu ifade etmişlerdir.

Huzyak ve Koelling (1997), yatay bir boru içindeki viskoelastik akışkan içerisinde uzun gaz kabarcığının penetrasyonunu incelemişlerdir. Bu çalışmada, gaz viskoelastik akışkan içerisinde penatre olurken ileri doğru itilen ve borunun dışına atılan sıvı kütlesi ölçülerek (2.6) eşitliğine göre boru duvarında biriken sıvı fraksiyonu farklı Ca sayıları için hesaplanmıştır.

$$m = 1 - \frac{w}{\pi R_o^2 L \rho_f} \quad (2.6)$$

Burada, m ; boru duvarında biriken sıvı fraksiyonu, w ; boru dışına atılan sıvı kütlesi, R_o ; boru iç yarıçapı, L ; boru uzunluğu ve ρ_f ; viskoelastik akışkanın yoğunluğuna karşılık gelmektedir. 0.1 – 1.5 cm/s aralığındaki gaz hızlarında çalışılmış ve çalışma şartlarındaki hız değerinin boru uzunluğu boyunca sabit olduğu kabul edilmiştir. 0.3 – 9 Ca sayıları aralığında, Newtonian ve Newtonian olmayan Boger akışkanı ve kayma zayıflaması olan akışkanlarla yapılan çalışmada, küçük Ca sayıları bölgesinde her üç akışkanın da benzer davranışlar sergilediği fakat yüksek Ca sayılarında oldukça farklılıklar olduğu belirlenmiştir. Düşük Ca sayılarındaki davranışın, bütün akışkanlar

için düşük kayma ve gerilme hızlarında akışkanların Newtonian akışkanmış gibi davranmalarına bağlanmıştır. Buna karşın, Ca sayısındaki artış ile kayma ve gerilme hızlarındaki artışa bağlı olarak Newtonian olmayan akışkan davranışının daha etkin bir şekilde görüldüğü ifade edilmiştir. Yüksek Ca sayılarında Boger akışkanı Newtonian akışkana göre daha yüksek bir m fraksiyonu değerine ulaşmıştır. Bu da Boger akışkanın sahip olduğu elastikiyet yeteneğinden kaynaklanmıştır. Zira bu tür akışkanlarda, akışkan partikülleri gaz tarafından ileri doğru itilmeye karşı bir direnç gösterip, kabarcık ile cidar arasında bulunan akışkan partikülleri gaz tarafından ileri itilen akışkan partiküllerini geri çekerek cidar üzerinde birikmeye zorlamaktadır. Kayma azalması olan akışkan Boger akışkana göre daha fazla bir elastikiyete sahip olmasına rağmen, Boger akışkandan daha düşük bir m fraksiyonu oluşturmuştur. Beklenenin aksi olan bu davranış akışkanın kayma azalması karakterine bağlanmaktadır. Bu durum, akışkan reolojisinin m sıvı fraksiyonu üzerinde oldukça etkili olduğunu göstermektedir.

Kamışlı (1999) tarafından yapılan çalışmada, Newtonian akışkan olarak mısır şurubu, Newtonian olmayan akışkan olarak CMC ve HEC polimer çözeltileri kullanılarak yapılan çalışmada, dairesel borular ve dikdörtgen kesitli kanallarda bu akışkanlar içerisinde uzun gaz kabarcıklarının akışı ve boru duvarı üzerinde biriken sıvı fraksiyonu incelenmiş ve bu akış olaylarına ait problem tekil perturbation metodu kullanılarak çözümlenmiştir. Bu çalışmada da, düşük Ca sayılarında Newtonian ve Newtonian olmayan akışkanların benzer davranışlar sergiledikleri görülmüştür. Akışkan reolojisi için üs kanunu, $\tau = k \left| \dot{\gamma} \right|^{n-1} \dot{\gamma}$, yaklaşımını kullanan perturbation metodu ile elde edilen sonuçlar da yukarda zikredilenlere benzer davranışları sergilemektedir. Fakat, üs kanunu yaklaşımı kullanan perturbation metodunun, üs kanunu indeksi n' in fonksiyonu olarak boru duvarı üzerinde biriken sıvı filmi kalınlığını doğru bir şekilde tahmin edemediği ifade edilmiştir. Önceki araştırmacıların deneysel gözlemlerinin aksine, üs kanunu indeksi n' in azalması ile sıvı film kalınlığının arttığı belirtilmiştir.

Newtonian olmayan akışkanların dairesel borularda gaz yardımı ile yer değiştirmesi problemi üzerine farklı akışkanlar ve boru çaplarının etkileri Ca sayısının fonksiyonu olarak incelenmiştir, (Kamışlı, 2001). Bu çalışmada, cam boruların sıvının dışarı atıldığı ucu hem atmosfere tam açık iken hem de boru ucuna bir vana bağlanarak atmosfere kısmen açıkken gaz enjeksiyonu gerçekleştirilmiştir. Atmosfere açık boru

durumunda, boru duvarı üzerinde biriken sıvı fraksiyonu Taylor (1961) tarafından tespit edilen değerdan çok az yüksektir. Bu fark, eksenel akış yolu boyunca gaz akış hızındaki değışimlerden kaynaklanmaktadır. Çünkü, boru duvarı üzerinde biriken sıvı miktarı kabarcık hızına bağılıdır. Kamışlı (2001) çalışmasında, 3.17 mm, 4.76 mm, 6.35 mm ve 9.52 mm çaplarında cam borular kullanmıştır ve 6.35 mm' den daha geniş çapa sahip borularda akış olayı sırasında yerçekiminin belirgin bir şekilde etkili olduğunu ancak gaz önünün sıvı önüne geçiş süresi genelde kısa olduğundan yerçekiminin deneylerde pek etkili olmadığını ifade etmiştir. Yüksek Ca sayılarında, Newtonian olmayan akışkanın viskozitesindeki artış ile orantılı olarak boru duvarı üzerinde biriken sıvı filminin kalınlığının arttığı gözlemlenmiştir.

Uç kısmına vana yerleştirilmiş borularda yapılan deneylerde, kabarcık hızının, kabarcık önü ile vana arasındaki sıvı miktarından bağımsız olduğu gözlemlenmiş bununda vananın akış olayına göre daha fazla bir direnç oluşturmasından kaynaklandığı ifade edilmiştir. Bu şartlarda akış yolu boyunca üniform bir kabarcık hızı elde edilmiştir. Ucu açık boru şartlarında elde edilen sonuçlarla vana yerleştirilerek yapılan deneylerden elde edilen sonuçlar kıyaslanacak olursa, açık uçlu borularda boru duvarı üzerinde biriken sıvı miktarı daha fazladır.

2.2. Silindirik Olmayan Borularda Akış

Newtonian ve Newtonian olmayan akışkanların gaz yardımı ile yer değiştirmesi problemi, silindirik borularda olduğu kadar silindirik olmayan geometrili ortamlarda da incelenmiştir. Akış olayı, Hele-Shaw hücresi olarak adlandırılan ve aralarında belli bir mesafe bulunan birbirine paralel iki düzlemsel plaka arasındaki boşlukta ve dikdörtgen, kare veya üçgen kesite sahip kanal ve borularda gerçekleştirilmiştir. Aşağıdaki kısımlarda bu ortamlardaki akış olayları üzerine yapılmış çalışmalar ve varılan sonuçlar yer almaktadır.

2.2.1. Newtonian Akışkanların Akışı

Her biri $2a$ kadar genişliğe sahip ve aralarında b kadar uzaklık bulunan birbirine paralel iki plakadan oluşan dikdörtgen kesitli kanalda gaz yardımı ile yer değiştirme problemi farklı araştırmacılar tarafından hem deneysel hem de teorik olarak incelenmiştir. Akış olayı esnasında viskoz akışkan içerisinde penatre olan az viskoz akışkan dile benzer bir şekil alarak sabit u_b hızı ile akmaktadır. Gaz penetrasyonu sırasında oluşan gaz parmağının büyüklüğünü tanımlamak üzere $\lambda = (\text{gaz kabarcığının kalınlığı}) / (\text{plakalar arasındaki mesafe})$ şeklinde boyutsuz bir değişken tanımlamışlardır. Saffman ve Taylor (1958), Hele-Shaw hücresi içerisindeki viskoz bir akışkanın daha az viskoz bir akışkan yardımıyla yer değiştirmesi problemini incelemişlerdir. Çalışmada akışkanların birbiri ile karışmadığı kabul edilmiştir. Hele-Shaw hücresinde, penatre olan az viskoz akışkan iki boyutlu olarak penatre olmaktadır. İki paralel plaka arasında oluşan dikdörtgen kesitli kanalda gazın penetrasyonu esnasında oluşan gaz kabarcığının büyüklüğü $\lambda_w = (\text{gaz kabarcığının genişliği}) / (\text{dikdörtgen kanalın genişliği})$ ile tanımlanmıştır. Akış olayı çok yavaş olmadıkça, $\lambda_w = 1/2$ ' ye yakın değerler almıştır. Fakat çok düşük hızlarda, azalan hız ile $1/2 < \lambda_w < 1.0$ aralığında arttığı görülmüştür ve Ca sayısının fonksiyonu olarak λ_w ' nin değişimi incelenmiştir. Ayrıca, iki akışkan arasındaki yüzey gerilimin, arayüzeydeki kinematik ve dinamik sınır şartlarını etkilemediği kabulü ile yapılan analizden elde edilen sonuçlarla ölçülen λ_w değerlerinin uyum sağladığı ifade edilmiştir.

Taylor ve Saffman (1958) tarafından yapılan çalışmada deneysel olarak kararlı parmakların oluşumu gözlemlenirken, yapılan matematiksel analizde deneysel gözlemlerden farklı olarak kararsız kabarcıkların olduğu görülmüştür. Bu analizden elde edilen sonuç bu araştırmacılar tarafından yapılan önceki çalışmanın sonuçları (Saffman ve Taylor, 1958) ile de uyumsuzluk göstermektedir. Teori ve deneyler arasındaki bu uyumsuzluğun, teori oluşturulurken dinamik sınır şartlarının arayüzey geriliminden bağımsız olduğu kabulünden kaynaklandığı ifade edilmiştir.

McLean ve Saffman (1981) gaz kabarcığı burnunun yan eğrileri nedeni ile sonlu bir yüzey gerilim etkisini dikkate alarak problemi tekrar incelemişlerdir ve problemi formüle etmişlerdir. Bu çalışmada λ_w ' nin değişimi modifiye edilmiş capillary sayısının, $Ca' = (u_b \mu \sigma) / (a/b)^2$, değişimi ile kıyaslanmıştır. Burada a, yarı hücre genişliğine karşılık gelmektedir. Arayüzey için elde edilen nonliner forma indirgenmiş bir çift diferansiyel denklem, sonlu yüzey gerilim için Newton metodu kullanılarak sayısal olarak çözümlenerek kararlı şartları sağlayan bir analiz elde edilmiştir. Kabarcığın yan eğrileri ile alakalı olan yüzey gerilimin, gaz parmaklarını kararsız kıldığı ve deneysel gözlemlerle uyumsuz sonuçlar olduğu sonucuna varılmıştır.

Hele-Shaw hücresinde gaz kabarcığı tarafından oluşturulan menisküsün profilini ve hız alanlarını incelemek üzere Pitts (1980) deneysel ve teorik bir çalışma yapmıştır. Bu çalışmada da Ca' sayısı kullanılmıştır. λ_w ' nin fonksiyonu olarak parmağın şeklini doğru bir şekilde tahmin eden ve λ_w ve u_b arasında uygun bir ilişki veren deneysel sonuçlarla uyumlu teorik bir yaklaşım ortaya koymuştur. Sıfırdan sonsuza doğru artan u_b hızına karşılık λ_w ' nin 1' den 0.5' e doğru kararlı bir şekilde azaldığı gözlemlenmiştir.

Park ve Homsy (1984) yatay Hele-Shaw hücresinde gaz yardımıyla yer değiştirme olayını Bretherton (1961)' un yaklaşımını kullanarak incelemişlerdir. Yer değiştiren akışkanın kanal duvarını ıslattığı ve akış olayının çok düşük hızlarda gerçekleştiği kabullerine dayanan Lübrikasyon yaklaşımını içeren teorik bir analiz ortaya konulmuştur. Problem sabit film kalınlığı bölgesi ve kabarcık burnuna yakın durgun menisküs bölgesi şeklinde iki bölge için formüle edilmiştir. Elde edilen çözümlerin her iki bölgenin çakıştığı (ortak sınır şartlarına sahip olduğu) noktada birbirleri ile kıyaslanması gerekmektedir ve Newtonian bir akışkan için bu şartlar belirlenmiştir.

Park ve Homsy (1985) Hele-Shaw hücresinde kararlı parmakların oluşumu ve bu parmakların istikrarını incelemek üzere deneysel bir çalışma yapmışlardır. McLean ve Saffman' ın ve kendilerinin daha önceki çalışmalarında olduğu gibi bu çalışmada da kararlı parmakların şeklinin Ca' sayısı ile değişimi gözlemlenmiştir. Saffman ve Taylor ve Pitts' in deneyleri için geçerli olan $a/b=15.875$ oranına kıyasla daha büyük $a/b=125$, orana sahip bir deney düzeneği kullanarak daha büyük Ca' sayısı değerleri elde etmişlerdir. Ancak yaklaşık olarak 100 olan kritik Ca' değerinin altında, parmakların kararlı bir şekle sahip olduğu fakat $Ca' > 100$ değerlerinde kararsız parmakların oluştuğu gözlemlenmiştir.

Kopf-Sill ve Homsy (1987), $a/2b=130$ oranına sahip bir Hele-Shaw hücresinde Ca' nın fonksiyonu olarak kararsız gaz-sıvı arayüzeyini ve $2\lambda_w$ kabarcık kalınlığını belirlemek üzere deneyler yapmışlardır. Yapılan deneylerden λ_w için 0.15 – 0.30 aralığında değerler bulunmuştur. Eğer kabarcıklar veya parmaklar duvar kenarına yakın noktada başlarsa, bu parmaklar veya kabarcıklar yarık oluşturmazlar ve kanalın merkezine doğru hareket etmezler. Artan Ca' sayısına bağlı olarak, bu parmaklar dendritic kararsızlık olarak bilinen simetrik bir kararsız hareket ortaya koyarlar. Kabarcık genişliğinin değeride artan $a/2b$ oranının artışı ile azalır.

Reinelt ve Saffman (1985) hem iki boyutlu Hele-Shaw hücresinde hem de bir boru içerisinde simetrik akış için gaz yardımıyla yer değiştirme olayını incelemişlerdir. Bu çalışmada olayı analitik yönden olduğu kadar nümerik yönden de incelemişlerdir. Nümerik çalışmanın amacını oluşturan, akım fonksiyonları ve vortisite için eşitlikler türetilmiştir. Sabit bir alan üzerinde arayüzeyin seriye açılımı ve normal gerilme sınır şartı dikkate alınarak yapılan çözümden arayüzey için yeni şekil nonlinear en küçük kareler metodu yardımıyla belirlenmiştir. Hesaplanan sonuçlar Taylor (1961)' un deneyleri ile kıyaslanmıştır ve tüp duvarında biriken sıvı fraksiyonu için nümerik sonuçlarla deneysel sonuçların yakın bir uyum içinde olduğu görülmüştür.

Tanveer (1986) yüzey gerilimin Hele-Shaw hücresindeki gaz kabarcığının kararlılığı üzerindeki etkisini incelemiştir. Yüzey gerilim kabarcık boyutu ve kabarcık hızı arasındaki ilişkiyi yarı dairesel bir kabarcık şekli üzerinde ortaya koymaya çalışmıştır.

Tanveer (1987) bir başka çalışmasında parmak sınırlarının yumuşak kabul edilmesi durumunda simetrik olmayan bir çözümü lineer ve lineer olmayan formda incelemiştir ve bir birine yakın sonuçlar bulmuştur.

Maxworthy (1986) yatay düzlemde α kadar bir açı yapmış olan Hele-Shaw hücresi içerisinde viskoz bir akışkan içersine hava enjekte ederek oluşan düzgün kabarcıkların hareketini incelemiştir. Geniş bir kabarcık boyutu aralığında ve hücrenin yapısına bağlı olarak tekli kabarcıkların şeklini ve yükseliş hızını incelemiştir. Maxworthy yapmış olduğu deneylere ait sonuçları Saffman ve Taylor (1958) ve Tanveer (1986) tarafından ortaya konan teorik analizlerle kıyaslamıştır ve büyük kabarcık genişlikleri için $\alpha \rightarrow 0$ durumunda iyi bir uyum olduğunu görmüştür.

İki boyutlu bir Hele-Shaw hücresi içerisinde gerçekleşen akış olayı analitik ve nümerik olarak Bensimon (1986) tarafından incelenmiştir. Yüzey gerilim varlığında kabarcıklar kararlıdır. Ancak lineer kararlılık probleminin yapısı üstel olarak düşük yüzey gerilimlerinde görülen sonlu büyüklükteki lineer olmayan kararlılığın varlığında kabarcık burnuna bağlıdır. Yani artan kabarcık hızı ile lineer olmayan kararlılık üstel olarak azalır.

Tabeling ve ark. (1987) yatay olarak düzlem geometriye sahip bir ortam içerisinde akışkanın kanalı mükemmel bir şekilde ıslattığını kabul ederek Saffman ve Taylor' ın kararsızlık testini deneysel olarak incelemişlerdir. Geniş bir Ca sayısı aralığında Hele-Shaw hücresi içerisindeki akışın şeklini ve akım hatlarını belirlemek üzere içerisine çok küçük boyutlarda balık pulu partikülleri karıştırılmış olan gliseril içerisine hava enjekte edilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda çok küçük oranlarda edilerin oluştuğu ve bunlarının bir kısmının ara yüzeyde gerçekleştiği görülmüştür. λ_w ile Ca' arasındaki ilişki grafiksel olarak ve matematiksel olarak incelenmiştir. $Ca' < 50$ olması durumlarında kabarcıkların dairesel şekle sahip olduğu görülmüştür. Ca' ya karşı kanal duvarı üzerinde biriken sıvı fraksiyonunun değişimi grafiksel olarak değerlendirilmiş ve $a/b=20.3$ oranı için lineer bir ilişkinin olduğu gözlemlenmiştir.

Ratulowski ve Chang (1989) dairesel kesitli borularda ve kare kesitli kanalda tekli kabarcıkları ve uzun kabarcıkların hareketini incelemişlerdir. Bu şahıslar çalışmalarında kabarcık uçları arasındaki basınç düşüşünü ve dairesel boru veya kare kanal duvarı üzerinde biriken sıvı fraksiyonunu belirlemeye çalışmışlardır. Ayrıca bu

araştırmacıların yapmış oldukları analize göre çözüm sadece $Ca > 3 \cdot 10^{-3}$ olması durumunda geçerlidir ve azimutal akış ihmal edilmiştir.

Kolb ve Cerro (1991)' da izotermal olarak kare kesit alanına sahip bir kanalda Newtonian bir akışkanın gaz yardımıyla yer değiştirmesi olayını incelemişlerdir. Yapılan çalışmada kanal duvarı üzerinde biriken sıvı fraksiyonunun büyük capillary sayılarında asimptotik bir limite ulaştığı görülmüştür. Bu şahıslar düşük capillary sayılarında arayüzeyin aksisimetrik olmadığını ve aksisimetrik olmayan arayüzey için gaz kabarcığının kare kanalın duvarlarında veya ince düz sıvı filmi tarafından ayrılmış olan köşelerde, tüpte kalan sıvı bölgelerinden daha da düzgün yapıda olduğunu gözlemlemişlerdir. Artan capillary sayısı ile yan düzlemdeki çaplar ve bunun sonucu olarak film kalınlığı b neredeyse sabit kalırken diagonal düzlemdeki kabarcık çapının azaldığı görülmüştür. Bu araştırmacılar diagonal düzlemdeki çapın yan düzlemdeki çapa eşit oluncaya kadar devamlı azaldığını görmüşlerdir. Bu durum yaklaşık olarak $Ca=0.1$ durumunda gerçekleşmiştir. Diğer taraftan aksisimetrik kabarcık, $Ca > 0.1$ durumlarında görülmektedir ve bu bölgede kabarcık çapının diagonal düzlemde ve yan düzlemde aynı olduğu görülmüştür. Capillary sayısındaki daha büyük artışlar için, kabarcık çapı monoton olarak azalmaktadır ve sonuç olarak 0.68 asimptotik limit değerine ulaşmaktadır. Ayrıca kare kanal duvarı üzerinde biriken sıvı fraksiyonunun fonksiyonu olarak akım hatlarının gelişimi de incelenmiştir. Bu araştırmacılar kare kanal duvarında kalan sıvı miktarının dairesel borudakinden daha yüksek olduğunu görmüşlerdir. Ancak sıvı filmi kalınlığı b , kare kanalın duvarının orta noktasında her zaman daha düşüktür ve kare kanalın duvarında biriken sıvı fraksiyonu monoton bir şekilde artarak 0.64 asimptotik limit değerine ulaşmıştır. Dairesel ve kare kesitli ortam için davranışın Ca sayısının belli bir değerinin üzerinde ($Ca > 0.7$) neredeyse aynı olduğu görülmüştür. Ancak Ca sayısının düşük değerleri daha büyük öneme sahip şartları oluşturmaktadır.

Kolb ve Cerro (1993), daha önceki çalışmalarına lubrikasyon yaklaşımını katarak akışın aksisimetrik olduğu şartlarda büyük Ca sayıları için incelemeler yapmışlardır. Uygulanan lubrikasyon yaklaşımından elde edilen çözümün $0.7 < Ca < 2$ aralığında deneysel verilerle uyum içinde olduğu görülmüştür.

Kamışlı (2003) tarafından kare kesitli bir kapiler içerisinde Newtonian akışkanın gaz yardımıyla yer değiştirmesi sırasında kanal duvarı üzerinde biriken sıvı

fraksiyonunun capillary sayısının fonksiyonu olarak değişimi teorik olarak incelenmiştir. Akış olayının hemen hemen üç boyutlu olduğu şartlarda basınç terimi elemine edilerek hareket ve süreklilik denklemleri ifade edilerek elde edilen dördüncü mertebeden diferansiyel denklemin analitik olarak çözümünden teorik analiz ortaya konulmuştur. $0.1 < Ca < 3.0$ aralığında Ca sayısındaki artış ile diagonal düzlem üzerindeki kabarcık çapının azaldığı ifade edilmiştir. Ayrıca kare kanalın duvarlarının merkezindeki sıvı filmi kalınlığının köşelerdeki sıvı filminden daha ince olduğu ifade edilmiştir.

2.2.2. Newtonian Olmayan Akışkanların Akışı

Vossoughi ve Seyer (1984) kapiler kuvvetlerin ve yer çekimi kuvveti etkisinin olamadığı şartlarda birbirleri ile karışmayacak şekilde faz oluşturan bir akışkan yardımıyla petrol kazanımındaki yer değiştirme olayını teorik ve deneysel olarak incelemişlerdir. Deneysel çalışma 0.15 cm ve ya 0.47 cm çapa sahip boncuk taneleri ile doldurulmuş saydam ve dikdörtgen kesitli bir dolgulu yatakta gerçekleştirilmiştir. Su, farklı konsantrasyonlarda glicerol çözeltileri ve çeşitli konsantrasyonlarda sulu polyacrylamide çözeltileri yer değiştiren akışkan olarak kullanılmıştır. Sonuç olarak farklı molekül ağırlığına sahip iki polimerin hemen hemen aynı davranış gösterdiğini ve polimer çözeltilerinin suya göre daha yüksek kazanım verimine sahip olduğu görülmüştür.

Nitmann ve ark.. (1985) Hele-Shaw hücresi içerisinde az viskoz bir akışkan tarafından daha viskoz bir akışkanın yer değiştirmesi olayında görülen viskoz parmak etkisini deneysel olarak incelemişlerdir. Deneylerde su ve su ile karışmayan Newtonian olmayan sıvılar kullanılmıştır. Sonuç olarak viskoz parmakların fraktallar ve rastgele yapılar oluşturduğunu görmüşlerdir.

Hele-Shaw hücresi içerisinde Newtonian olmayan bir akışkanın gaz yardımı ile yer değiştirmesi olayında Taylor ve Saffman (1958)' ın kararlılık analizi Wilson (1990) tarafından da incelenmiştir. Bu analizde kullanılan Newtonian olmayan akışkan için Oldroyd-B ve üs kanunu modelleri kullanılmıştır. Ancak sadece Oldroyd-B modeli için yeni sonuçlara ulaşılmıştır.

Ro ve Homsy (1995) Newtonian olmayan bir akışkanın gaz yardımı ile yer değiştirmesi olayı için asimptotik bir analiz geliştirmişlerdir. Film kalınlığını belirlemede normal gerilme ve kayma gerilmesi azalmasının etkileri incelenmiştir. Bu çalışmada normal gerilme ve kayma gerilmesi etkileri kuvvet dengesindeki baskın terimler dikkate alınarak elde edilen yaklaşık model uyarlanarak analiz edilmiştir. Viskoelastik akışkanı modellemek için Oldroyd-B eşitliği kullanılmıştır. Bu şahısların asimptotik analizine göre, akışkanın viskoelastikliği artarken film kalınlığı azalmaktadır ve menisküs ucundaki basınç düşüşü artmaktadır. Ayrıca bu analiz Ca sayısından başka akışın elastisitesinin bir ölçüsü olan Weissenberg sayısını da (We) içermektedir. Bu analiz sonucunda elde edilen veriler viskoelastisite üzerine yapılmış olan daha önceki çalışmalarla uyum göstermektedir.

Nakayama ve Motogami (1998) iki paralel plaka arasındaki ince sıvı tabakası için gaz yardımı ile yer değiştirme olayında oluşan viskoz parmak etkisini sonlu elemanlar metodunu kullanarak incelemişlerdir. Yapılan bu nümerik inceleme sonucunda yoğunluk, viskozite, yüzey gerilim, zaman ve basınç parametrelerinin değişimine bağlı olarak oluşan parmakların profili belirlenmiştir.

Kamışlı ve Ryan (1999) dikdörtgen kesitli bir kanalda Newtonian olmayan akışkanın gaz yardımı ile yer değiştirmesi olayını tekil perturbation metodunu kullanarak teorik bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu çalışmada deneysel olarak elde edilen verilere göre düşük Ca sayısı bölgesinde Newtonian olmayan akışkanın Newtonian akışkanmış gibi davrandığı, aynı trendin üs kanunu akışkanı için perturbation analizinden elde edilen sonuçlarda da görüldüğü ifade edilmiştir.

Aşağıdaki Tablo-2.1, farklı araştırmacılar tarafından farklı geometrilerde ve farklı akışkanlar kullanılarak yapılan çalışmalar sonucu m sıvı fraksiyonu ile Ca sayısı arasında elde edilen eşitlikleri özetlemektedir.

Tablo-2.1 : m fraksiyonu ile Ca sayısı arasındaki ilişkiler.

Araştırmacı	Yıl	Çalışma	Ca Aralığı	Fraksiyon Miktarı
Fairbrother and Stubbs	1935	Deneysel	0.001-0.01	$m = \sqrt{Ca}$
Taylor	1961	Deneysel	0.0-2.0	$m = 0.56$
Bretherton	1961	Teorik ve Deneysel	$Ca < 0.003$	$m = 1.29 (3 Ca)^{2/3}$
Cox	1962	Teorik ve Deneysel	0.0-10.0	$M = 0.60$
Park ve Homsy	1984	Teorik	$Ca < 0.003$	$m = 1.29 (3 Ca)^{2/3}$
Reinelt ve Saffman	1985	Teorik	0.0-2.0	
Kolb ve Cerro	1991	Kare Kanal	0.0-2.0	$m = 0.64$
Poslinski ve ark.	1995	Viskoplastik	0.0-1000	$m = 0.58$
Huzyak ve Koeling	1997	Viskoelastik	0.0-100	$m = 0.73$
Kamışlı ve Ryan	1999	Teorik Dairesel Tüp	0.0-2.0	$m = 2 \tilde{b} C_A^{2/3} - (\tilde{b})^2 C_A^{4/3}$
Kamışlı ve Ryan	1999	Teorik Dikdörtgen Kanal	0.0-2.0	$m = \tilde{b} C_A^{2/3}$

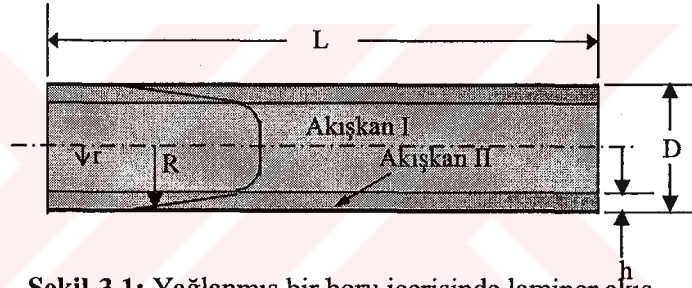
Ca: Capillary sayısı, C_A : Modifiye edilmiş Capillary sayısı.

3. TEORİK ANALİZ

Gaz yardımıyla yer değiştirme probleminin matematiksel olarak ifade edilmesine yönelik çalışmalar ve kütle dengesi eşitlikleri bu bölümde tartışılacaktır. Bretherton tarafından lübrikasyon (yağlama) yaklaşımını esas alan matematiksel bir analize de yer verilecektir.

3.1. Yağlanmış Bir Tüp İçerisinde Eksenel-Simetrik Akış

İç yüzeyi h kalınlığında bir akışkanla yağlanmış, D iç çaplı bir tüp içerisinde iki akışkanın eksenel olarak simetrik akış olayı Şekil-3.1’ de görülmektedir. Bu akış olayında Akışkan I laminar akış şartlarında akmaktadır.



Şekil-3.1: Yağlanmış bir boru içerisinde laminar akış. Akışkan II, h kalınlığında yağlayıcıdır.

Şekil-3.1’ de verilmiş olan böyle bir sistemi matematiksel olarak tanımlayabilmek için bazı kabulleri yapmak gerekmektedir. Bu kabuller aşağıda sıralanmıştır;

- Bu iki akışkan arasında iyi belirlenmiş bir sınır mevcuttur ve bu sınır stabildir.
- Yağlayıcı akışkana ait sıvı filmi kalınlığı (h), boru eksenine boyunca sabittir ve yer çekiminden kaynaklanan etkiler ihmal edilmektedir.
- Buradaki problemin çözümü için her iki akışkan için de tam gelişmiş kararlı akışın geçerli olduğu kabulü yapılmalıdır. Bu durumda her bir akış için farklı sınırlar söz konusudur.

Burada tam gelişmiş kararlı akıştan bahsedilmeyecektir.

Akışkan I için, $r=0$ boyunca kayma gerilmesinin sonlu olmak zorunda olduğu kabulüne göre, Akışkan I için hız profili aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$U_z^I = \frac{C^I}{4\mu^I} r^2 + D^I, \quad 0 \leq r \leq R-h \quad (3.1)$$

Ancak tek bir akışkan için tam gelişmiş akım tanımlanırken elde edilen hız profili ifadesindeki B integrasyon sabiti uygun sınır şartlarından sıfır olarak bulunurken, burada Akışkan II için yazılan hız profili ifadesinde sıfıra eşit olmaz. Çünkü $r=0$ noktası, Akışkan II' nin akış alanı içinde bulunmamaktadır. Bu nedenle Akışkan II için genel çözüm (3.2) eşitliğindeki gibidir.

$$U_z^{II} = \frac{C^{II}}{4\mu^{II}} r^2 + \frac{B^{II}}{\mu^{II}} \ln r + D^{II}, \quad R-h \leq r \leq R \quad (3.2)$$

Burada her iki eşitlikte bulunan beş adet bilinmeyen sabiti belirlememiz gerekmektedir. İlgili sınır şartlarını dikkate alarak C^I ve C^{II} sabitlerini aşağıdaki gibi buluruz.

$$C^I = \frac{\Delta P^I}{L}, \quad C^{II} = \frac{\Delta P^{II}}{L} \quad (3.3)$$

Şayet akışkanlar birbiri ile karışmayan akışkanlar ise, yüzey gerilimden ve eğrilikten kaynaklanan basınç farkları ihmal edilebilir. Bu durumda sabit bir eksenel pozisyonda tek bir basınç düşüşünden söz etmek mümkün olacaktır. Böylece (3.4) eşitliği yazılabilir.

$$C^I = C^{II} = \frac{\Delta P}{L} \quad (3.4)$$

Diğer üç sabit için gerekli eşitliklere, hız ve kayma gerilmelerine ait sınır şartlarını kullanarak ulaşabiliriz. Boru duvarına bitişik olan akışkanda (Akışkan II) kaymanın olmadığı şartlarda $U_z^{II}=0$ olacaktır. Böylece (3.5) eşitliği yazılabilir.

$$0 = \frac{C^{II}}{4\mu^{II}} r^2 + \frac{B^{II}}{\mu^{II}} \ln r + D^{II} \quad (3.5)$$

Ayrıca iki akışkan arasındaki ara yüzeyde de kaymanın olmadığını düşünürsek, bu durumda $r=R-h$ sınırında iki akışkan içindeki hızların eşit olduğu anlamı çıkar. Böylece (3.6) eşitliğini yazmak mümkün olacaktır.

$$\frac{C^I}{4\mu^I} (R-h)^2 + D^I = \frac{C^{II}}{4\mu^{II}} (R-h)^2 + \frac{B^{II}}{\mu^{II}} \ln (R-h) + D^{II} \quad (3.6)$$

(3.6) eşitliği akışkan içindeki hız alanının sürekli olduğu manasındadır. Diğer bir beklenti ise akışkanın birinden diğerine geçildiği zaman kayma gerilmesinin sürekli bir şekilde değiştiğidir. Bu şartta aşağıdaki eşitlik geçerli olacaktır.

$$\mu^I \frac{dU_z^I}{dr} = \mu^{II} \frac{dU_z^{II}}{dr}, \quad r = R-h \quad (3.7)$$

Bu durum (3.1) ve (3.2) eşitliklerine uygulanacak olursa (3.8) eşitliği elde edilecektir.

$$\frac{C^I}{2} (R-h) = \frac{C^{II}}{2} (R-h) + \frac{B^{II}}{(R-h)} \quad (3.8)$$

Yukarıdaki ifadeler dikkate alınarak ve boyutsuz gruplar tanımlanarak sabitler belirlenip aşağıdaki eşitliklere ulaşılabilir.

$$\frac{U_z^I}{\varphi} = \left[(1-\eta)^2 + M \eta (2-\eta) \right] - s^2 \quad (3.9)$$

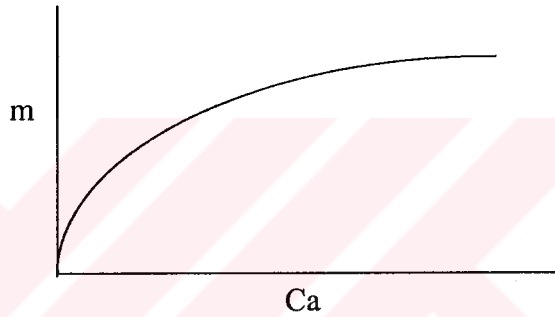
$$\frac{U_z^{II}}{\varphi} = M (1-s^2) \quad (3.10)$$

Burada kullanılan notasyon için tanımlar aşağıdaki gibidir.

$$\phi = -\frac{CR^2}{4\mu^I} = \frac{\Delta PR^2}{4\mu^I L} \quad s = \frac{r}{R}, \eta = \frac{h}{R}, M = \frac{\mu^I}{\mu^{II}} \quad (3.11)$$

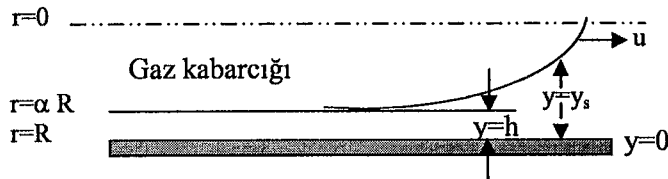
3.2. Bir Kapiler İçerisinde Sıvı Filminin Birikmesi

Başlangıçta bir miktar sıvı ile doldurulmuş olan uzun ve yatay kapiler bir borunun bir ucundan yavaş ve sürekli bir şekilde hava üflenmesi durumunda hava kabarcığının önünde yer değiştiren sıvı diğer uçtan dışarı atılır. Klasik olarak Ca sayısına bağlı olarak m sıvı fraksiyonunun değişimi Sir G.I. Taylor (1961) tarafından elde edilmiştir ve grafiksel olarak Şekil-3.2’de gösterilmiştir.



Şekil-3.2: Taylor’ un çalışmasına göre m sıvı fraksiyonunun Ca sayısı ile değişimi.

Akışkan dinamiği problemlerinin analizi çok karmaşıktır. Bu problemlerin çözümlenmesi için çeşitli yaklaşık analitik analizler önerilmiştir, (Bretherton 1961, Cox 1962). Biz burada seçilen metodun sınırlarını görebilmek ve de Taylor’ un grafiğindeki veriler için modelin temsil edebilme derecesini ölçmek için Bretherton’ un yaklaşımı özetlenecektir. Aşağıdaki Şekil-3.3 akışın analizi için gerekli geometriyi göstermektedir.



Şekil-3.3: Gaz yardımıyla yer değiştirme olayında görülen akışın geometrik şekli.

Geometrik yaklaşımdan, m aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$m = 1 - \alpha^2, \quad \alpha = 1 - \eta, \quad \eta = h/R \quad (3.12)$$

Sıvı içerisinde hareket eden kabarcık uniform h kalınlığına sahip bir sıvı filmini arkasında bırakarak hareket eder. Gözlemler uniform kalınlık bölgesinin gaz kabarcığı burnunun birkaç yarıçap kadar arkasında olduğunu önermektedir. Burada burun kabarcığının hareket eden ön kısmıdır. Kabarcık yüzeyi, eksenel yönde, z, uniform u hızına sahip olacak şekli alır.

Bretherton, bu problemin çözümü için düzlemsel lubrikasyon teorisine dayanan bir analiz gerçekleştirilmiştir. Bu analiz, h film kalınlığının R' ye kıyasla oldukça küçük olduğu kabülü ile başlar. Navier-Stokes denklemleri kartezyen koordinatlarda biraz daha basittir ve bu nedenle de ortaya çıkan cebir daha kolay ilerletilebilmektedir. Bundan başka, sıvıdaki Re sayısının, durgun terimlerinin (zaman türevi içeren) Navier-Stokes denklemlerinden düşülebilecek kadar düşük olduğu kabul edilir. Lubrikasyon teorisinin esası, akışın neredeyse katı yüzeyine paralel olduğu esasına dayanır. Yani $u_y \ll u_z$ olduğu durumu inceler.

Bu durumda z ve y yönlerindeki Navier-Stokes denklemleri basit olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$0 = -\frac{dP}{dz} + \mu \frac{d^2 u_z}{dy^2} \quad \text{ve} \quad 0 = -\frac{dP}{dy} \quad (3.13)$$

Bu denklem çiftinin sağ tarafı, P' nin y' nin fonksiyonu olmadığını dP/dz ' nin y' den bağımsız olduğunu bize anlatmaktadır. Bu nedenle de hız alanını bulmak için bu çiftin sol tarafını integre edebiliriz. Bunu yaparken, y_s terimini y yönündeki serbest yüzeyin pozisyonunu ifade etmek için kullandığımızı belirtmek gerekir, yani $y_s = y_s(z)$ ' dir. Ayrıca integrasyonu gerçekleştirirken hız alanı üzerinde iki sınır şartını kullanmak gerekmektedir. Bunlar aşağıda verilmiştir.

- Duvarda kayma yoktur. Yani $u_z = 0, y = 0$
- $y_s(z)$ serbest yüzeyinde kayma gerilmesi yoktur.

$$\mu \frac{du_z}{dy} = 0 \text{ ve } \frac{du_z}{dy} = 0, y = y_s$$

Bu sınır şartlarına göre integrasyon yapılacak olursa aşağıdaki işlem adımları elde edilir:

$$\frac{d^2 u_z}{dy^2} = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dz} \quad (i)$$

$$\int d\left(\frac{du_z}{dy}\right) = \int \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dz} dy \quad (ii)$$

$$\frac{du_z}{dy} = \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dz} y + A \quad (iii)$$

$$\int du_z = \int \left(\frac{1}{\mu} \frac{dP}{dz} y + A \right) dy \quad (iv)$$

$$u_z = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dz} y^2 + A y + B \quad (v)$$

Sınır şartlarını dikkate alırsak,

birinci sınır şartından, $B=0$

ikinci sınır şartından, $A = -\frac{1}{\mu} \frac{dP}{dz} y_s$ olarak bulunur.

Sonuçta A ve B dikkate alınarak u_z yazılırsa,

$$u_z = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dz} y^2 - \frac{1}{\mu} \frac{dP}{dz} y_s y \quad (3.14)$$

$$u_z = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dz} (y^2 - 2 y_s y)$$

Ayrıca, serbest yüzey üzerindeki normal gerilmeye ait sınır şartının da ortaya konması zorunludur. Bu durum, yüzeyin eğri yapısı ve yüzey gerilim ile ilgili bir atlama hariç

normal gerilmenin sürekli olduğu olağan bir durumdur. Bu da kartezyen koordinatlarda aşağıdaki şekildedir.

$$P = -\sigma \frac{d^2 y_s}{dz^2} \quad (3.15)$$

Bu son ifade Young-Laplace denkleminin basit yazılımıdır. Burada $1/R_y = 0$ eşitliği ile y yönündeki eğri için düzlem yaklaşımı kullanıldı ve Young-Laplace eşitliği $1/R_z = -d^2 y_s / dz^2$ şekline indirgenebilsin diye serbest yüzey eğrisinin küçük olduğu kabul edildi. Bu son kabul kabarcığın burnuna yakın noktada geçerli olmayacaktır.

$$2\mu \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} \text{ ve } 2\mu \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} \text{ terimlerinden kaynaklanan viskoz normal gerilme faktörlerini}$$

ihmal ediyoruz. Buradan da, basınç üzerine yüzey gerilim etkilerinin, viskoz gerilme etkilerine göre daha etkili olduğu anlamı çıkar. Bu da capillary sayısının küçük olduğu kabüllü ile eşdeğerdir. Son olarak P basıncı kabarcık basıncına bağlıdır ki kabarcık basıncı keyfi olarak 0 kabul edildi.

Eğer kabarcık hızı u ise, birim genişlik için volümetrik hızda kabarcığın hareketi sıvıyı yer değiştirir. Yani y_s kalınlığındaki sıvı tabakasında Q aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$Q = u(y_s - h) \quad (3.16)$$

Fakat (3.14) eşitliğindeki hız alanından da aynı volümetrik akış hızı bulunabilir.

$$Q = \int_0^{y_s(z)} u_z dy \quad (i)$$

$$Q = \int_0^{y_s(z)} \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dz} [y^2 - 2y_s y] dy \quad (ii)$$

$$Q = \frac{1}{2\mu} \frac{dP}{dz} \left[\frac{y^3}{3} - y_s y^2 \right]_0^{y_s} \quad (iii)$$

$$Q = -\frac{y_s^3}{3\mu} \frac{dP}{dz} \quad (3.17)$$

Şimdi z' ye göre (3.15) eşitliği diferansiyellenebilir ve (3.16) ve (3.17) eşitlikleri kullanılarak aşağıdaki sonuca varılır.

$$\begin{aligned} \frac{d^2 y_s}{dz^2} &= -\frac{P}{\sigma} \Rightarrow \frac{d^3 y_s}{dz^3} = -\frac{1}{\sigma} \frac{dP}{dz} \\ \frac{d^3 y_s}{dz^3} &= \frac{3\mu}{\sigma} \frac{y_s(z) - h}{y_s^3} = 3Ca \frac{y_s(z) - h}{y_s^3} \end{aligned} \quad (3.18)$$

Şimdi serbest yüzey için diferansiyel bir denklem türetilir ki bu denklem aşağıdaki boyutsuz büyüklüklerle tekrar tanımlanır.

$$\eta = \frac{y_s}{h}, \quad \xi = \frac{z}{h} (3Ca)^{1/3} \quad (3.19)$$

Buradan (3.18) eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d^3 \eta}{d\xi^3} = \frac{\eta - 1}{\eta^3} \quad (3.20)$$

Kabarcık burnuna yaklaşan bölgede, yani $y_s \gg h$, $(\eta - 1)/\eta^3 \ll 1$ alırsak, (3.20) eşitliği için genel çözüm (3.20) eşitliğinin integrasyonundan,

$$\eta = \frac{(\eta - 1)}{\eta^3} \frac{1}{6} \xi^3 + \frac{a}{2} \xi^2 + b\xi + c \quad (3.21)$$

olup, $(\eta - 1)/\eta^3 \ll 1$ ise ihmal edilebilir. Bu durumda (3.22) eşitliği yazılabilir.

$$\eta = \frac{1}{2} a \xi^2 + b \xi + c \quad (3.22)$$

Kabarcık burnu bölgesindeki serbest yüzeyin eğrisi de aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\frac{d^2 y_s}{dz^2} = \frac{a(3Ca)^{2/3}}{h} \quad (3.23)$$

Ancak capillary sayısının çok küçük olduğu kabul edilmişti. Bu da viskoz etkilerin yüzey gerilim etkilerine göre ikinci sırada olduğunu gösterir. Diğer bir deyişle, kabarcık burnu yakınlarında viskozitenin akış dinamiği üzerine belirgin bir etkisinin olmadığı kabul edilir. Bu da sıvı filmi içinde basınç alanının uniform olduğunu gösterir.

Young-Laplace denklemi tekrar dikkate alınacak olursa, uniform basınç için incelenen yüzey değişiminin sadece küresel geometride olduğu anlaşılır. Bu durumda eğrilik basit olarak $1/(R-y_s)$ olur ki veya yaklaşıma göre halihazırda $1/R$ olabilir. Buradan,

$$\frac{a(3Ca)^{2/3}}{h} \cong \frac{1}{R} \quad (3.24)$$

veya

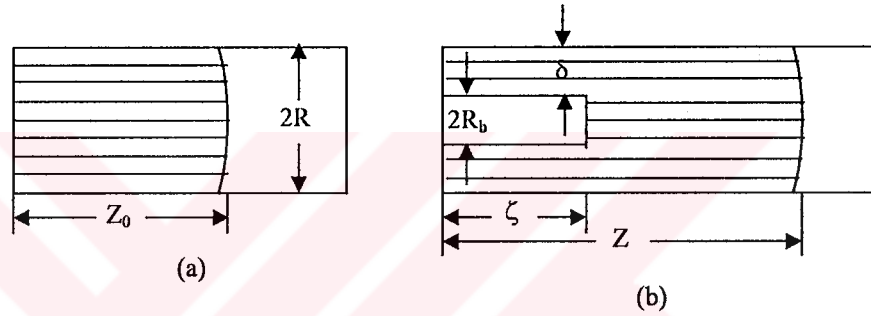
$$\frac{h}{R} = a(3Ca)^{2/3} \quad (3.25)$$

sonucuna varılır. Burada a sabiti bilinmemektedir. Fakat h/R , Ca sayısının $2/3$ ' üncü kuvveti ile değiştiğine göre a tahmin edilebilir. Bu da çok küçük Ca sayıları aralığında deney yapılarak bulunmalıdır, çünkü sonuçlar bu kabullerin dışında geçerli olmayacaktır.

3.3. Gaz Yardımı ile Yerdeğiştirme Olayında Kütle Dengesi

Sıvı ile doldurulmuş bir boru içerisine gaz enjekte edilmesi olayı sırasında gaz yardımı ile yer değiştiren sıvı, sıvıyı ileri doğru iten gaz kabarcığı, boru cidarında biriken sıvı filmi arasındaki kütle denklilikleri ve bu iki akışkanın hızları arasındaki ilişkiler bu kısımda incelenecektir.

Şekil-3.4' de kısmen sıvı ile doldurulmuş olan bir boru içerisinde ilerleyen gaz kabarcığı ve sıvının hareketi görülmektedir. Bu enjeksiyon olayı esnasında gaz tarafından ileri doğru itilen sıvı borunun dışına atılmamaktadır, yani bütün olay boru içerisinde gerçekleşmektedir.



Şekil-3.4: Sıvı ile kısmen doldurulmuş boru içerisinde sıvının gaz yardımı ile yer değiştirmesi. (a) gaz enjeksiyonundan önce, (b) gaz enjeksiyonu esnasında.

R kadar yarıçapa sahip boru içerisindeki sıvıyı ileri doğru iten gaz kabarcığının R_b yarı çapına sahip olduğu düşünülürse boru duvarı ile gaz kabarcığı arasında δ kadar kalınlığa sahip bir sıvı filmi oluşacaktır. $R - R_b = \delta$ ve $R_b = aR$ ise $R - aR = \delta$ olacaktır. Ayrıca $R - aR = \delta$ ise $1 - a = \delta/R = \epsilon$ tanımlaması yapılabilir.

Yukarıdaki şekle göre gaz enjeksiyonunun herhangi bir anında sistem üzerinde kütle dengesi yapılacak olursa:

$$\rho \pi R^2 Z_0 = \rho \pi R^2 (Z - \zeta) + \int_0^{\zeta} \rho \pi (R^2 - R_b^2) dz \text{ olacaktır.}$$

$R_b = aR$ ve $a = 1 - \epsilon$ olduğu dikkate alınarak aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\rho\pi R^2 Z_0 = \rho\pi R^2 (Z - \zeta) + \int_0^\zeta \rho\pi (R^2 - a^2 R^2) dz \quad (3.26)$$

$$Z_0 = (Z - \zeta) + \int_0^\zeta (1 - a^2) dz \quad (3.27)$$

$$Z_0 = (Z - \zeta) + \int_0^\zeta (1 - (1 - \varepsilon)^2) dz \quad (3.28)$$

Son eşitlik integre edilecek olursa,

$$Z_0 = Z - \zeta + \zeta - \int_0^\zeta (1 - \varepsilon)^2 dz \quad (3.29)$$

$$Z_0 - Z = - \int_0^\zeta (1 - \varepsilon)^2 dz \Rightarrow Z - Z_0 = \int_0^\zeta (1 - \varepsilon)^2 dz \quad (3.30)$$

elde edilir.

ϕ ; gaz enjeksiyonu sonunda ζ uzunluğundaki gaz kabarcığı etrafındaki sıvı miktarının, gaz enjekte edilmezden evvelki ζ uzunluğundaki sıvı miktarına oranı şeklinde tanımlanacak olursa,

$$\phi = \frac{\rho\pi R^2 \zeta - \rho\pi \int_0^\zeta R_b^2 dz}{\rho\pi R^2 \zeta} \quad (3.31)$$

$$\phi = 1 - \frac{1}{R^2 \zeta} \int_0^\zeta R_b^2 dz \quad (3.32)$$

$$\phi = 1 - \frac{1}{R^2 \zeta} \int_0^\zeta a^2 R^2 dz \quad (3.33)$$

$$\phi = 1 - \frac{R^2}{R^2 \zeta} \int_0^\zeta (1 - \varepsilon)^2 dz \quad (3.34)$$

$$\phi = 1 - \frac{1}{\zeta} \int_0^\zeta (1 - \varepsilon)^2 dz \quad (3.35)$$

olacaktır.

(3.30) ve (3.35) eşitliklerinden,

$$Z - Z_0 = (1 - \phi) \zeta = \int_0^{\zeta} (1 - \epsilon)^2 dz \quad (3.36)$$

elde edilir.

Şayet $Z = \zeta_b$ olursa yani hareket halindeki gaz ile sıvının uç noktaları (önleri) yaklaşp sonunda arayüzey kaybolduğunda (3.36) eşitliği aşağıdaki formu alır.

$$\zeta_b - Z_0 = (1 - \phi) \zeta_b \quad (3.37)$$

$$\frac{\zeta_b}{\zeta_b} - \frac{Z_0}{\zeta_b} = 1 - \phi \quad (3.38)$$

$$\zeta_b = \frac{Z_0}{\phi} \quad (3.39)$$

Sıvının ve gaz kabarcığının hızları aşağıdaki gibi tanımlanacak olursa,

$$\frac{dz}{dt} = U_1 \text{ ve } \frac{d\zeta}{dt} = U_b \quad (3.40)$$

yazılabilir.

Şayet (3.35) eşitliğinde $\epsilon = \delta/R$ değerinin z ile değişmediğini kabul eder ve integrasyon yapılırsa,

$$Z - Z_0 = (1 - \epsilon)^2 \zeta = (1 - \phi) \zeta \quad (3.41)$$

olacaktır. Gerçekte ϵ , ζ ' nin değişimi ile değişmektedir.

Şayet (3.41) denkleminin zamana göre türevi alınacak olursa,

$$\begin{aligned} \frac{dz}{dt} &= (1 - \epsilon(\zeta))^2 \frac{d\zeta}{dt} \text{ ve} \\ U_1 &= (1 - \epsilon(\zeta))^2 U_b \end{aligned} \quad (3.42)$$

olacaktır.

Akış olayını kontrol eden boyutsuz gruplardan capillary (Ca) sayısı yazılacak olursa,

$$\begin{aligned} Ca &= \frac{\mu_0 U_b}{\sigma} = \frac{\mu_0}{\sigma} \frac{dz}{dt} \\ \frac{Ca}{Ca_\infty} &= \frac{\mu_0}{Ca_\infty \sigma} \frac{dz}{dt} \end{aligned} \quad (3.43)$$

olur.

Eğer kabarcığın kısa zamanda son şeklini aldığını yani birkaç saniye içinde biriken sıvı kalınlığının sabitlendiği kabul edilirse $\varepsilon = \varepsilon_\infty$ olacaktır. Bu durumda da,

$$U_l = \frac{dz}{dt} = (1 - \varepsilon_\infty)^2 \frac{d\zeta}{dt} \text{ olur.}$$

Silindirik koordinatlarda süreklilik denklemi aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (r v_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} (r v_z) = 0 \quad (3.44)$$

Tam gelişmiş akış olayı ve $V_\theta = 0$ ve p sabit iken bu denklem aşağıdaki formu alır.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r v_r) = 0 \quad (3.45)$$

$r=R$ noktasında $V_r=0$ olacaktır. Bunun anlamı akışın sadece z yönünde olduğudur.

Sisteme ait hareket denklemini yazacak olursak, eşitliğin sol tarafı tamamen sıfır olur çünkü, düşük Reynold sayılarında viskoz akışkanın atalet terimi etkili olmayacaktır. Bu durumda,

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{\partial P}{\partial r} - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rr}) \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{r\theta}}{\partial \theta} - \frac{\tau_{\theta\theta}}{r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \rho g_r \\ 0 &= \frac{\partial P}{\partial r} \end{aligned} \quad (3.46)$$

$$0 = -\frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial \theta} - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2 \tau_{r\theta}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta\theta}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial z} \right) \right) + \rho g_\theta \quad (3.47)$$

$$0 = \frac{\partial P}{\partial \theta}$$

$$0 = \frac{\partial P}{\partial z} - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) + \frac{1}{r} \frac{\partial \tau_{\theta z}}{\partial \theta} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z \quad (3.48)$$

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz})$$

Buradan görülmektedir ki, P sadece z' nin fonksiyonudur. Halbuki, son eşitliğin sağ tarafı sadece r' nin fonksiyonudur. Bu durumda mevcut kısmi diferansiyel denklem adi diferansiyel denklem şeklinde çözülebilir.

$$\frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) = r \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right)$$

$$d(r \tau_{rz}) = r \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) dr \quad (3.49)$$

$$\tau_{rz} = \frac{r}{2} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) + \frac{C1}{r}$$

r=0' da $\tau_{rz}=0$ sınır şartına göre C1=0 olur. Bu durumda (3.50) eşitliği yazılabilir.

$$\tau_{rz} = \frac{r}{2} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) \quad (3.50)$$

$$\dot{\gamma} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & \frac{dv_z}{dr} \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{dv_z}{dr} & 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ şeklinde tanımlanmaktadır. Bu durumda } \dot{\gamma} = \left| \frac{dv_z}{dr} \right| \text{ ve aşağıdaki}$$

eşitlikler yazılabilir.

$$\begin{aligned}\tau_{rz} &= -m \gamma_{rz}^{n-1} \gamma_{rz} \\ \tau_{rz} &= -m \left| \frac{dv_z}{dr} \right|^{n-1} \frac{dv_z}{dr}\end{aligned}\tag{3.51}$$

borusal akışta tüm r değerleri için $\frac{dv_z}{dr} > 0$ olacağından nihai olarak (3.52) eşitliği yazılabilir.

$$\tau_{rz} = -m \left(\frac{dv_z}{dr} \right)^n\tag{3.52}$$

(3.50) ve (3.52) denklemleri eşitlenecek ve $1/n=\alpha$ şeklinde bir tanımlama yapılacak olursa aşağıdaki eşitliklere ulaşılır.

$$\begin{aligned}-m \left(\frac{dv_z}{dr} \right)^n &= \frac{r}{2} \left(\frac{\partial P}{\partial z} \right) \\ \frac{dv_z}{dr} &= -r^\alpha \left(\frac{1}{2m} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^\alpha\end{aligned}\tag{3.53}$$

$r=R$ de $v_z=0$ sınır şartı dikkate alınarak son ifade integre edilecek olursa hız profilini veren aşağıdaki ifadeye ulaşılır.

$$v_z = \left(\frac{1}{2m} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^\alpha \frac{R^{\alpha+1}}{\alpha+1} \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^{\alpha+1} \right]\tag{3.54}$$

Daha önce U_1 ile sıvının ortalama hızını tanımlanmıştı. Bu nedenle de v_z eşitliğinden yararlanarak $\bar{v}_z$ ortalama hızı tanımlanabilir.

$$\bar{v}_z = \frac{\int_0^{2\pi R} \int_0^0 v_z r dr d\theta}{\int_0^{2\pi R} \int_0^0 r dr d\theta} \quad \text{şeklinde tanımlanan ortalama hız ifadesinde } v_z \text{ kullanılıp}$$

gerekli ilerletmeler yapılacak olursa aşağıdaki eşitliğe ulaşılacaktır.

$$\bar{v}_z = \frac{R^{\alpha+1}}{\alpha+3} \left(\frac{1}{2m} \frac{\partial P}{\partial z} \right)^\alpha \quad (3.55)$$

$\frac{\partial P}{\partial z}$ için $\partial P = P_f - P_0 = \Delta P_0$ ve $\partial z = z - \zeta$ kabul edilecek olursa (3.56) nolu aşağıdaki eşitliğe ulaşılır.

$$\bar{v}_z = \frac{R^{\alpha+1}}{\alpha+3} \left(\frac{\Delta P_0}{2m} \frac{1}{z - \zeta} \right)^\alpha \quad (3.56)$$

$U_i = \bar{v}_z$ olduğu kabulüne göre

$$(1 - \varepsilon_\infty)^2 \frac{d\zeta}{dt} = \frac{R^{\alpha+1}}{\alpha+3} \left(\frac{\Delta P_0}{2m} \frac{1}{z - \zeta} \right)^\alpha \quad (3.57)$$

$$(1 - \phi) \frac{d\zeta}{dt} = \frac{R^{\alpha+1}}{\alpha+3} \left(\frac{\Delta P_0}{2m} \frac{1}{z - \zeta} \right)^\alpha \quad (3.58)$$

$$(z - \zeta)^\alpha \frac{d\zeta}{dt} = \frac{R^{\alpha+1}}{\alpha+3} \left(\frac{\Delta P_0}{2m} \right)^\alpha \frac{1}{1 - \phi} \quad (3.59)$$

(3.41) eşitliğinden $Z = Z_0 + (1 - \phi)\zeta$ yazılabilir. Bu durumda aşağıdaki eşitliğe ulaşılabilir.

$$(z_0 + (1 - \phi)\zeta - \zeta)^\alpha \frac{d\zeta}{dt} = \frac{R^{\alpha+1}}{\alpha+3} \left(\frac{\Delta P_0}{2m} \right)^\alpha \frac{1}{1 - \phi} \quad (3.60)$$

Bu eşitliği $0 - \zeta_b$ ve $0 - t_b$ aralığında integre edilebilir.

$$\int_0^{\zeta_b} (z_0 - \phi \zeta)^\alpha d\zeta = \int_0^{t_b} \frac{R^{\alpha+1}}{\alpha+3} \left(\frac{\Delta P_0}{2m} \right)^\alpha \frac{1}{1-\phi} dt \quad (3.61)$$

sol tarafın integralini almak için $z_0 - \phi \zeta = u$ değişken değiştirmesi yapılacak olursa $-\phi d\zeta = du$ olur. Bu değişken değiştirmesi dikkate alınarak integrasyon yapılırsa (3.62) ve (3.63) eşitliklerine ulaşılır.

$$\left[z_0^{\alpha+1} - (z_0 - \phi \zeta_b)^{\alpha+1} \right] \frac{1}{\phi(\alpha+1)} = \frac{R^{\alpha+1}}{(\alpha+3)(1-\phi)} \left(\frac{\Delta P_0}{2m} \right)^\alpha t_b \quad (3.62)$$

$$\left[z_0^{\alpha+1} - (z_0 - \phi \zeta_b)^{\alpha+1} \right] \frac{1}{(\alpha+1)} = \frac{R^{\alpha+1}}{(\alpha+3)} \frac{\phi}{(1-\phi)} \left(\frac{\Delta P_0}{2m} \right)^\alpha t_b \quad (3.63)$$

$z_0 = \phi \zeta$ ve $\frac{\zeta_b}{t_b} = U_i$ (başlangıç hızı) ifadelerini dikkate alınır ve de işlemler ilerletilecek olursa

$$U_i = \frac{\alpha+1}{\alpha+3} \frac{R^{\alpha+1}}{z_0^\alpha} \frac{1}{1-\phi} \left(\frac{\Delta P_0}{2m} \right)^\alpha \quad (3.64)$$

ve

$$t_b = \frac{\alpha+3}{\alpha+1} \frac{z_0^{\alpha+1}}{R^{\alpha+1}} \frac{1-\phi}{\phi} \left(\frac{\Delta P_0}{2m} \right)^{-\alpha} \quad (3.65)$$

elde edilir.

$\zeta - \zeta_b$ ve $t - t_b$ integrasyon aralığında integrasyon yaparak (3.62) eşitliği yeniden yazılırsa

$$-\frac{1}{\phi} \frac{1}{\alpha+1} [z_0 - \phi \zeta]^{\alpha+1} \Big|_{\zeta}^{\zeta_0} = \frac{R^{\alpha+1}}{\alpha+3} \frac{1}{1-\phi} \left(\frac{\Delta P_0}{2m} \right)^\alpha (t_b - t) \quad (3.66)$$

$$\frac{1}{\phi(\alpha+1)} \phi^{\alpha+1} \zeta_b^{\alpha+1} \left(1 - \left(\frac{\zeta}{\zeta_b} \right) \right)^{\alpha+1} = \frac{R^{\alpha+1}}{\alpha+3} \frac{1}{1-\phi} \left(\frac{\Delta P_0}{2m} \right)^\alpha t_b \left(1 - \frac{t}{t_b} \right) \quad (3.67)$$

(3.65) eşitliği (3.67)' de yerine yazılacak olursa,

$$\frac{1}{\phi(\alpha+1)} \phi^{\alpha+1} \zeta_b^{\alpha+1} \left(1 - \left(\frac{\zeta}{\zeta_b}\right)\right)^{\alpha+1} = \frac{R^{\alpha+1}}{\alpha+3} \frac{1}{1-\phi} \left(\frac{\Delta P_0}{2m}\right)^{\alpha} \left(1 - \frac{t}{t_b}\right)^{\alpha+3} \frac{z_0^{\alpha+1}}{R^{\alpha+1}} \frac{1-\phi}{\phi} \left(\frac{\Delta P_0}{2m}\right)^{-\alpha} \quad (3.68)$$

$$\frac{\zeta}{\zeta_b} = 1 - \left(1 - \frac{t}{t_b}\right)^{\frac{1}{\alpha+1}} \quad (3.69)$$

$$\frac{z - z_0}{1-\phi} = \zeta \text{ olduğundan}$$

$$\frac{z - z_0}{\zeta_b(1-\phi)} = 1 - \left(1 - \frac{t}{t_b}\right)^{\frac{1}{\alpha+1}} \quad (3.70)$$

$$\frac{z}{\zeta_b} = 1 - (1-\phi) \left(1 - \frac{t}{t_b}\right)^{\frac{1}{\alpha+1}} \quad (3.71)$$

yazılır. (3.69) ve (3.71) eşitlikleri sırasıyla U_b ve U_i ' yi elde etmeye yarayacaktır. Bu eşitlikleri zamana göre sırasıyla türevlenecek olursa (3.74) ve (3.77) eşitliklerine ulaşılır.

$$\frac{1}{\zeta_b} \frac{d\zeta}{dt} = -\frac{1}{\alpha+1} \left(1 - \frac{t}{t_b}\right)^{-\frac{\alpha}{\alpha+1}} \left(-\frac{1}{t_b}\right) \quad (3.72)$$

$$\frac{d\zeta}{dt} = \frac{1}{\alpha+1} \left(\frac{\zeta_b}{t_b}\right) \left(1 - \frac{t}{t_b}\right)^{-\frac{\alpha}{\alpha+1}} \quad (3.73)$$

$$\frac{d\zeta}{dt} = U_b \text{ ve } \frac{\zeta_b}{t_b} = U_i \text{ idi}$$

$$\frac{U_b}{U_i} = \frac{1}{\alpha+1} \left(1 - \frac{t}{t_b}\right)^{-\frac{\alpha}{\alpha+1}} \quad (3.74)$$

$$\frac{1}{\zeta_b} \frac{dz}{dt} = -\frac{1}{\alpha+1} (1-\phi) \left(1 - \frac{t}{t_b}\right)^{-\frac{\alpha}{\alpha+1}} \left(-\frac{1}{t_b}\right) \quad (3.75)$$

$$\frac{dz}{dt} = \frac{1}{\alpha+1} \left(\frac{\zeta_b}{t_b} \right) (1-\phi) \left(1 - \frac{t}{t_b} \right)^{-\frac{\alpha}{\alpha+1}} \quad (3.76)$$

$$\frac{dz}{dt} = U_l \text{ ve } \frac{\zeta_b}{t_b} = U_i \text{ idi}$$

$$\frac{U_l}{U_i} = \frac{1-\phi}{\alpha+1} \left(1 - \frac{t}{t_b} \right)^{-\frac{\alpha}{\alpha+1}} \quad (3.77)$$



4. MATERYAL ve METOD

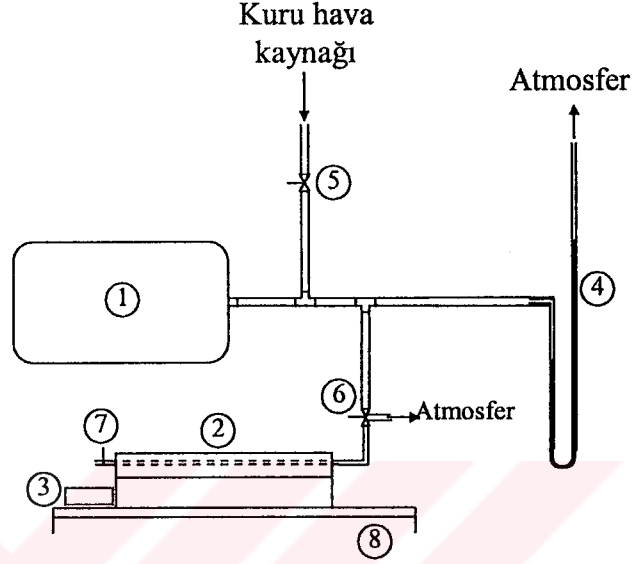
4.1. Deney Düzenegi

Gaz yardımı ile yer değiştirme olayının gerçekleştirildiği deney düzenegi şematik olarak şekil-4.1' de görülmektedir. (8) nolu platform üzerine yerleştirilmiş ve su terazisi ile denge konumu ayarlanmış olan deney düzenegi yatay düzlemle 0° lik bir açıya sahiptir. Deney düzenegi temel olarak sıvı içerisine gaz enjeksiyonunun yapıldığı su ceketı, kuru hava tankı ve bir U manometresi ile bunlar arasındaki bağlantıyı sağlamak üzere kullanılan silikon hortumlardan oluşmaktadır. Deneysel çalışmanın farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilebilmesi için (2) nolu cekete ihtiyaç duyulmuştur. Su ceketinde, giriş ve çıkış noktaları yardımıyla sürekli aynı sıcaklıkta su gönderebilme imkanı vardır. Su kaynağı olarak Grant marka sirkülasyonlu su banyosu kullanılmıştır. Su ceketı içerisinde, şekil-4.1' de kesikli çizgilerle belirtilmiş olan 5.3 mm iç çapa sahip saydam cam boru bulunmaktadır. Bu cam borular 5 cm'lik gridler halinde ölçülendirilerek sıvı içerisinde akacak olan gazın akış hızının boru boyunca değişimini takip edebilme imkanı sağlanmıştır. Cam boru su ceketine rahatlıkla takılıp sklebilmektedir. Cam boru ile ceket arasında kalan bölgelerden su sızmasını önlemek amacı ile contalar kullanılmıştır. Cam boru, tam olarak 55 cm uzunlukta olup bunun 52.5 cm'lik kısmı sıvı ile doldurulmakta ve su ceketinde sabit sıcaklık bölgesinde kalmaktadır.

Kuru hava kaynağı olarak, %79 N₂ -%21 O₂ bileşime sahip basınçlı gaz bulunduran kuru hava tüpü kullanılmıştır. Deneysel çalışmada dikkate alınan çalışma basınçları, basınçlı tüpteki havanın basıncından oldukça düşük olduğundan ikinci bir tanka (1) ihtiyaç duyulmuştur. (4) nolu U manometresi yardımıyla istenilen basınçta hava (1) nolu kuru hava tankına alınıp daha sonra cam borudaki sıvı içerisine enjekte edilmektedir. Kullanılan U manometresi ölçekli olup, hava tankına alınan havanın basıncı okunabilmektedir. Tanka alınan havanın fazla olması durumunda, (6) nolu üç yollu vana kullanılarak fazla hava dışarı atılmaktadır. (6) nolu vana aynı zamanda tanktaki havanın cam boru içerisine gönderilmesi için de kullanılmaktadır.

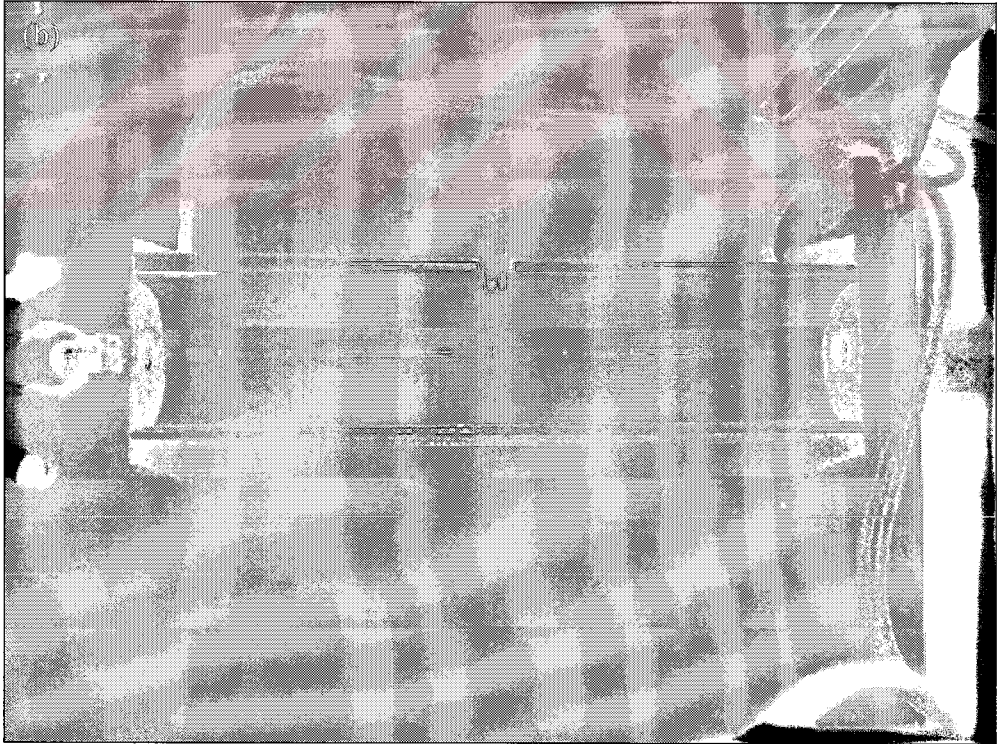
(3) nolu analitik terazi kullanılarak gaz enjeksiyonun başından sonuna dek cam borudan dışarı atılan sıvı miktarının toplam kütlesi ölçülmektedir.

Deney düzeneği 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 ve 3.0 psig basınçlarda ve 20, 30, 40, 50 ve 60 C° sıcaklıklarda çalışmaya uygun olarak tasarlanmıştır. Ayrıca belli ölçüler dahilinde farklı çalışma şartlarında da kullanılabilir.



Şekil-4.1: Gaz yardımı ile yer değiştirme olayının gerçekleştirildiği deney düzeneği. (1) Kuru hava tankı, (2) Sirkülasyonlu su ceketı, (3) Dijital terazi, (4) U manometresi, (5), (6) vanalar, (7) Klips, (8) Platform.

Deneyisel çalışmanın amacına uygun ölçümleri alabilmek amacıyla, deney düzeneğinin hazırlanışı sırasında farklı çalışma şartlarında ön deneme niteliğinde ölçümler yapılmıştır. Bu ölçümler sırasında, kullanılan cam borunun ucu atmosfere açık iken sıvı içerisinde akan gazın hızını akış hızını gözlemleyebilmek oldukça güç olmuştur. Bu nedenle akışkanın akış hızını azaltacak bir engel kullanılarak daha rahat ve sağlıklı gözlem yapılabileceğine karar verilmiştir. Bu amaçla da Şekil-4.1’ de görülen düzenekteki (7) nolu klips yardımıyla boru ucu bir miktar daraltılmış olarak atmosfere açık hale getirilmiştir. Deneyisel çalışmaların hepsinde de bu açıklık oranı sabit tutularak eşdeğer çalışma şartları oluşturulmuştur. Resim-4.1’de deney düzeneğine ait fotoğraflar görülmektedir.



Şekil-4.2: Deney düzeneğine ait fotoğrafik görüntüler. (a) deney düzeneğinin önden görünüşü, (b) sirkülasyonlu su ceketi ve içerisinde takılı durumda bulunan cam boru.

4.2. Polimer Çözeltilerinin Hazırlanması

Yapılan bu tez çalışmasında, içerisine gaz (hava) enjekte edilen sıvı faz olarak toz haldeki hazır polimerlerin çözeltileri kullanılmıştır. Bu kimyasallar Fluka marka CMCNa (karboksimetilseluloz sodyum) tuzu ve HECNa (hidroksietilseluloz sodyum) tuzudur. Bu kimyasalların seçilmesindeki gaye, bu kimyasallardan hazırlanan sulu çözeltilerin oldukça viskoz davranış sergilemeleridir. Deneylerde her bir kimyasal için kütlece % 2.0, 2.5, 3.0 ve 3.5 lik konsantrasyonlarda çözeltiler hazırlanmıştır.

Deneylerde kullanılan CMCNa polimer çözeltileri için süstitüsyon derecesi 0.70-0.85 olan % 99.5 saflıkta kuru sodium carboxymethylcellulose içeren CMCNa tuzu kullanılmıştır, ambalajın max % 5 nem içeriğine sahip olduğu üretici firma tarafından belirtilmiştir. Ayıca 25 °C de %4 lük sulu çözeltisi 400-800 mPa.s viskoziteye sahiptir. Kullanılan HECNa tuzu ise, % 99.5 saflıkta kuru sodium hydroxyethylcellulose (HECNa) içermektedir. Ambalaj max % 5 nem içeriğine sahip olup, 20 °C de %5 lik sulu çözeltisi ~4000 mPa.s viskoziteye sahiptir. Çözeltiler Tablo-4.1' de verilmiş olan ölçülere göre hazırlanmıştır.

Tablo-4.1: Hazırlanan CMCNa ve HECNa çözeltileri konsantrasyonları.

Kimyasal Adı	CMCNa				HECNa			
% konsantrasyon (kütlece)	2.0	2.5	3.0	3.5	2.0	2.5	3.0	3.5
Miktar (g madde/ g çözelti)	2.116	2.645	3.174	3.703	2.116	2.645	3.174	3.703

Çözeltiler hazırlanırken aşağıdaki işlemler gerçekleştirilmiştir.

1. İstenilen konsantrasyon hazırlanacak çözelti miktarına göre gerekli miktarda kimyasal alınır.
2. Bir behere bir miktar saf su (hazırlanacak çözelti miktarının yarısı kadar) konur.
3. Beherin içerisine karıştırıcı çubuğu daldırılır ve ortam sıcaklığında (~20 C°) düşük devirde karıştırıcı çalıştırılır. (Karıştırma amacı ile IKA-WERK RE-166 marka devri ayarlanabilir mixer kullanılmıştır.)

4. Tartılmış kimyasal beherdeki suya yavaş yavaş dökülür.
5. Karıştırıcı devri, çözelti kıvamının artmasına göre artırılır.
6. Kimyasalın tamamı boşaltıldıktan sonra 12 saat süre ile yüksek devirde karıştırmaya devam edilir.

4.3. Çözeltilerinin Viskozitelerinin Ölçülmesi

Yapılan deneysel çalışma sonucu elde edilen verileri kullanarak boyutsuz Ca sayısını hesaplayabilmek için bir önceki kısımda belirtilen ölçülere ve prosedüre göre hazırlanmış olan CMCNa ve HECNa çözeltilerinin viskozite bilgilerine gerek duyulmaktadır. Bu amaçla bu akışkanların hem viskozitelerini ölçmek hem de viskoz davranışlarını belirlemek için Brookfield Marka RVDV-II+ model programlanabilir dijital döner viskozimetre kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında kullanılan sıvı akışkanların viskoz davranışını ve akışkan tipini belirlemek için farklı kayma hızlarında akışkanın viskozite ve kayma gerilmesi değerleri ölçülmüş ve değerlendirilmiştir.

4.4. Çözeltilerin Yüzey Gerilim ve Yoğunluklarının Ölçülmesi

Deneysel çalışmada kullanılan CMCNa ve HECNa tuzlarının çözeltilerinin yüzey gerilimlerini ölçmek amacıyla halka koparma metoduna göre ölçüm yapan WHITE marka kadranlı yüzey gerilim cihazı kullanılmıştır. Yoğunluk tayinleri ise piknometrik yöntemle gerçekleştirilmiştir.

4.5. Verilerin Değerlendirilmesi

Polimer çözeltisi ile doldurulmuş olan cam boru içerisine, Şekil-4.1' de görülen 6 nolu vana açılarak hava enjekte edildiği andan cam borunun atmosfere açık ucundan havanın dışarı çıktığı ana kadar kronometre ile geçen süre ölçülmüştür. Aynı zaman da, havanın cam boru üzerindeki her bir gridi (5 cm'lik ölçüler) geçiş süresi de ölçülmüştür. Her bir noktadan geçiş sürelerine göre gazın sıvı içerisindeki geçiş hızı tayin edilmiş ve bu hızlardan ortalama gaz akış hızı hesaplanmıştır.

Sıvı içerisine gaz enjeksiyonu yapılırken gazın önünde ileri doğru sürüklenen ve cam borunun atmosfere açık ucundan dışarı atılan sıvı, darası belli olan bir kapsülde biriktirilerek kütlesi ölçülmüştür. Başlangıçta cam boru içerisine doldurulan sıvı miktarı, cam borunun boyutları ve sıvının yoğunluğu dikkate alınarak hesaplanmıştır. Başlangıçtaki sıvı miktarı ile dışarı atılan sıvı miktarı arasındaki fark cam boru cidarlarında kalan sıvı miktarına karşılık gelmektedir.

Aşağıdaki eşitlik (2.6 eşitliği) doğrudan boru cidarında biriken sıvı fraksiyonun hesaplanmasında kullanılmıştır. Sıvının fiziksel özellikleri ve gazın sıvı içerisindeki akış hızı dikkate alınarak Capillary, $Ca = \mu u_b / \sigma$, sayısı hesaplanmıştır ve Ca sayısına karşılık m sıvı fraksiyonunun değişimi farklı sıcaklıklarda ve zlti konsantrasyonlarında gözlemlenmiştir.

$$m = 1 - \frac{w}{\pi R_o^2 L \rho_f} \quad (2.6)$$

Burada, m; boru duvarında biriken sıvı fraksiyonu, w; boru dışına atılan sıvı kütlesi, R_o ; boru iç yarıçapı, L; boru içerisine doldurulan sıvı uzunluğu ve ρ_f ; viskoelastikakışkanın yoğunluğuna karşılık gelmektedir.

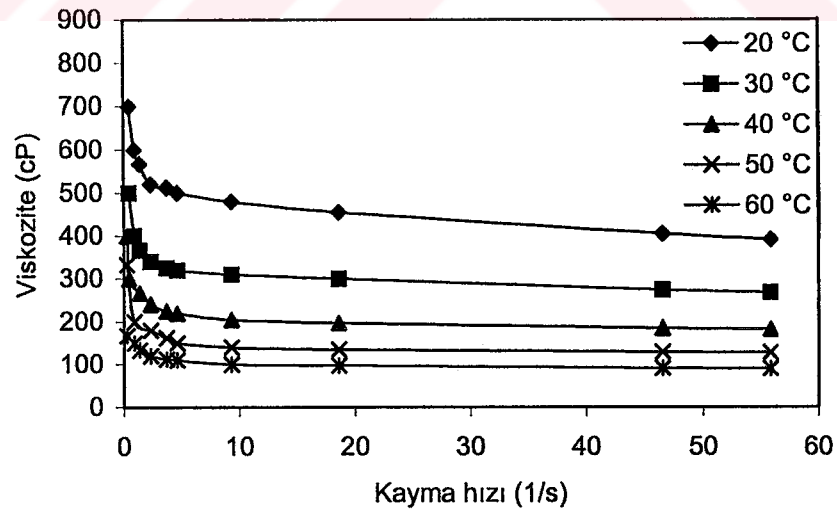
5. SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Gaz yardımı ile yer değiştirme olayı endüstriyel olarak gaz yardımı ile enjeksiyon kalıplama prosesine temel teşkil ettiği için gaz-sıvı ikili sisteminde kullanılan sıvı akışkanın farklılığı, uygulanan gaz basıncının farklılığı ve sıcaklık gibi parametreler yer değiştirme olayı üzerinde oldukça etkilidir. Bu tez çalışmasında CMCNa ve HECNa tuzlarından hazırlanan polimer çözeltilerinin hava yardımı ile yer değiştirmesi olayından elde edilen sonuçlar bu bölümde irdelenecektir.

5.1. Akışkanların Reolojik Özelliklerinin Belirlenmesi

Sıvı akışkan olarak kullanılan CMCNa ve HECNa tuzlarının %2.0, %2.5, %3.0 ve %3.5' lik konsantrasyonlardaki sulu çözeltilerinin farklı sıcaklıklardaki viskoz davranışlarını ortaya koymak için yapılan ölçüm sonuçları bu kısımda tartışılacaktır.

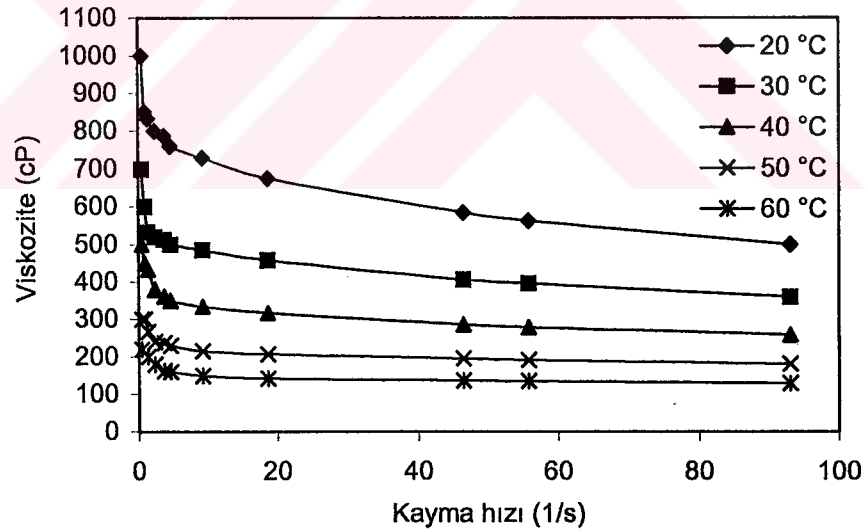
Şekil-5.1' de %2.0' lik CMCNa çözeltisinin kayma hızı-viskozite değişimi farklı sıcaklıklar için bir arada görülmektedir. Düşük kayma hızı bölgesi bu akışkanın tipini belirlemek için yeterli veri içermektedir. Kayma hızındaki artış ile asimptotik



Şekil-5.1: %2.0' lik CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.

olarak azalan bir viskozite değişimi pseudo plastik akışkan tipine karşılık gelmektedir. Burada da bu tür bir davranış görülmektedir. Kısım 5.2’ de verilecek olan deneysel çalışma verilerinin değerlendirmesinde kullanılmak üzere burada bahsedilen çözeltilerin sıfır kayma hızındaki viskoziteleri kullanılmıştır. Burada 20 °C için bu değer 825 cP iken 60 °C’ de 173 cP’ dir. Artan sıcaklıkla sıvıların viskozitelerinin azalması şeklindeki karakteristik davranış burada da görülmektedir. Ancak artan kayma hızı ile viskozitedeki azalma düşük sıcaklıklarda (20 °C ve 30 °C) devam ederken daha yüksek sıcaklıklarda kayma hızındaki artışa bağlı olarak viskozitedeki azalma daha az olmaktadır.

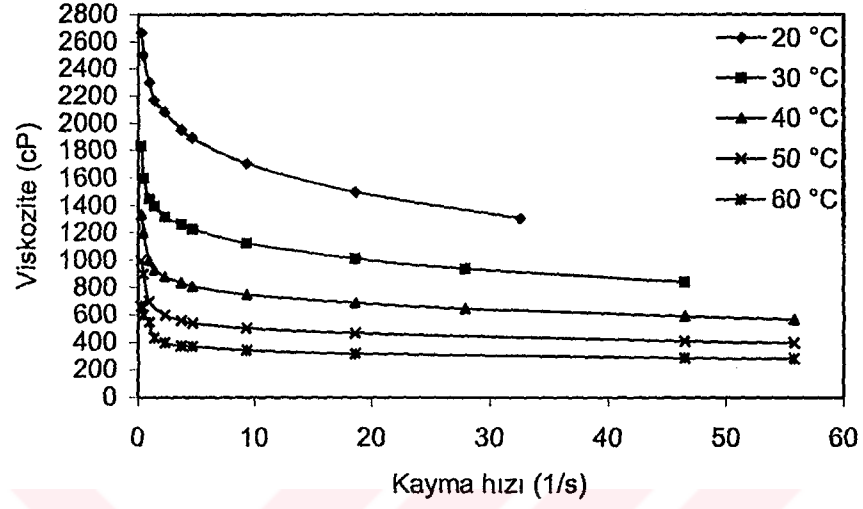
%2.5’ lik CMCNa çözeltilisinin farklı sıcaklıklarda, kayma hızı ile viskozitesinin değişimi Şekil-5.2’ de görülmektedir. Bu çözelti de bütün sıcaklıklarda pseudo plastik davranışı göstermektedir. Konsantrasyon artışına bağlı olarak viskozitedeki artış grafikten görülebilmektedir. %2.0’ lık çözelti için sıfır kayma hızındaki viskozite 825 cP iken %2.5’ lik için bu viskozite değeri 1100 cP’ a karşılık gelmektedir.



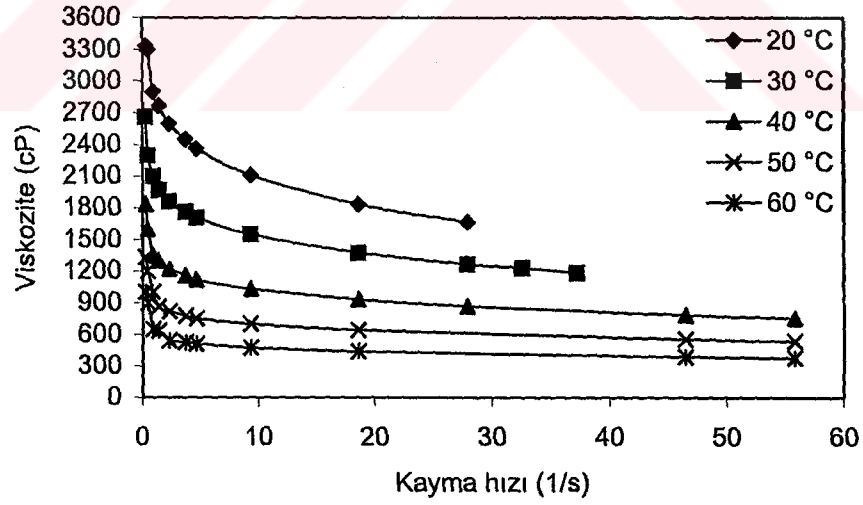
Şekil-5.2: %2.5’ lik CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.

Sırasıyla aşağıda verilmiş olan %3.0 ve %3.5’ lik konsantrasyonlardaki CMCNa çözeltileri için de yukarıdaki ifadeler geçerlidir. Yani bu akışkanlar bütün sıcaklıklarda

pseudo plastik davranışı sergilemektedirler. Ayrıca sıcaklıktaki artmaya bağlı olarak çözelti viskozitesinde azalma olmaktadır.



Şekil-5.3: %3.0' lık CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.

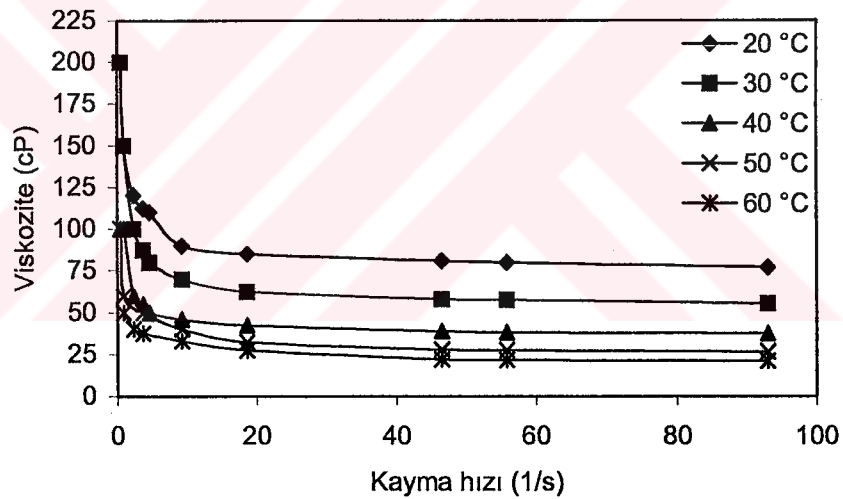


Şekil-5.4: %3.5' lik CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.

Bütün grafikler bir arada düşünülecek olursa konsantrasyondaki artışa bağlı olarak çözelti viskozitesinde artma olduğu görülecektir. Ayrıca konsantrasyon artışına bağlı olarak, düşük sıcaklıklarda kayma hızının artmasıyla viskozitedeki azalma oldukça belirgindir. Sıcaklığın artması ile viskozitedeki değişim daha erken bir kayma hızında sıfıra yaklaşmaktadır. Örneğin %3.5' lik çözelti için 20 °C sıcaklıkta 20-30 s⁻¹ kayma hızları arasındaki viskozite farkı, aynı kayma hızı aralığında 60 °C sıcaklıktakinden daha yüksektir. Sıcaklıktaki artma ile viskoziteler arasındaki bu fark düşmektedir.

Bu çalışmada kullanılan diğer çözeltiler ise HECNa tuzundan hazırlanmış olan %2.0, %2.5, %3.0 ve %3.5' lik konsantrasyonlardaki çözeltilerdir.

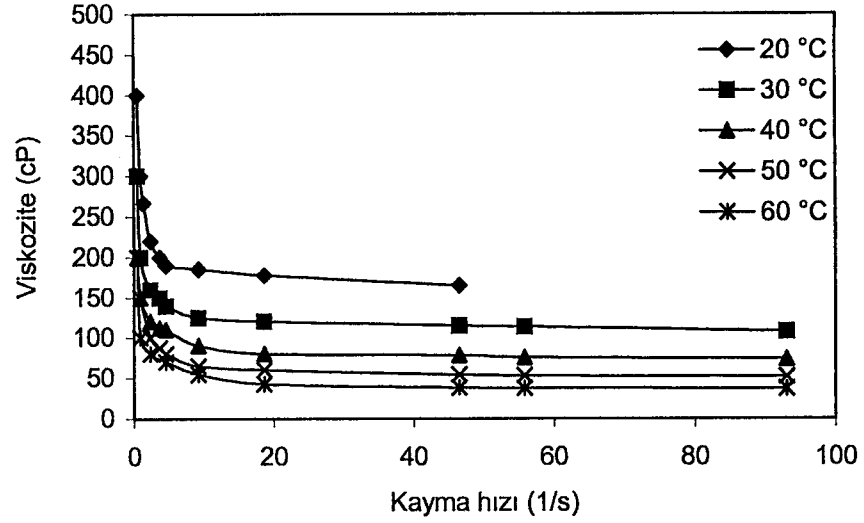
Şekil-5.5' de %2.0' lik HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda kayma hızı ile çözelti viskozitesindeki değişim görülmektedir.



Şekil-5.5: %2.0' lik HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.

%2.0' lik HECNa çözeltisi aynı konsantrasyondaki CMCNa çözeltisine göre daha düşük bir viskoziteye sahiptir. CMCNa çözeltilerinde olduğu gibi HECNa çözeltisi de pseudo plastik akışkan davranışı göstermektedir.

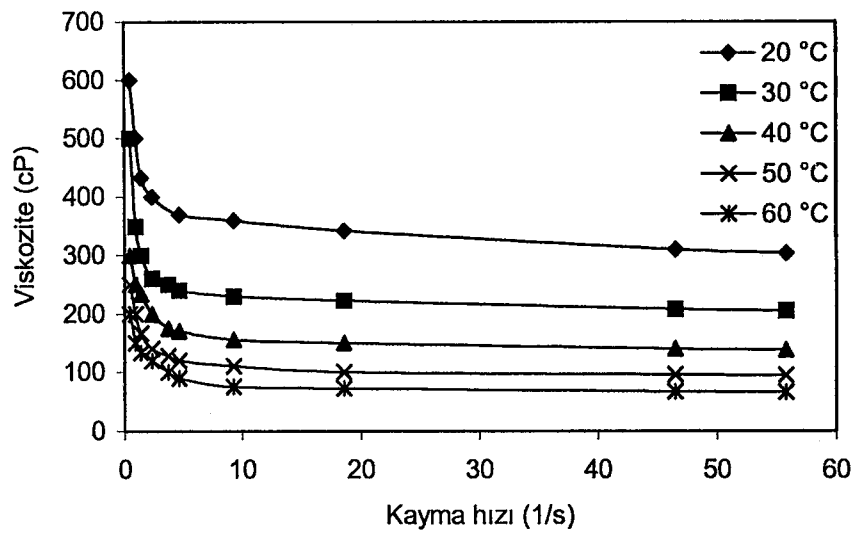
Şekil-5.6, %2.5' lik HECNa çözeltisi için kayma hızı-viskozite eğrilerini göstermektedir. Ancak artan sıcaklıkla viskozite eğrileri, CMCNa çözeltilerine göre



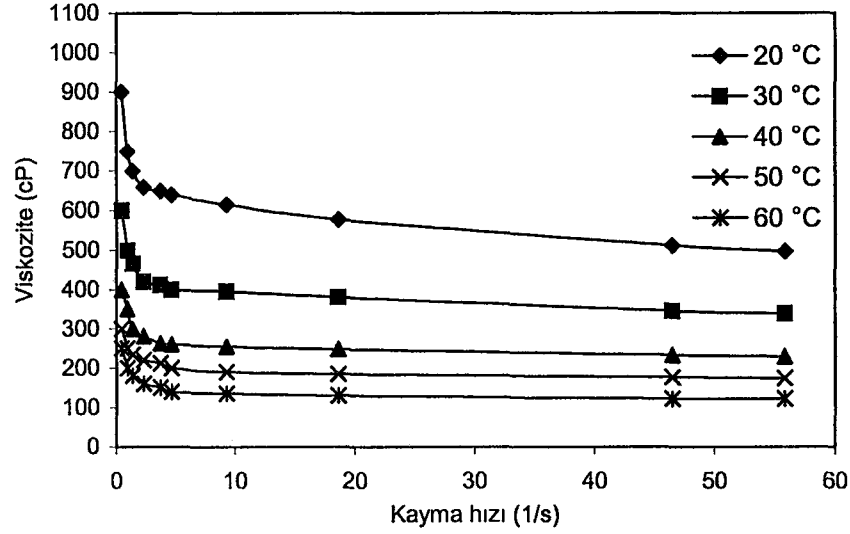
Şekil-5.6: %2.5' lik HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.

birbirlerine daha da yaklaşmaktadırlar. Bu da HECNa çözeltilerinin, CMCNa çözeltilerine göre daha düşük viskoziteye sahip olmasından kaynaklanmaktadır.

Şekil-5.7 ve Şekil-5.8 sırasıyla %3.0 ve %3.5' lik HECNa çözeltilerinin viskozite eğrilerini göstermektedir. Daha önceki polimer çözeltilerinde olduğu gibi bu polimer çözeltileri de pseudo plastik davranışı göstermektedirler.



Şekil-5.7: %3.0' lik HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.



Şekil-5.8: %3.5' lik HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda çözelti viskozitesinin kayma hızı ile değişimi.

Bu iki farklı polimerden hazırlanmış olan farklı konsantrasyonlardaki çözeltilere ait üs kanunu sabitleri ve bunlara ait güvenilirlik sınırları EK-2' de verilmiştir.

CMCNa çözeltileri için sabit bir konsantrasyonda artan sıcaklıkla ve sabit bir sıcaklıkta artan konsantrasyonla akış indekslerinde çok büyük farklar görülmemektedir. Örneğin %2.0' lik CMCNa çözeltisi için, 20 °C' de akış indeksi değeri 0.89 iken 30 °C' de 0.89, 40 °C 0.90 ve 50 ve 60 °C sıcaklıklarda sırasıyla 0.84 ve 0.88 olmaktadır.

20 °C' de, %2.0, %2.5, %3.0 ve %3.5' lik CMCNa çözeltileri için akış indeksi değerleri sırasıyla 0.89, 0.89, 0.86 ve 0.85 olmaktadır.

Ayrıca k kıvamlılık indeksi değerleri, sabit bir konsantrasyonda artan sıcaklıkla azalmaktadır. %3.0' lik CMCNa için 20, 30, 40, 50 ve 60 °C sıcaklıklarında kıvamlılık indeksi değerleri sırasıyla $228300 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-2}$, $148600 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-2}$, $103400 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-2}$, $73950 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-2}$ ve $50190 \text{ g cm}^{-1} \text{ s}^{-2}$ olmaktadır.

Benzer yaklaşımla, artan çözelti konsantrasyonu ile kıvamlılık indeksi de artış göstermektedir.

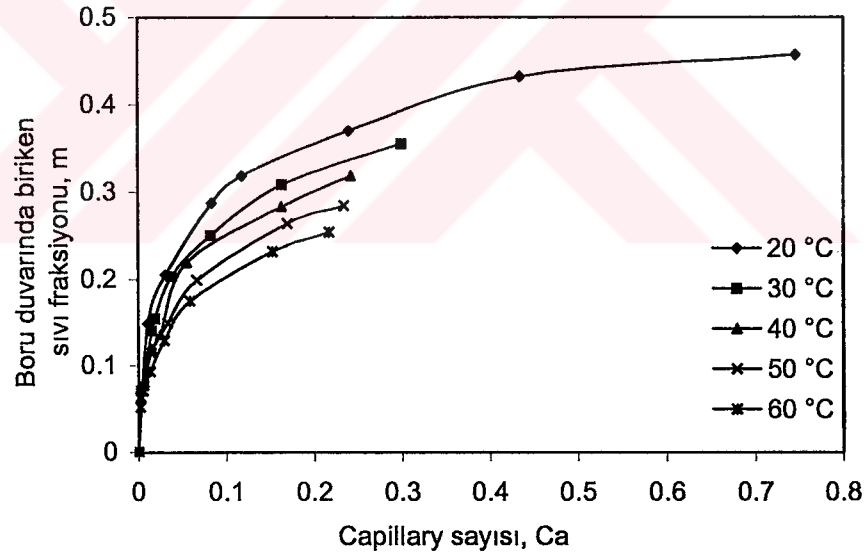
CMCNa çözeltilerinin akış indeksi ve kıvamlılık indeksi sabitlerinde görülen yukarıdaki trend HECNa çözeltilerinde de aynı şekilde görülmektedir.

5.2. Gaz Yardımı ile Yer Değiştirme Deneyleri

5.2.1. Hava-CMCNa Çözeltisi Sistemi

Hava-CMCNa tuzu çözeltisi sistemi için gaz yardımı ile yer değiştirme deneyleri %2.0, %2.5, %3.0, %3.5' lik konsantrasyonlarda hazırlanan çözeltiler kullanılarak 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5 (ve 3.0) psig basınçlarındaki hava yardımı ile 5.3 mm iç çapa sahip cam borularda gerçekleştirildi. Her bir deney 20, 30, 40, 50 ve 60 °C sıcaklıklarda beş tekrarlı olarak gerçekleştirildi. Deneyler sonucunda elde edilen verilerden Ca sayısına bağlı olarak boru cidarında biriken sıvı fraksiyonu hesaplandı.

Şekil-5.9, %2.0' lık CMCNa çözeltisinin hava yardımı ile yer değiştirmesi sonucu boru duvarında biriken sıvı fraksiyonunun Ca sayısı ile değişimini göstermektedir.



Şekil-5.9: %2.0 CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

Sabit bir sıcaklıkta, %2.0' lık CMCNa çözeltisinin gaz yardımı ile yer değiştirmesi olayında artan basıncın fonksiyonu olarak artan gaz hızı ve dolayısıyla da artan Ca sayısı ile boru duvarında biriken sıvı fraksiyonunda artma görülmektedir. Buradaki artış lineer olmayıp asimptotik bir artış şeklindedir. Bu asimptotik artış, Ca sayısındaki artma

ile azalmaktadır ve belli bir Ca sayısından sonra değişmemektedir. 20 °C' de %2.0' lık CMCNa çözeltisi için Ca sayısının 0.74 değerinde m sıvı fraksiyonu 0.46 değerini almaktadır.

Artan sıcaklığa bağlı olarak boru cidarında biriken sıvı fraksiyonu azalma göstermektedir. Ca=0.2 durumunda, 20, 30, 40, 50 ve 60 °C' de m sıvı fraksiyonu değerleri sırasıyla 0.35, 0.32, 0.30, 0.27 ve 0.25 olmaktadır. Artan sıcaklıkla sıvı fraksiyonundaki azalmanın şundan kaynaklandığı düşünülmektedir. Gaz kabarcığı, sıvı içerisinde hareket ederken daha önce bahsedilmiş olan birincil gaz penetrasyonu basamağını oluşturarak ilerlemektedir (Bkz. Şekil-1.3). Bu penetrasyon sırasında sıvı içerisindeki gaz kabarcığının kalınlığı, boyutsuz Ca sayısını oluşturan U_b gaz kabarcığı hızı, μ , sıvı akışkan viskozitesi ve σ , gaz-sıvı ara yüzey gerilmesi gibi parametrelere bağlıdır. Artan sıcaklıkla, sıvı viskozitesindeki azalma ile, gaz kabarcığı ile boru cidarı arasında kalan sıvı tabakasına gazın tesiri daha rahat olmaktadır. Daha açık olarak ifade edilecek olursa, sıcaklıktaki artma ile akışkanın viskozitesindeki azalmaya bağlı olarak oluşan kayma gerilmesi azalması ile boru duvarından sıvı akışkana olan momentum aktarımında da azalma olmaktadır. Bu da gaz kabarcığı tarafından daha fazla sıvının sürüklenmesine neden olmaktadır. Bu da gaz kabarcığı ile boru duvarı arasında kalan sıvı filminin daha ince olması demektir. Diğer taraftan kabarcık burnu karşısında akış yönüne zıt yönde oluşan normal gerilme azalması, gaz kabarcığının çapında düşmeye yani gaz kabarcığının daha ince bir şekilde akmasına neden olmaktadır. Bu durumda kayma gerilmesindeki azalma ile daha ince bir sıvı filmi oluşurken normal gerilme azalması ile daha kalın bir sıvı filmi oluşmaktadır. Sabit bir sıcaklıkta akışkan içindeki kayma gerilmesi ve normal gerilme azalması sonucu oluşacak sıvı filmi kalınlığındaki değişim Ro ve Homsy (1995) tarafından yapılan bir analizde de dile getirilmiştir.

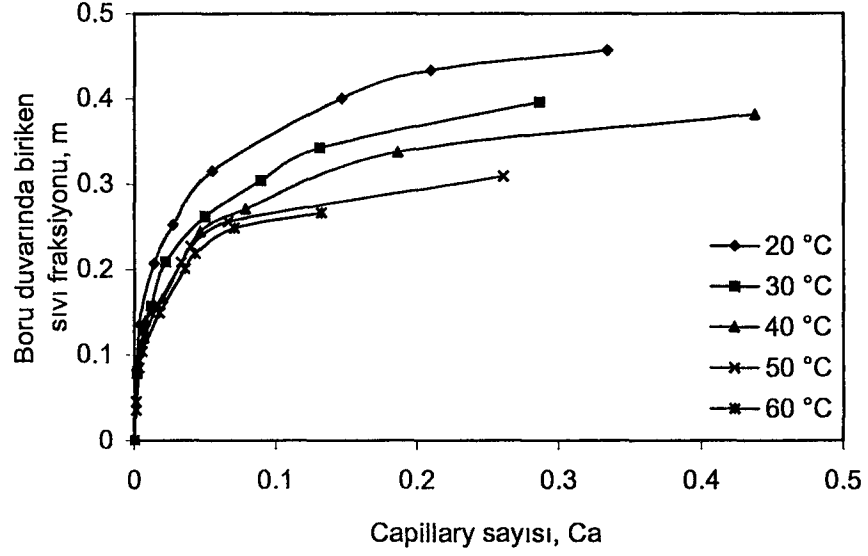
Denilebilir ki, kayma gerilmesi azalması ile normal gerilme azalmasının sıvı fraksiyonu üzerindeki etkileri birbirleri ile zıt yönde yarışan etkilere sahiptir. Hangisinin daha etkin olduğu ancak akışkan içerisindeki normal gerilme büyüklüklerinin tayin edilmesi ile mümkün olacaktır. Ancak Ek-1' deki veriler dikkate alınacak olursa sıcaklıktaki birim değişim başına viskozitede, dolayısıyla da kayma gerilmesindeki azalma, ara yüzey gerilmesindeki azalmadan daha fazla olmaktadır. Aksi düşünülecek olursa, yani sıcaklıktaki azalma ile bu yaklaşımın aksi ifade edilebilir. Aşağıda Şekil-5.10' daki resim, cam boru içerisindeki CMCNa çözeltisi içinde sola doğru hareket eden gaz

kabarcığının akışını göstermektedir. Resimden de görüldüğü üzere gaz kabarcığı mermi gibi bir şekil alarak ilerlemektedir ve ardında çok ince bir sıvı filmi bırakmaktadır. Bu filmin kalınlığı akışkanın özelliklerine ve çalışma şartlarına bağlı olarak hareket eden bu kabarcığın çapı ile değişmektedir.



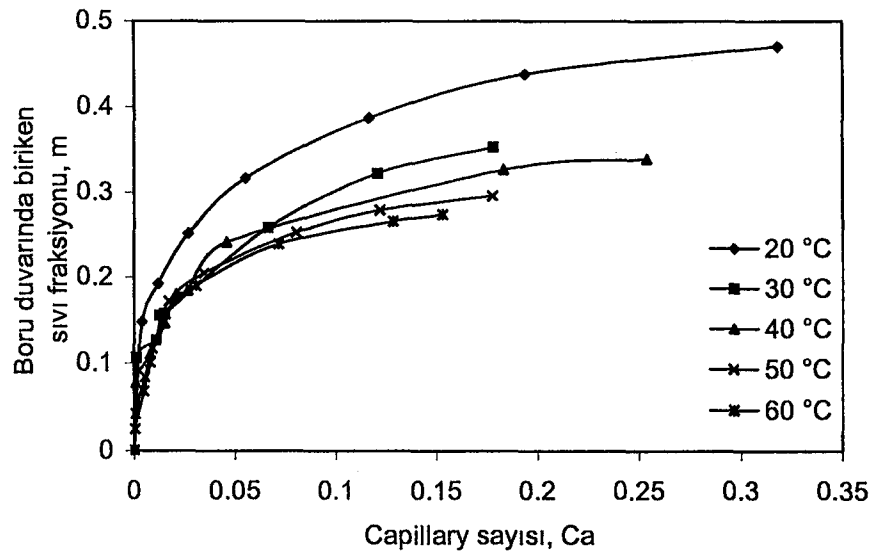
Şekil-5.10: İçine CMCNa çözeltisi doldurulmuş cam boru içerisindeki gaz kabarcığının hareketi.

Şekil-5.11, %2.5' lik CMCNa çözeltisi için Ca sayısı ile m sıvı fraksiyonunun değişimini göstermektedir. Yukarıda Şekil-5.9'da %2.0' lık CMCNa çözeltisi için ifade edilen trend burada da görülmektedir. Ca sayısındaki artmayla m sıvı fraksiyonu asimptotik olarak artmaktadır ve bu artış daha büyük Ca sayılarında sabit bir değere doğru ilerlemektedir. Ayrıca artan sıcaklıkla m sıvı fraksiyonunda azalma burada da görülmektedir. Burada $Ca=0.2$ durumunda, 20, 30, 40, 50 ve 60 °C' de m sıvı fraksiyonu değerleri sırasıyla 0.43, 0.36, 0.34, 0.29 ve 0.27 olmaktadır. %2.0' lık CMCNa çözeltisi ile kıyaslanacak olursa konsantrasyondaki artışa bağlı olarak sıvı fraksiyonunda artma olmaktadır. Bu konu sabit sıcaklıkta boru cidarında biriken sıvı fraksiyonunun Ca sayısının fonksiyonu olarak farklı konsantrasyonlarda grafiğe geçirilerek daha geniş bir şekilde açıklanmaya çalışılacaktır.

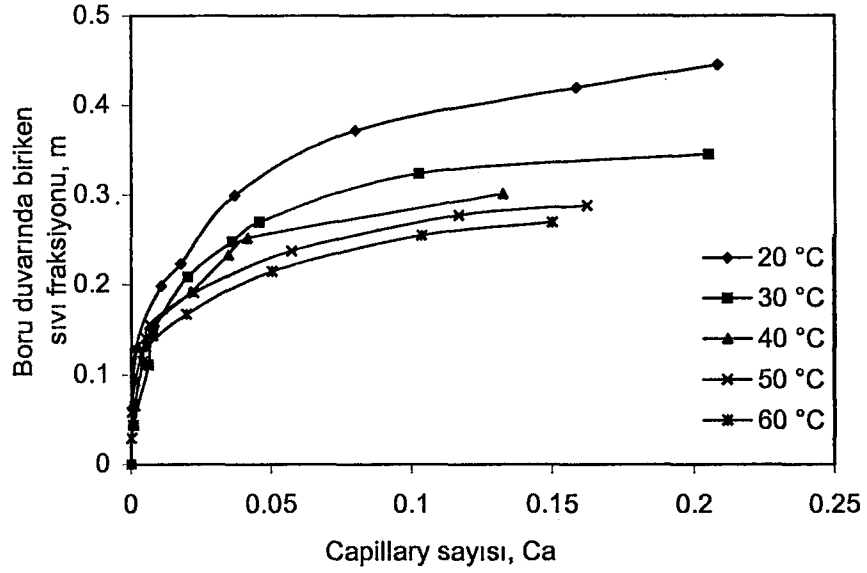


Şekil-5.11: %2.5 CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

Şekil-5.12 ve Şekil-5.13 sırasıyla %3.0 ve %3.5' lik konsantrasyonlardaki CMCNa çözeltileri için farklı sıcaklıklarda m sıvı fraksiyonunun Ca sayısı ile değişimini göstermektedir. Şekillere dikkat edilecek olursa düşük Ca sayısı bölgelerinde ($Ca < 0.01$) daha sık görülen farklı sıcaklık eğrilerindeki girişimler Ca sayısının daha büyük değerlerinde ($Ca > 0.1$) görülmemektedir. Bu durum düşük akış hızlarında akışkanın Newtonian akışkan gibi davranışından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu durum daha sonra tartışılacaktır.

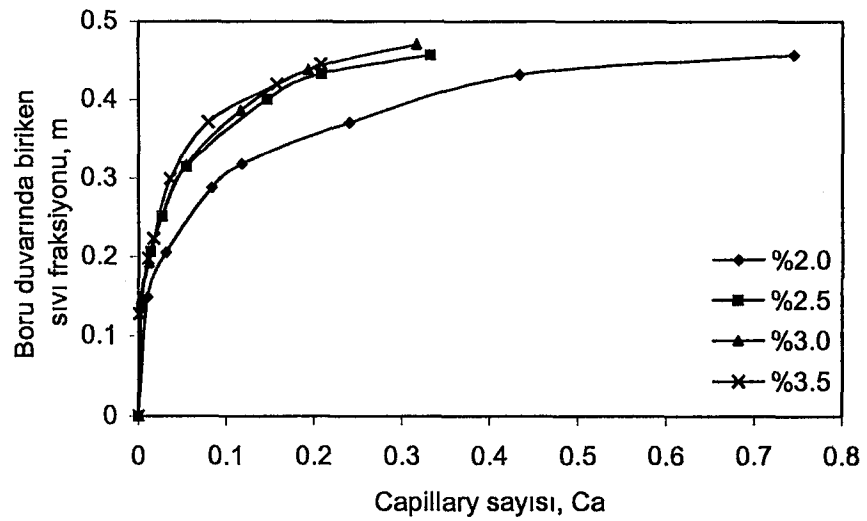


Şekil-5.12: %3.0 CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.



Şekil-5.13: %3.5 CMCNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

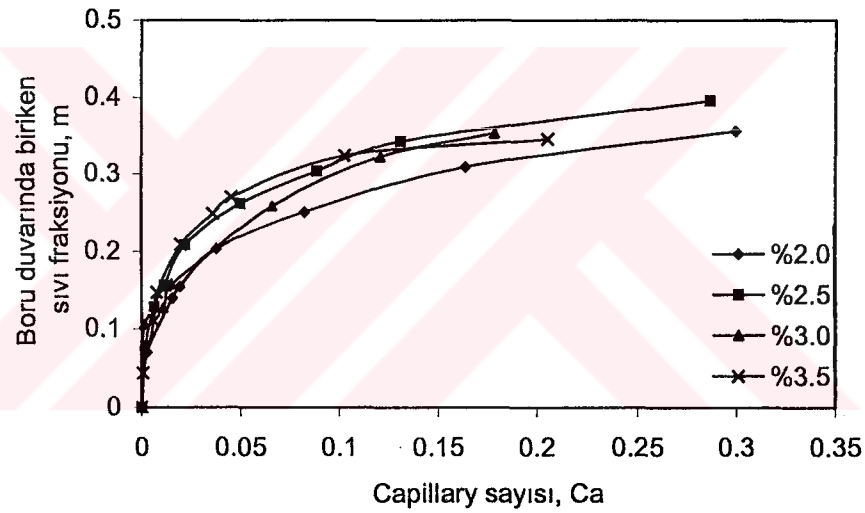
Şekil-5.14 farklı konsantrasyonlardaki CMCNa çözeltilerinin 20 °C sabit sıcaklıkta, Ca sayısı ile m sıvı fraksiyonu arasındaki ilişkisini göstermektedir. %2.0' lık CMCNa çözeltisinin diğer üç konsantrasyondaki (%2.5, %3.0 ve %3.5) çözeltilere göre daha düşük bir sıvı fraksiyonuna sahip olduğu görülmektedir. Buna karşın %2.5, %3.0 ve %3.5' lik çözeltilerin hemen hemen aynı fraksiyon oranlarına karşılık gelen eğriler



Şekil-5.14: 20 °C' de farklı konsantrasyonlardaki CMCNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

oluşturduğu görülmektedir. Ancak bu üç çözelti için grafikteki eğriler daha dikkatli incelenecek olursa düşük Ca sayılarında eğrilerin birbirleri üzerinden geçişleri olurken, yani fraksiyonlarda kararlı bir trend olmazken, daha büyük Ca sayılarında bu üç çözelti için artan konsantrasyonla çok azda olsa sıvı fraksiyonunda artma olduğu görülmektedir. Ayrıca aynı sıvı fraksiyonuna %2.0' lık çözelti daha büyük Ca sayılarında ulaşırken diğer çözeltiler bu sıvı fraksiyonu değerine daha düşük Ca sayılarında ulaşmaktadır.

Şekil-5.15 ise 30 °C sıcaklıkta farklı konsantrasyonlardaki CMCNa çözeltileri için boru duvarı üzerinde biriken sıvı fraksiyonunun Ca sayısı ile değişimini göstermektedir.



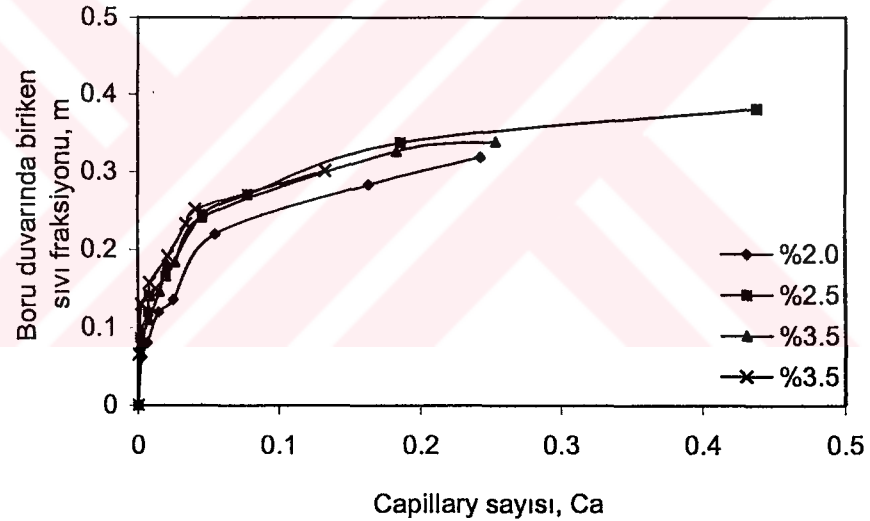
Şekil-5.15: 30 °C' de farklı konsantrasyonlardaki CMCNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

20 °C' de yapılan deneylerden elde edilen veriler için yukarda bahsettiğimiz konsantrasyon artışı ile m sıvı fraksiyonundaki artış 30 °C' de daha net görülmektedir. Burada da, düşük Ca sayılarında fraksiyon eğrilerinde girişimler olurken, Ca sayısındaki artış ile farklı fraksiyonların oluşumu belirginleşmektedir.

Huzyak ve Koelling (1997) tarafından H100 ve H300 polibüten Newtonian akışkanları kullanılarak ve Kamışlı (1997) tarafından farklı konsantrasyonlarda mısır şurubu çözeltileri (Newtonian akışkan) kullanılarak yapılan deneylerden elde edilen verilere

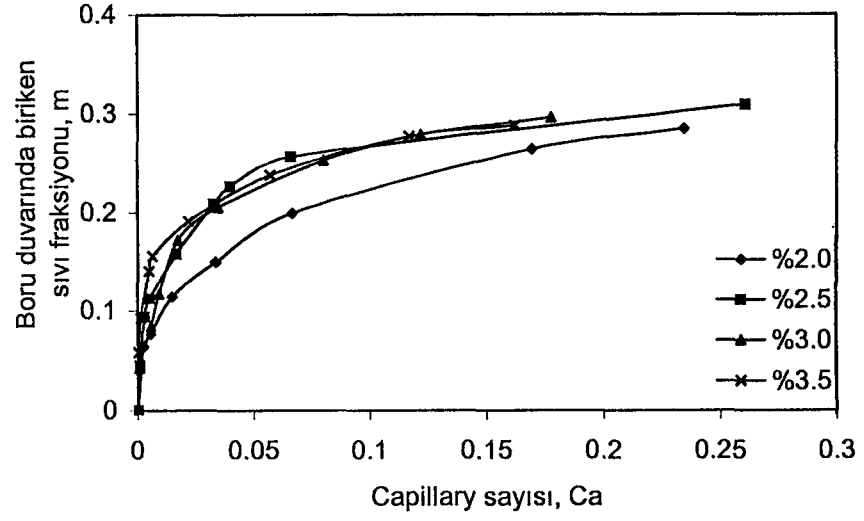
göre bütün Ca sayılarında bu çözeltilerin hemen hemen aynı sıvı fraksiyonu değerine ulaştıkları ifade edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan CMCNa çözeltileri için de düşük Ca sayılarında Newtonian akışkan davranışı sergiledikleri söylenebilir. Şöyle ki, gaz kabarcığı tarafından deformasyona uğrayan sıvı yığını içerisinde düşük gaz akış hızlarında çok düşük kayma gerilmesi değişimleri olacaktır. Bu da akışkanın Newtonian akışkan gibi davranabileceği anlamına gelmektedir. Ancak artan kayma gerilmesi değişimi ile Newtonian olmayan akışkan davranışı etkili olmaktadır.

Aşağıdaki Şekil-5.16, 5.17 ve 5.18 sırasıyla 40, 50 ve 60 °C sıcaklıkları için CMCNa çözeltilerinin Ca sayısı-m sıvı fraksiyonu ilişkisini göstermektedir. 20 ve 30 °C sıcaklıkları için görülen eğilim bu sıcaklıklarda da görülmektedir ve yukarıda bahsedilen sonuçlar bu şartlarda da geçerlidir.

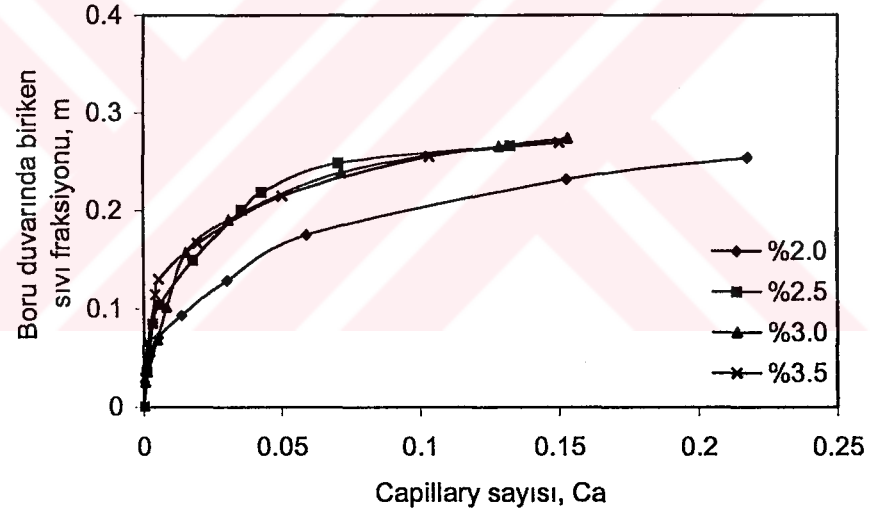


Şekil-5.16: 40 °C' de farklı konsantrasyonlardaki CMCNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

Şekillere dikkat edilecek olursa aynı Ca sayısı değerleri için artan konsantrasyonla boru duvarı üzerinde biriken sıvı fraksiyonu değerinde de artma olduğu görülmektedir.



Şekil-5.17: 50 °C' de farklı konsantrasyonlardaki CMCNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

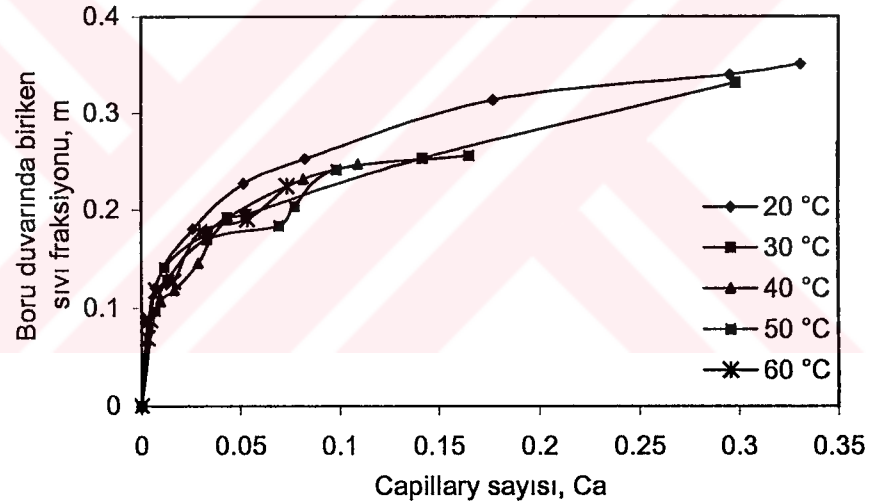


Şekil-5.18: 60 °C' de farklı konsantrasyonlardaki CMCNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

5.2.2. Hava-HECNa Çözeltisi Sistemi

Hava-HECNa tuzu çözeltisi sistemi için gaz yardımı ile yer değiştirme deneyleri %2.0, %2.5, %3.0, %3.5' lik konsantrasyonlarda hazırlanan çözelti kullanılarak 0.2, 0.5, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0 ve 2.5 psig basınçlarındaki hava yardımı ile 5.3 mm iç çapa sahip cam borularda gerçekleştirildi. Her bir deney 20, 30, 40, 50 ve 60 °C sıcaklıklarda beş tekrarlı olarak gerçekleştirildi. Deneyler sonucunda elde edilen verilerden Ca sayısına bağlı olarak boru cidarında biriken sıvı fraksiyonu hesaplandı.

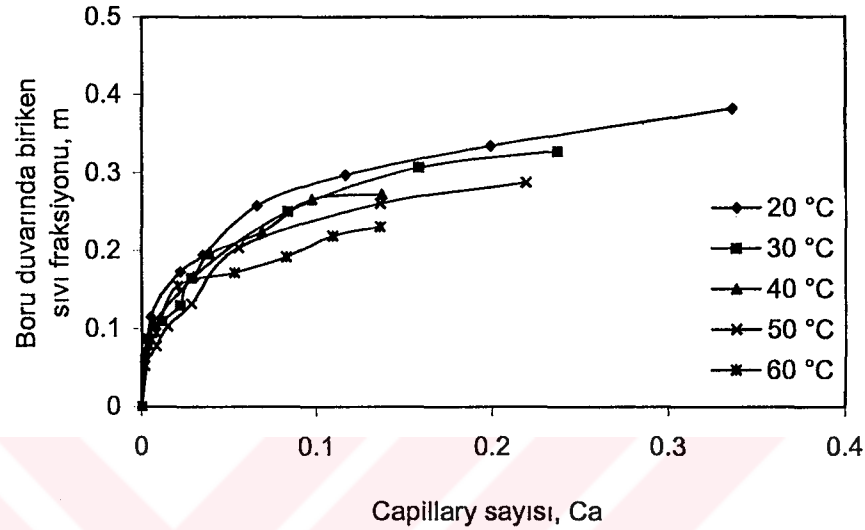
Şekil-5.19, %2.0' lık HECNa çözeltisinin hava yardımı ile yer değiştirmesi sonucu boru duvarında biriken sıvı fraksiyonunun Ca sayısı ile değişimini göstermektedir.



Şekil-5.19: %2.0 HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

%2.0 HECNa çözeltisi, daha önce tartışılmış olan %2.0 CMCNa çözeltisinin aksine daha düzensiz bir davranış göstermektedir. Yani CMCNa çözeltisinde belli bir Ca sayısı değerine karşılık artan sıcaklıkla boru duvarında biriken m sıvı fraksiyonu düzenli bir şekilde azalma gösterirken HECNa çözeltisinde bu belli bir düzene haiz değildir. 40, 50 ve 60 °C sıcaklıkları için Ca sayısındaki artışa bağlı olarak daha düşük Ca sayılarında asimptotik bir sınıra ulaşma eğilimi varken, 20 °C ve 30 °C sıcaklıklarına ait

eğrilerin bu eğilimi daha büyük Ca sayılarına taşıdıkları görülmektedir. Buna rağmen 20 °C’ deki fraksiyon eğrisi bütün Ca sayılarında en büyük sıvı fraksiyonu değerlerine sahiptir.

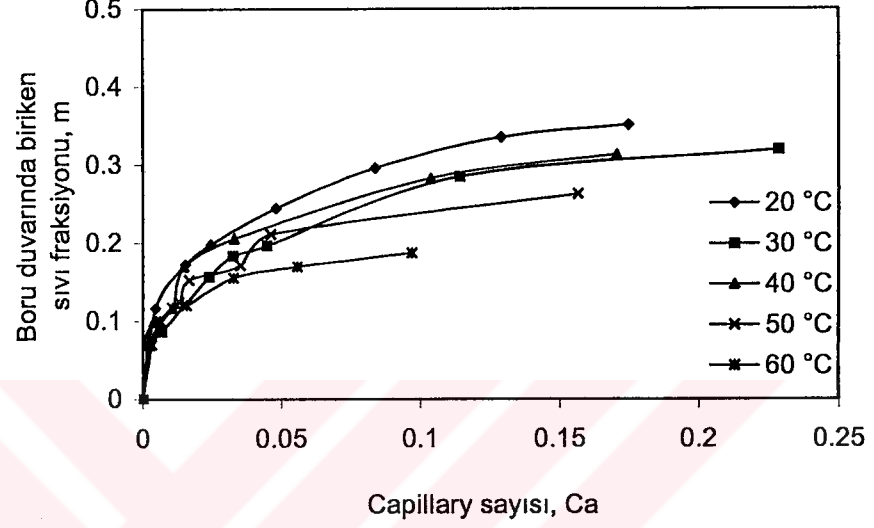


Şekil-5.20: %2.5 HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

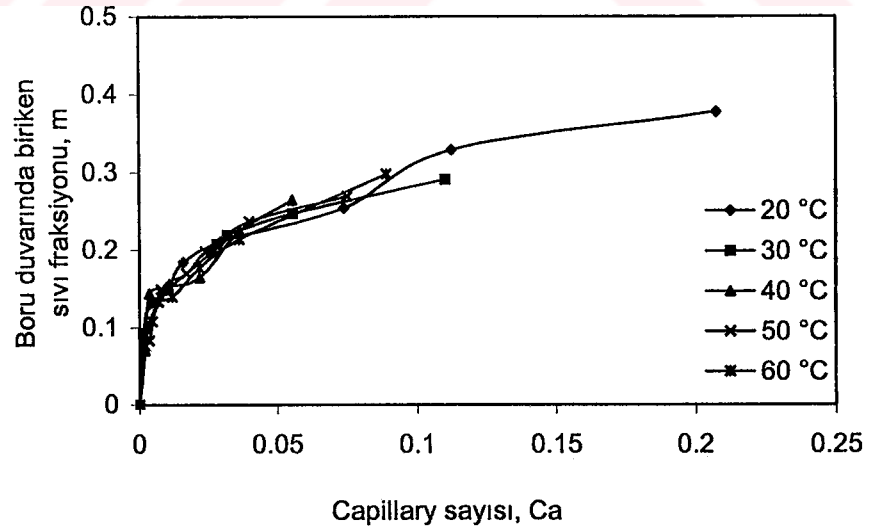
Şekil-5.20’ de %2.5 HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Ca sayısı ile m sıvı fraksiyonunun değişimi görülmektedir. %2.0’ lık HECNa çözeltisinin aksine %2.5’ lik HECNa çözeltisi daha düzenli bir değişim göstermektedir. Belli bir Ca sayısında, sıcaklıktaki artışa bağlı olarak m sıvı fraksiyonunda azalma olmaktadır. Ca=0.125 değeri için artan sıcaklıkla m sıvı fraksiyonunun değişimini irdeleyecek olursak 20, 30, 40, 50 ve 60 °C sıcaklıkları için m sıvı fraksiyonu değerleri sırasıyla 0.31, 0.29, 0.27, 0.25 ve 0.23 olmaktadır. Aynı Ca sayısı için %2.5’ lik CMCNa çözeltisine ait m sıvı fraksiyonu değerleri yukarıdaki sıcaklıklarla sırasıyla 0.39, 0.34, 0.31, 0.28 ve 0.26 şeklinde değişmektedir. Buna göre aynı Ca sayısı (Ca=0.125) için %2.5’ lik CMCNa ve HECNa çözeltileri kıyaslanacak olursa her sıcaklık değerinde de CMCNa çözeltisi daha büyük sıvı fraksiyonuna sahiptir. Bu da CMCNa çözeltisini viskozitesini HECNa çözeltisine göre daha yüksek olmasından kaynaklanmaktadır. Çünkü yukarıdaki kısımda da anlatıldığı üzere viskozitedeki azalmaya bağlı olarak akışkan içindeki kayma

gerilmesi azalmasına bağı olarak gaz kabarcığı tarafından daha fazla sıvı sürüklenerek boru dışına atılmaktadır ve boru duvarında daha az sıvı fraksiyonu kalmaktadır.

Aşağıdaki Şekil-5.21 ve Şekil-5.22 sırasıyla %3.0 ve % 3.5' lik HECNa çözeltileri için sıcaklıkla m sıvı fraksiyonunun değişimini göstermektedir. %3.0' lık



Şekil-5.21: %3.0 HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

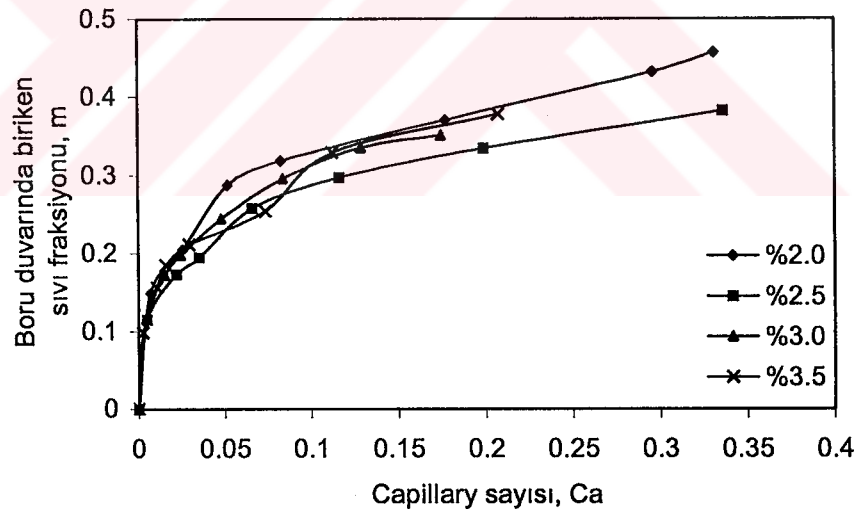


Şekil-5.22: %3.5 HECNa çözeltisi için farklı sıcaklıklarda Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

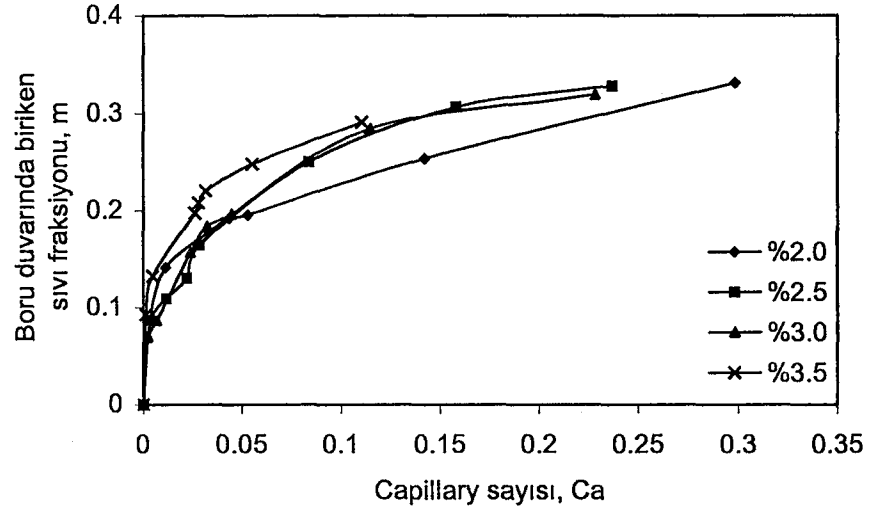
çözelti için düşük Ca sayısı bölgesinde daha önce bahsedildiği üzere Newtonian bir akışkana ait davranış eğilimi varken, daha büyük Ca sayılarında artan sıcaklıkla sıvı fraksiyonundaki azalma belirgin bir şekilde görülmektedir.

Buna karşın %3.5' lik çözelti için bu trendden bahsetmek mümkün değildir. Bütün Ca sayılarında ve bütün sıcaklıklarda fraksiyon eğrileri üst üste çakışmaktadır. Sıcaklığın artması dolayısıyla da viskozitedeki azalmanın sıvı fraksiyonu üzerine etkisi bu konsantrasyonda önemsiz olmayacak derecededir.

Şekil-5.23 farklı konsantrasyonlardaki HECNa çözeltilerinin 20 °C sabit sıcaklıkta, Ca sayısı ile m sıvı fraksiyonu arasındaki ilişkisini göstermektedir. %2.0' lık HECNa çözeltisi en düşük konsantrasyondaki çözelti olmasına rağmen diğer üç çözeltiye (%2.5, %3.0, %3.5) göre daha yüksek sıvı fraksiyonuna sahiptir. Diğer çözeltiler ise beklendiği üzere artan konsantrasyonla sıvı fraksiyonunda artış göstermektedirler. Şekil-5.24, 30 °C sabit sıcaklıkta Ca sayısının fonksiyonu olarak artan konsantrasyon ile m sıvı fraksiyonunun da arttığını göstermektedir.

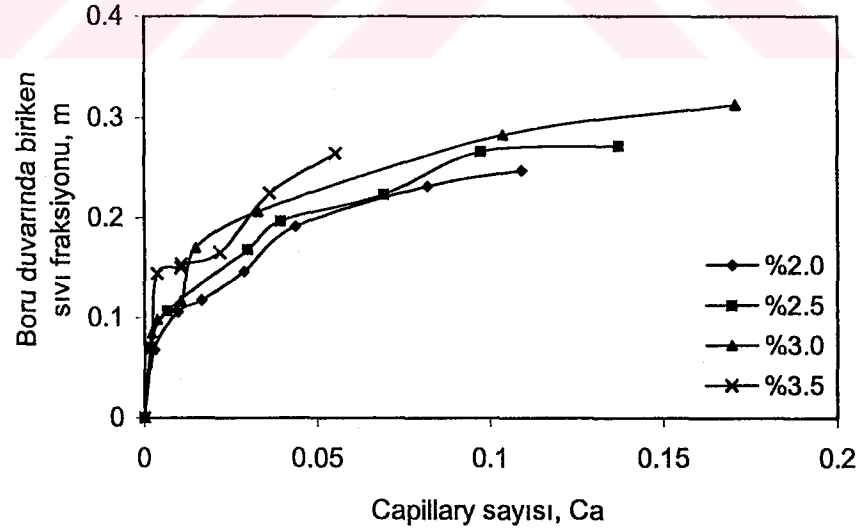


Şekil-5.23: 20 °C' de farklı konsantrasyonlardaki HECNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.



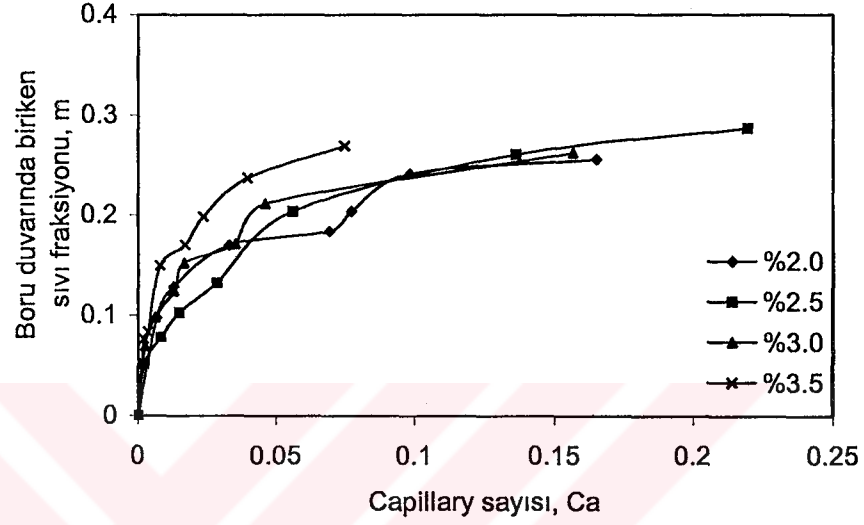
Şekil-5.24: 30 °C' de farklı konsantrasyonlardaki HECNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

Şekil-5.25, 40 °C' farklı konsantrasyonlardaki HECNa çözeltileri için m sıvı fraksiyonunun Ca sayısı ile değişimini göstermektedir. Büyük Ca sayılarında artan konsantrasyonla sıvı fraksiyonunda da artma görülmektedir.

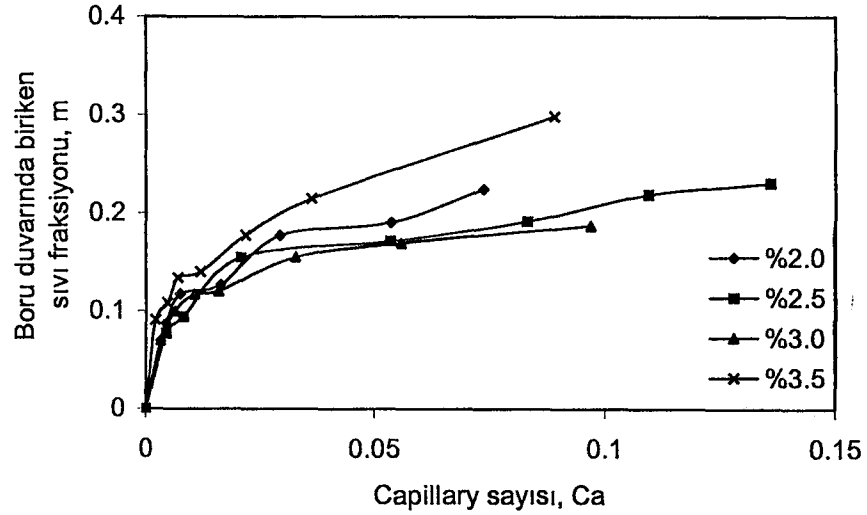


Şekil-5.25: 40 °C' de farklı konsantrasyonlardaki HECNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

Şekil-5.26 ve Şekil-5.27 sırasıyla 50 ve 60 °C sıcaklıklarda %2.0, %2.5, %3.0 ve %3.5' lik HECNa çözeltileri için konsantrasyon artışı ile boru duvarında biriken sıvı fraksiyonunun değişimini göstermektedir. Görülmektedir ki, 50 ve 60 °C sıcaklıklarında da m sıvı fraksiyonunda düzensiz bir değişim vardır.



Şekil-5.26: 50 °C' de farklı konsantrasyonlardaki HECNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.



Şekil-5.27: 60 °C' de farklı konsantrasyonlardaki HECNa çözeltileri için Capillary sayısı (Ca)-m sıvı fraksiyonu ilişkisi.

6. SONUÇ

Gaz-sıvı birlikte akış sistemlerinde, CMCNa ve HECNa tuzlarının farklı konsantrasyonlardaki çözeltileri kullanılarak farklı sıcaklıklarda gaz yardımı ile yer değiştirme olayını incelemek üzere yapılan bu çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Hava-CMCNa çözeltisi sisteminde, belli bir konsantrasyondaki çözelti için artan Ca sayısı ile boru duvarında biriken sıvı fraksiyonu asimptotik olarak artmaktadır. Bu artış bütün çözelti konsantrasyonlarında benzer şekilde olmaktadır. %2.0' lık CMCNa çözeltisi için $Ca=0.2$ durumunda, 20, 30, 40, 50 ve 60 °C' de m sıvı fraksiyonu değerleri sırasıyla 0.35, 0.32, 0.30, 0.27 ve 0.25 olmaktadır. %2.5' lik çözeltide ise $Ca=0.2$ durumunda, 20, 30, 40, 50 ve 60 °C' de m sıvı fraksiyonu değerleri sırasıyla 0.43, 0.36, 0.34, 0.29 ve 0.27 olmaktadır.

Düşük Ca sayılarında bütün çözeltilerde ve sıcaklıklarda elde edilen m sıvı fraksiyonu değerleri hemen hemen aynı olmaktadır. Düşük gaz akış hızlarında, gaz kabarcığı önündeki akışkanın da düşük hızda hareket ederken Newtonian akışkan gibi davranması sonucu böyle bir sıvı fraksiyonu olduğu düşünülmektedir. Bu kanıya daha önceden Newtonian tip akışkan kullanılarak yapılan çalışmalardan elde edilen sonuçlar da dikkate alınarak varılmıştır.

Ayrıca sabit bir sıcaklıkta artan çözelti konsantrasyonu ile genel olarak boru duvarında biriken m sıvı fraksiyonunun da arttığı görülmüştür. Akışkanın viskozitesindeki artmaya bağlı olarak akışkan içindeki kayma gerilmesi ve normal gerilme değişimine bağlı olarak m sıvı fraksiyonunun değişimi tartışılmıştır. Akışkanın viskozitesindeki artış ile akışkan içindeki kayma gerilmesi artışı ile sıvı fraksiyonu da artmaktadır. Ancak bu sadece kayma gerilmesinin değil aynı zaman da normal gerilme değişiminin de bir sonucudur. Burada bu gerilmelerden hangisinin daha etkin olduğuna karar verebilmek için akışkan örneklerine ait normal gerilme ölçümlerini de yapmak gerekmektedir. Daha sonra bu tez çalışmasının sonuçları ve eksiklikleri dikkate alınarak böyle bir çalışma yapılması düşünülmektedir.

Hava-CMCNa sisteminde elde edilen sonuçlara benzer sonuçlar hava-HECNa sisteminde de elde edilmiştir. Genel olarak sıcaklıktaki artışa bağlı olarak boru duvarında biriken sıvı fraksiyonunda azalma olmaktadır. Ancak sabit sıcaklıkta artan

konsantrasyonla sıvı fraksiyonunun tam olarak nasıl bir değişim gösterdiği tam olarak ortaya konamamıştır. Bunun da hazırlanan HECNa çözeltilerinin yeterli derecede iyi karışmaması nedeni ile çözelti içerisinde yeterince homojen olmayan gerilmelerden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Yapılan bu çalışma deney düzeneği daha da geliştirilerek gerçek polimerlere uygulanmak sureti tekrarlanabilir. Ancak tam olarak verileri değerlendirebilmek için akışkan içindeki normal gerilme değişimlerini de tayin etmek gerekmektedir. Böyle yapılacak olursa kayma gerilmesi ve normal gerilme arasındaki ilişki dikkate alınarak deneysel verileri temsil eden bir model ortaya koymak daha kolay olacaktır.



KAYNAKLAR

Bensimon, D., 1986, Stability of Viscous Fingering, Phys. Rev. A, 33, 2, 1302.

Bretherton, F. P., 1961, The Motion of Long Bubbles in Tubes, J. Fluid Mech., 10, 166.

Cox, B. G., 1962, On Driving a Viscous Fluid Out of a Tube, J. Fluid Mech., 14, 81.

Cox, B. G., 1964, An Experimental Investigation of the Streamlines in Viscous Fluid Expelled from a Tube, J. Fluid Mech., 20, 193.

Fairbrother, F. and Stubbs, A. E., 1935, Studies in Electroendosmosis. Part VI. The Bubble-Tube Methods of Measurements, J. Chem. Soc., 1,527.

General Electric Co., Gas-Assisted Injection Molding, Technical Bulletin No: MTD-711, Pittsfield, 1995.

Huzyag, P. C. and Koelling, K. W., 1997, The Penetration of a Long Bubble Through a Viscoelastic Fluid in a Tube, J. Non-Newt. Fluid Mech., 71, 73.

ISSO Y2000 Annual Report, Modeling and Experimental Studies on Gas-Liquid Two-Phase Flows at Normal and Microgravity Conditions, <http://www.isso.uh.edu/publications/A9900/balakotaiah.htm>.

Kamışlı, F. 1997, Mathematical Analysis and Experimental Study of Gas-Assisted Injection Molding. Ph.D. Dissertation, 188 pp., State University of New York at Buffalo, New York.

Kamışlı, F. and Ryan, M. E., 1999, Perturbation Method in Gas-Assisted Power-Law Fluid Displacement in a Circular Tube and a Rectangular Channel, Chem. Eng. J., 75, 167.

- Kamışlı, F. and Ryan, M. E., 2001, Gas-Assisted Non-Newtonian Fluid Displacement in Circular Tubes and Noncircular Channels, Chem. Eng. Sci., 56, 4913.
- Kamışlı, F., 2003, Flow of a Long Bubble in a Square Capillary, Chem. Eng. and Processing, 42, 351.
- Koelling, K. W. and Kaminski, R. C., 1996, Gas-Assisted Injection Molding: Influence of Processing Conditions and Material Properties, SPE Tech. Papers, 42, 644.
- Kolb, W. B. and Cerro, R. L., 1991, Coating the Inside of a Capillary of Square Cross-Section, Chem. Eng. Sci., 46, 2181.
- Kolb, W. B. and Cerro, R. L., 1993, The Motion of Long Bubbles in Tubes of Square Cross-Section, Phys. Fluids A, 5, 1549.
- Kopf-Sill, A. R. and Homsy, G. M., 1987, Narrow Fingers in a Hele-Shaw Cell, Phys. Fluids, 30, 2607.
- Lanvers, A. and Michaeli, W., 1992, CAE for Coinjection and Gas-Assisted Injection Molding, SPE Tech Papers, 38, 1796.
- Marchessault, R. H. and Mason, S. G., 1960, Flow of Entrapped Bubbles Through a Capillary, Ind. Eng. Chem., 52, 79.
- Maxworthy, T., 1986, Bubble Formation, Motion and Interaction in a Hele-Shaw Cell, J. Fluid Mech., 173, 95.
- McLean, J. M. and Saffman, P. G., 1981, The Effect of Surface Tension on the Shape of Fingers in a Hele-Shaw Cell, J. Fluid Mech., 102, 455.
- Nakayama, T. and Motogami, S., 1998, A Finite Element Approach to the Numerical Computation of Viscous Fingering Phenomena, Fluid Dyn. Res., 22, 73.

- Nittman, J., Daccord, G. and Stanley, H. E., 1985, Fractal Growth of Viscous Fingers: Quantitative Characterization of a Fluid Instability Phenomenon, *Nature*, 314, 14.
- Park, C. W. and Homsy, G. M., 1984, Two-Phase Displacement in Hele-Shaw Cell: Theory, *J. Fluid Mech.*, 139, 291.
- Park, C. W. and Homsy, G. M., 1985, The Instability of Long Fingers in Hele-Shaw Flows, *Phys. Fluids*, 28, 1583.
- Pits, E., 1980, Penetration of Fluid into a Hele-Shaw Cell: the Saffman-Taylor Experiment, *J. Fluid Mech.*, 97, 53.
- Poslinski, A. J., Oehler, P. R. and Stokes, V. K., 199, Isothermal Gas-Assisted Displacement of Viscoplastic Liquids in Tubes, *Poly. Eng. Sci.*, 35, 877.
- Ratulowski, J. and Chan, H. C., 1989, Transport of Gas Bubbles in Capillaries, *Phys. Fluids A*, 1, 1642.
- Reinelt, D. A. and Saffman, P. G., 1985, The Penetration of a Finger into a Viscous Fluid in a Channel and Tube, *SIAM J. Sci. Stat. Comput.*, 6, 542.
- Ro, T. S. and Homsy, G. M., 1995, Viscoelastic Free Surface Flows: Thin Film Hydrodynamics of Hele-Shaw and Dip Coating Flows, *J. Non-Newt. Fluid Mech.*, 57, 203.
- Saffman, P. G. and Taylor, G. I., 1958, The Penetration of a Fluid into a Porous Medium or Hele-Shaw Cell Containing a More Viscous Liquid, *Proc. Roy. Soc. Lond.*, A245, 312.
- Schwartz, L. W., Princen, H. W. and Kiss, A. D., 1986, On the Motion of Bubbles in Capillary Tubes, *J. Fluid Mech.*, 172, 259.

Shen, E. I. and Udell, K. S., 1985, A Finite Element Study of Low Reynolds Number Two-Phase Flow in Cylindrical Tubes, Trans. ASME E: J. Appl. Mech., 52, 253.

Tabeling, P., Zocchi, G. and Libchaber, A., 1987, An Experimental Study of Saffman-Taylor Instability, J. Fluid Mech., 177, 67.

Tanveer, S., 1986, The Effect of Surface Tension on the Shape of a Hele-Shaw Cell Bubble, Phys. Fluids, 29, 3537.

Tanveer, S., 1987, Analytical Theory for the Selection of a Symmetric Saffman-Taylor Finger in a Hele-Shaw Cell, Phys. Fluids, 30, 1589.

Taylor, G. I., 1961, Deposition of a Viscous Fluid on the Wall of a Tube, J. Fluid, Mech., 10, 161.

Taylor, G. I. and Saffman, P. G., 1958, Cavity Flows of Viscous Liquids in Narrow Spaces, Second Symposium on Naval Hydrodynamics U. S. Department of the Navy, Washington, D. C., 277.

Turng, L. S. and Wang, V. W., 1991, Simulation of Coinjection and Gas-Assisted Injection Molding Proces, SPE Tech. Papers, 37, 297.

Vossoughi, S. and Seyer, F. A., 1984, Prediction of Recovery and Water Saturation Distribution During an Unstable, Immiscible Displacement of Oil from a Porous Medium, Ind. Eng. Fundam., 23, 64.

Wilson, S. D. R., 1990, The Taylor-Saffman Problem for a Non-Newtonian Liquid, J. Fluid Mech., 220, 413.

EKLER

Ek 1. CMCNa ve HECNa tuzlarından hazırlanan çözeltilerin fiziksel özellikleri

Tablo E1.1. CMCNa çözeltilerinin fiziksel özellikleri.

Konsantrasyon(%): 2.0

Sıcaklık (°C)	Viskozite (cP)	Yüzey Gerilim (dyn/cm)	Öz Kütle (g/cm ³)
20	825.0	83.00	1.02888
30	625.0	80.00	1.02888
40	465.0	78.25	1.02888
50	370.0	76.25	1.02888
60	173.0	74.50	1.02888

Konsantrasyon(%): 2.5

Sıcaklık (°C)	Viskozite (cP)	Yüzey Gerilim (dyn/cm)	Öz Kütle (g/cm ³)
20	1100.0	86.50	1.03192
30	793.0	85.50	1.03192
40	552.0	82.75	1.03192
50	400.0	80.50	1.03192
60	237.0	78.25	1.03192

Konsantrasyon(%): 3.0

Sıcaklık (°C)	Viskozite (cP)	Yüzey Gerilim (dyn/cm)	Öz Kütle (g/cm ³)
20	2800.0	88.50	1.03376
30	2140.0	86.75	1.03376
40	1520.0	85.00	1.03376
50	1120.0	82.75	1.03376
60	780.0	81.00	1.03376

Konsantrasyon(%): 3.5

Sıcaklık (°C)	Viskozite (cP)	Yüzey Gerilim (dyn/cm)	Öz Kütle (g/cm ³)
20	3600.0	91.00	1.03572
30	3175.0	89.25	1.03572
40	2100.0	87.50	1.03572
50	1550.0	85.00	1.03572
60	1200.0	84.00	1.03572

Tablo E1.2. HECNa çözeltilerinin fiziksel özellikleri.

Konsantrasyon(%): 2.0

Sıcaklık (°C)	Viskozite (cP)	Yüzey Gerilim (dyn/cm)	Öz Kütle (g/cm ³)
20	245.0	77.75	1.02680
30	175.0	77.00	1.02680
40	132.0	75.50	1.02680
50	116.0	73.75	1.02680
60	57.0	72.50	1.02680

Konsantrasyon(%): 2.5

Sıcaklık (°C)	Viskozite (cP)	Yüzey Gerilim (dyn/cm)	Öz Kütle (g/cm ³)
20	472.0	79.00	1.02840
30	350.0	77.50	1.02840
40	250.0	76.00	1.02840
50	227.0	75.00	1.02840
60	223.0	73.75	1.02840

Konsantrasyon(%): 3.0

Sıcaklık (°C)	Viskozite (cP)	Yüzey Gerilim (dyn/cm)	Öz Kütle (g/cm ³)
20	690.0	80.25	1.03008
30	643.0	78.50	1.03008
40	346.0	77.75	1.03008
50	296.0	75.50	1.03008
60	257.0	74.00	1.03008

Konsantrasyon(%): 3.5

Sıcaklık (°C)	Viskozite (cP)	Yüzey Gerilim (dyn/cm)	Öz Kütle (g/cm ³)
20	1050.0	81.25	1.03168
30	714.0	79.50	1.03168
40	464.0	78.00	1.03168
50	357.0	76.50	1.03168
60	307.0	74.75	1.03168

Ek 2. Deneylerde kullanılan CMCNa ve HECNa çözeltilerinin üs kanunu sabitleri.

Tablo E.2.1. Üs kanununa göre ($\tau=k \gamma^n$) k, kıvamlılık indeksi ve n, akış indeksi sabitleri.

Çözelti	Sıcaklıklar				
	20 °C	30 °C	40 °C	50 °C	60 °C
CMCNa %2.0					
% güvenilirlik	97.4	95.1	97.1	90.7	96.1
k	600.8	398.4	266.8	217.0	138.4
n	0.89	0.89	0.90	0.84	0.88
CMCNa %2.5					
% güvenilirlik	96.8	96.7	97.4	97.3	96.9
k	893.4	595.6	438.9	275.2	189.8
n	0.89	0.90	0.88	0.90	0.91
CMCNa %3.0					
% güvenilirlik	97.7	97.7	97.2	94.8	93.5
k	2283.0	1486.0	1034.0	739.5	501.9
n	0.86	0.86	0.85	0.84	0.84
CMCNa %3.5					
% güvenilirlik	97.5	98.0	97.6	95.6	92.7
k	2893.0	2118.0	1417.0	998.9	703.9
n	0.85	0.85	0.85	0.84	0.83
HECNa %2.0					
% güvenilirlik	92.8	87.9	91.3	90.7	96.5
k	148.2	134.0	81.0	65.4	49.1
n	0.83	0.77	0.80	0.78	0.80
HECNa %2.5					
% güvenilirlik	90.8	90.1	93.1	88.6	87.7
k	287.0	202.9	148.8	134.5	115.1
n	0.82	0.84	0.82	0.75	0.71
HECNa %3.0					
% güvenilirlik	94.7	93.2	93.8	89.1	92.0
k	482.7	320.5	238.2	192.6	144.4
n	0.88	0.87	0.84	0.79	0.78
HECNa %3.5					
% güvenilirlik	97.0	95.9	94.0	96.0	90.5
k	760.0	494.7	327.1	248.6	206.1
n	0.89	0.90	0.90	0.90	0.84

Ek 3. Gaz yardımı ile yer değiştirme deneylerine ait veriler.

Tanımlıklar;

$\Delta P(\text{psi})$, boru uçları arasına uygulanan basınç farkı,

$U_b(\text{cm/s})$, boru içindeki çözelti içerisinde akan gazın akış hızı,

$Mo(\text{g})$, gaz enjeksiyonu sonunda borudan dışarı atılan çözelti kütlesi,

Ca , Capillary sayısı (boyutsuz)

m , enjeksiyon sonunda boru içerisinde kalan çözelti fraksiyonu (boyutsuz)

Polimer çözeltisi : CMCNa, % 2.0

Çalışma sıcaklığı (°C) : 20

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.1076	0.3145	0.8458	1.1917	2.4166	4.3750	7.5000
$Mo(\text{g})$		10.139	9.468	8.485	8.116	7.497	6.763	6.469
Ca	0	0.0107	0.0313	0.0841	0.1185	0.2402	0.4349	0.7455
m	0	0.1488	0.2051	0.2877	0.3186	0.3706	0.4322	0.4569

Çalışma sıcaklığı (°C) : 30

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0391	0.2034	0.2499	0.4854	1.0571	2.1000	3.8333
$Mo(\text{g})$		11.071	10.244	10.073	9.486	8.928	8.229	7.674
Ca	0	0.0031	0.0159	0.0195	0.0379	0.0826	0.1641	0.2995
m	0							

Çalışma sıcaklığı (°C) : 40

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0443	0.1105	0.2497	0.4235	0.9286	2.7500	4.0833
$Mo(\text{g})$		11.173	10.948	10.482	10.291	9.298	8.535	8.113
Ca	0	0.0026	0.0066	0.0148	0.0252	0.0552	0.1634	0.2426
m	0	0.0620	0.0809	0.1200	0.1360	0.2194	0.2835	0.3189

Çalışma sıcaklığı (°C) : 50

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0516	0.1184	0.3106	0.6931	1.3750	3.5000	4.8333
$Mo(\text{g})$		11.155	10.995	10.547	10.129	9.540	8.767	8.523
Ca	0	0.0025	0.0057	0.0151	0.0336	0.0667	0.1698	0.2345
m	0							

Çalışma sıcaklığı (°C) : 60

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0970	0.2228	0.5972	1.3042	2.5417	6.5833	9.3750
$Mo(\text{g})$		11.290	11.073	10.800	10.375	9.828	9.150	8.883
Ca	0	0.0023	0.0052	0.0139	0.0303	0.0590	0.1529	0.2177
m	0	0.0522	0.0704	0.0933	0.1290	0.1749	0.2318	0.2542

Ek-3 (Devam)

Polimer çözeltisi : CMCNa, % 2.5

Çalışma sıcaklığı (°C) : 20

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0302	0.1104	0.2154	0.4303	1.1542	1.6458	2.6250
Mo(g)		10.326	9.474	8.936	8.186	7.160	6.770	6.489
Ca	0	0.0038	0.0140	0.0274	0.0547	0.1468	0.2093	0.3338
m	0	0.1356	0.2070	0.2520	0.3148	0.4007	0.4333	0.4568

Çalışma sıcaklığı (°C) : 30

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0189	0.0688	0.1238	0.2397	0.5403	0.9583	1.4125	3.0880
Mo(g)		11.006	10.410	10.071	9.449	8.818	8.317	7.855	7.218
Ca	0	0.0018	0.0064	0.0115	0.0222	0.0501	0.0889	0.1310	0.2864
m	0	0.0787	0.1286	0.1570	0.2091	0.2619	0.3038	0.3425	0.3958

Çalışma sıcaklığı (°C) : 40

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0208	0.1095	0.1203	0.3007	0.6954	1.1750	2.7917	6.5625
Mo(g)		10.902	10.515	10.275	9.964	9.025	8.712	7.916	7.386
Ca	0	0.0014	0.0073	0.0080	0.0201	0.0464	0.0784	0.1862	0.4378
m	0	0.0874	0.1198	0.1399	0.1660	0.2446	0.2708	0.3374	0.3817

Çalışma sıcaklığı (°C) : 50

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0206	0.0612	0.1035	0.3345	0.6634	0.8041	1.3333	5.2500
Mo(g)		11.405	10.823	10.599	10.064	9.454	9.240	8.887	8.256
Ca	0	0.0010	0.0030	0.0051	0.0166	0.0330	0.0400	0.0663	0.2609
m	0	0.0453	0.0940	0.1128	0.1576	0.2086	0.2266	0.2561	0.3089

Çalışma sıcaklığı (°C) : 60

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0367	0.1089	0.1880	0.5917	1.1750	1.4131	2.3333	4.3750
Mo(g)		11.519	10.931	10.705	10.165	9.549	9.332	8.976	8.769
Ca	0	0.0011	0.0033	0.0057	0.0179	0.0356	0.0428	0.0707	0.1325
m	0	0.0358	0.0850	0.1039	0.1492	0.2007	0.2188	0.2487	0.2620

Ek-3 (Devam)

Polimer çözeltisi : CMCNa, % 3.0

Çalışma sıcaklığı (°C) : 20

ΔP(psi)	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
U_b(cm/s)	0	0.0127	0.0378	0.0852	0.1742	0.3680	0.6127	1.0048
Mo(g)		10.195	9.662	8.959	8.178	7.341	6.728	6.333
Ca	0	0.0040	0.0120	0.0270	0.0551	0.1164	0.1938	0.3179
m	0	0.1481	0.1927	0.2514	0.3167	0.3866	0.4378	0.4708

Çalışma sıcaklığı (°C) : 30

ΔP(psi)	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
U_b(cm/s)	0	0.0053	0.0448	0.0520	0.0615	0.2688	0.4901	0.7232
Mo(g)		10.693	10.445	10.106	10.079	8.875	8.108	7.743
Ca	0	0.0013	0.0111	0.0128	0.0152	0.0663	0.1209	0.1784
m	0	0.1065	0.1272	0.1556	0.1578	0.2584	0.3225	0.3530

Çalışma sıcaklığı (°C) : 40

ΔP(psi)	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
U_b(cm/s)	0	0.0055	0.0452	0.0858	0.1174	0.1490	0.2573	1.0250	1.4189
Mo(g)		11.039	10.647	10.216	9.807	9.761	9.080	8.061	7.910
Ca	0	0.0010	0.0081	0.0153	0.0210	0.0266	0.0460	0.1833	0.2537
m	0	0.0776	0.1104	0.1464	0.1806	0.1844	0.2413	0.3264	0.3391

Çalışma sıcaklığı (°C) : 50

ΔP(psi)	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
U_b(cm/s)	0	0.0054	0.0413	0.0690	0.1285	0.2560	0.5941	0.9000	1.3125
Mo(g)		11.459	10.956	10.565	9.912	9.512	8.945	8.631	8.423
Ca	0	0.0007	0.0056	0.0093	0.0174	0.0346	0.0804	0.1218	0.1776
m	0	0.0425	0.0845	0.1172	0.1718	0.2052	0.2526	0.2788	0.2962

Çalışma sıcaklığı (°C) : 60

ΔP(psi)	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
U_b(cm/s)	0	0.0068	0.0517	0.0883	0.1604	0.3199	0.7446	1.3333	1.5909
Mo(g)		11.665	11.153	10.755	10.090	9.683	9.106	8.786	8.690
Ca	0	0.0007	0.0050	0.0085	0.0154	0.0308	0.0717	0.1284	0.1532
m	0	0.0253	0.0681	0.1013	0.1569	0.1909	0.2391	0.2658	0.2739

**E.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
BOKSANTASYON MERKEZİ**

Ek-3 (Devam)

Polimer çözeltisi : CMCNa, % 3.5

Çalışma sıcaklığı (°C) : 20

ΔP(psi)	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
U_b(cm/s)	0	0.0038	0.0273	0.0448	0.0931	0.2020	0.4005	0.5266
Mo(g)		10.459	9.616	9.315	8.402	7.539	6.959	6.648
Ca	0	0.0015	0.0108	0.0177	0.0368	0.0799	0.1584	0.2083
m	0	0.1277	0.1980	0.2231	0.2993	0.3713	0.4196	0.4456

Çalışma sıcaklığı (°C) : 30

ΔP(psi)	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
U_b(cm/s)	0	0.0023	0.0173	0.0220	0.0568	0.1017	0.1283	0.2885	0.5769
Mo(g)		11.461	10.663	10.231	9.489	9.013	8.752	8.111	7.852
Ca	0	0.0008	0.0062	0.0078	0.0202	0.0362	0.0456	0.1026	0.2052
m	0	0.0442	0.1107	0.1467	0.2086	0.2483	0.2701	0.3235	0.3451

Çalışma sıcaklığı (°C) : 40

ΔP(psi)	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
U_b(cm/s)	0	0.0014	0.0097	0.0322	0.0348	0.0891	0.1450	0.1725	0.5526
Mo(g)		11.192	10.427	10.273	10.102	9.693	9.194	8.974	8.382
Ca	0	0.0003	0.0023	0.0077	0.0084	0.0214	0.0348	0.0417	0.1326
m	0	0.0666	0.1304	0.1432	0.1575	0.1916	0.2332	0.2516	0.3009

Çalışma sıcaklığı (°C) : 50

ΔP(psi)	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
U_b(cm/s)	0	0.0014	0.0078	0.0265	0.0348	0.1219	0.3142	0.6412	0.8898
Mo(g)		11.295	10.881	10.305	10.125	9.703	9.142	8.672	8.538
Ca	0	0.0003	0.0014	0.0048	0.0063	0.0222	0.0573	0.1169	0.1623
m	0	0.0580	0.0925	0.1406	0.1556	0.1908	0.2376	0.2768	0.2879

Çalışma sıcaklığı (°C) : 60

ΔP(psi)	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
U_b(cm/s)	0	0.0016	0.0090	0.0297	0.0388	0.1377	0.3519	0.7250	1.0500
Mo(g)		11.634	11.207	10.614	10.429	9.994	9.416	8.932	8.759
Ca	0	0.0002	0.0013	0.0042	0.0055	0.0197	0.0503	0.1036	0.1500
m	0	0.0297	0.0653	0.1148	0.1303	0.1665	0.2147	0.2551	0.2695

Ek-3 (Devam)

Polimer çözeltisi : HECNa, % 2.0

Çalışma sıcaklığı (°C) : 20

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.2273	0.8262	1.6429	2.6250	5.6250	9.3750	10.5000
Mo(g)		10.45	9.743	9.186	8.882	8.158	7.853	7.721
Ca	0	0.0072	0.0260	0.0518	0.0827	0.1773	0.2954	0.3309
m	0	0.1209	0.1804	0.2272	0.2584	0.3137	0.3394	0.3505

Çalışma sıcaklığı (°C) : 30

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.1441	0.5131	1.4792	1.9167	2.3333	6.2500	13.1250
Mo(g)		10.86	10.207	9.773	9.603	9.56	8.88	7.95
Ca	0	0.0033	0.0117	0.0336	0.0436	0.0530	0.1420	0.2983
m	0	0.0864	0.1413	0.1779	0.1922	0.1958	0.2530	0.3312

Çalışma sıcaklığı (°C) : 40

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.1633	0.5592	0.9571	1.6500	2.5000	4.6875	6.2500
Mo(g)		11.081	10.626	10.487	10.152	9.615	9.137	8.947
Ca	0	0.0029	0.0098	0.0167	0.0288	0.0437	0.0820	0.1093
m	0	0.0687	0.1061	0.1178	0.1460	0.1912	0.2314	0.2473

Çalışma sıcaklığı (°C) : 50

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.4418	0.8262	2.1042	4.4166	4.9166	6.2500	10.5000
Mo(g)		10.732	10.359	9.866	9.699	9.466	9.018	8.844
Ca	0	0.0069	0.0130	0.0331	0.0695	0.0773	0.0983	0.1652
m	0	0.0972	0.1286	0.1700	0.1841	0.2037	0.2414	0.2560

Çalışma sıcaklığı (°C) : 60

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.4063	0.5619	0.9619	2.0833	3.7500	6.8333	9.3750
Mo(g)		11.062	10.847	10.487	10.379	9.78	9.622	9.221
Ca	0	0.0032	0.0044	0.0076	0.0164	0.0295	0.0537	0.0737
m	0	0.0694	0.0875	0.1178	0.1269	0.1773	0.1906	0.2243

Ek-3 (Devam)

Polimer çözeltisi : HECNa, % 2.5

Çalışma sıcaklığı (°C) : 20

ΔP(psi)	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
U_b(cm/s)	0	0.0865	0.3727	0.5903	1.1071	1.9500	3.3333	5.6250
Mo(g)		10.54	9.841	9.588	8.841	8.368	7.922	7.351
Ca	0	0.0052	0.0223	0.0353	0.0661	0.1165	0.1992	0.3361
m	0	0.1147	0.1734	0.1947	0.2574	0.2971	0.3346	0.3826

Çalışma sıcaklığı (°C) : 30

ΔP(psi)	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
U_b(cm/s)	0	0.0832	0.2600	0.4955	0.6376	1.8542	3.5000	5.2500
Mo(g)		10.876	10.606	10.355	9.944	8.930	8.256	8.002
Ca	0	0.0038	0.0117	0.0224	0.0288	0.0837	0.1581	0.2371
m	0	0.0865	0.1092	0.1303	0.1648	0.2499	0.3066	0.3279

Çalışma sıcaklığı (°C) : 40

ΔP(psi)	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
U_b(cm/s)	0	0.0559	0.2051	0.9104	1.2000	2.1042	2.9583	4.1666
Mo(g)		11.063	10.629	9.907	9.569	9.246	8.737	8.666
Ca	0	0.0018	0.0067	0.0299	0.0395	0.0692	0.0973	0.1371
m	0	0.0708	0.1072	0.1679	0.1963	0.2234	0.2662	0.2721

Çalışma sıcaklığı (°C) : 50

ΔP(psi)	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
U_b(cm/s)	0	0.0747	0.2751	0.5006	0.9485	1.8542	4.5000	7.2500
Mo(g)		11.29	10.98	10.684	10.332	9.48	8.804	8.485
Ca	0	0.0023	0.0083	0.0152	0.0287	0.0561	0.1362	0.2194
m	0	0.0517	0.0778	0.1026	0.1322	0.2037	0.2605	0.2873

Çalışma sıcaklığı (°C) : 60

ΔP(psi)	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
U_b(cm/s)	0	0.1495	0.2703	0.6896	1.7708	2.7500	3.6250	4.5000
Mo(g)		10.984	10.783	10.06	9.861	9.625	9.303	9.16
Ca	0	0.0045	0.0082	0.0209	0.0535	0.0832	0.1096	0.1361
m	0	0.0774	0.0943	0.1550	0.1717	0.1916	0.2186	0.2306

Ek-3 (Devam)

Polimer çözeltisi : HECNa, % 3.0

Çalışma sıcaklığı (°C) : 20

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0525	0.1805	0.2869	0.5597	0.9738	1.5000	2.0333
Mo(g)		10.538	9.868	9.56	9.012	8.397	7.927	7.742
Ca	0	0.0045	0.0155	0.0247	0.0481	0.0837	0.1290	0.1748
m	0	0.1163	0.1725	0.1983	0.2443	0.2959	0.3353	0.3508

Çalışma sıcaklığı (°C) : 30

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0301	0.0848	0.2951	0.3984	0.5480	1.3958	2.7917
Mo(g)		11.098	10.897	10.056	9.735	9.583	8.534	8.118
Ca	0	0.0025	0.0069	0.0242	0.0326	0.0449	0.1143	0.2287
m	0	0.0694	0.0862	0.1567	0.1837	0.1964	0.2844	0.3193

Çalışma sıcaklığı (°C) : 40

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0467	0.0879	0.2423	0.3336	0.7411	2.3333	2.8333
Mo(g)		10.915	10.748	10.534	9.904	9.469	8.555	8.193
Ca	0	0.0021	0.0039	0.0108	0.0148	0.0330	0.1038	0.1706
m	0	0.0847	0.0987	0.1167	0.1695	0.2060	0.2826	0.3130

Çalışma sıcaklığı (°C) : 50

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0616	0.1597	0.3382	0.4297	0.8995	1.1821	4.0000
Mo(g)		11.098	10.756	10.442	10.111	9.889	9.403	8.794
Ca	0	0.0024	0.0063	0.0138	0.0168	0.0353	0.0463	0.1568
m	0	0.0694	0.0980	0.1244	0.1521	0.1708	0.2115	0.2626

Çalışma sıcaklığı (°C) : 60

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0934	0.1818	0.3061	0.4575	0.9452	1.6083	2.7917
Mo(g)		11.093	10.73	10.532	10.489	10.075	9.904	9.693
Ca	0	0.0032	0.0063	0.0106	0.0159	0.0328	0.0559	0.0970
m	0	0.0698	0.1002	0.1168	0.1204	0.1552	0.1695	0.1872

Ek-3 (Devam)

Polimer çözeltisi : HECNa, % 3.5

Çalışma sıcaklığı (°C) : 20

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0220	0.0852	0.1244	0.2291	0.5708	0.8699	1.6042
Mo(g)		10.766	10.071	9.738	9.417	8.905	8.015	7.430
Ca	0	0.0028	0.0110	0.0161	0.0296	0.0738	0.1124	0.2073
m	0	0.0986	0.1568	0.1874	0.2116	0.2544	0.3289	0.3779

Çalışma sıcaklığı (°C) : 30

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0153	0.0549	0.2918	0.3134	0.3570	0.6168	1.2266
Mo(g)		10.837	10.365	9.587	9.465	9.318	8.987	8.473
Ca	0	0.0014	0.0049	0.0262	0.0281	0.0321	0.0554	0.1102
m	0	0.0927	0.1322	0.1973	0.2075	0.2198	0.2476	0.2906

Çalışma sıcaklığı (°C) : 40

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0347	0.0609	0.1779	0.1809	0.3691	0.6112	0.9286
Mo(g)		11.111	10.224	10.156	10.11	9.976	9.265	8.787
Ca	0	0.0021	0.0036	0.0106	0.0108	0.0220	0.0364	0.0552
m	0	0.0697	0.1440	0.1497	0.1535	0.1648	0.2243	0.2643

Çalışma sıcaklığı (°C) : 50

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0451	0.0795	0.1713	0.3687	0.5129	0.8533	1.6042
Mo(g)		11.032	10.948	10.161	9.911	9.576	9.112	8.728
Ca	0	0.0021	0.0037	0.0080	0.0172	0.0239	0.0398	0.0749
m	0	0.0763	0.0834	0.1493	0.1702	0.1982	0.2371	0.2692

Çalışma sıcaklığı (°C) : 60

$\Delta P(\text{psi})$	0	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0	2.5
$U_b(\text{cm/s})$	0	0.0520	0.1154	0.1712	0.2920	0.5350	0.8818	2.1667
Mo(g)		10.86	10.651	10.345	10.27	9.828	9.384	8.384
Ca	0	0.0021	0.0047	0.0070	0.0120	0.0220	0.0362	0.0890
m	0	0.0907	0.1082	0.1339	0.1401	0.1771	0.2143	0.2980

**İ.C. YÜKSELİŞ KURULU
BİLGİSAYARLARI MERKEZİ**