



TÜRKİYE BİLİMSEL VE
TEKNİK ARAŞTIRMA KURUMU

THE SCIENTIFIC AND TECHNICAL
RESEARCH COUNCIL OF TURKEY

2004-377

44802

**ULTRASOUND DOPPLER HIZ ÖLÇÜMÜ
YÖNTEMİ İLE KOMPLEKS AKIŞKANLARIN
VİSKOZİTELERİNİN ÖLÇÜLMESİ**

PROJE NO: MİSAG-232

**Makina Kimyasal Teknolojiler, Malzeme ve İmalat Sistemleri
Araştırma Grubu**

**Mechanical Engineering, Chemical Technologies, Material
Sciences and Manufacturing Systems Research Grant
Committee**

44802

**ULTRASOUND DOPPLER HIZ ÖLÇÜMÜ
YÖNTEMİ İLE KOMPLEKS AKIŞKANLARIN
VİSKOZİTELERİNİN ÖLÇÜLMESİ**

PROJE NO: MİSAG-232

Y.DOÇ.DR. YUSUF ULUDAĞ

**AĞUSTOS 2004
ANKARA**

ÖNSÖZ

Bu proje ile çeşitli sıvıların ya da çözeltilerin viskozitelerinin kısa sürelerde ve akış ortamını etkilemeden ölçüleceği bir yöntemin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Yöntemin temeli yüksek frekanslı hız paketçiklerini kullanarak bir boru içerisindeki hız dağılımının bulunmasına (Ultrasound Doppler Hız Ölçümü) ve eş zamanlı akıştaki basınç düşmesi ölçümlerine dayanır. Bu yöntemin daha sonra çeşitli üretim süreçlerinde doğrudan kullanılması hedeflenmiştir. Böylece kalite kontrolünde ve üretim ekonomisinde yararlar sağlanabilecektir. Yapılan deneylerin sonuçları proje önerisindeki hedeflerle uyumlu olmuştur.

Bu proje MİSAG-232 kapsamında TÜBİTAK tarafından desteklenmiştir.

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|----|
| ŞEKİL LİSTESİ | 1 |
| ÖZET | 2 |
| ABSTRACT | 3 |
| 1. GİRİŞ | 4 |
| 2. GELİŞME | 7 |
| 2.1. DENEYSEL | 7 |
| 2.2. DENEYSEL VERİLER VE DEĞERLENDİRİLMESİ | 10 |
| 4. SONUÇ | 15 |
| KAYNAKLAR | 17 |
| EKLER | 19 |

ŞEKİL LİSTESİ

1. Deneysel akış sistemi.
2. Xanthan gum çözeltisinin hız dağılımı. Derişim=0.6 g/l, hız=3 l/dak., ultrasound frekansı= 2 MHz.
3. Xanthan gum çözeltisinin hız dağılımı. Derişim=1.0 g/l, hız=3 l/dak., ultrasound frekansı= 4 MHz.
4. Viskozitenin kayma hızına göre 0.6 g/l ve 1 g/l polimer derişimlerdeki dağılımı (bu sonuçlar Şekil 2 ve 3'te verilmiş hız dağılımlarından hesaplanmıştır).
5. Xanthan gum çözeltisinin hız dağılımı. Derişim=0.6 g/l, hız=4 l/dak., ultrasound frekansı= 4 MHz.
6. Xanthan gum çözeltisinin hız dağılımı. Derişim=1.0 g/l, hız=4 l/dak., ultrasound frekansı= 4 MHz.
7. Viskozitenin kayma hızına göre 0.6 g/l ve 1 g/l polimer derişimlerdeki dağılımı (bu sonuçlar Şekil 5 ve 6'da verilmiş hız dağılımlarından hesaplanmıştır).

ÖZET

Bu çalışmanın amacı, Newtonian olmayan akışkanların viskozitelerini çok kısa sürede ve geniş kayma hızı aralıklarında ölçmeyi sağlayacak bir yöntem geliştirmek ve bu yöntemin üretim süreçlerinde bir çeşit viskozite duyargası olarak kullanılmasını sağlamaktır. Yöntemin temeli, akışı etkilemeden saniyeler ölçeğinde akış hızı dağılımının ultrasound Doppler hız ölçümü (UDHÖ) yöntemi ile belirlenmesi ve aynı zamanda basınç düşmesinin ölçülmesine dayanır. Hız profilinde elde edilen kayma hızları ve basınçtan bulunan kayma gerilimi dağılımlarını kullanarak, viskozitenin akıştaki kayma hızı boru merkezinde sıfır ve boru duvarından en yüksek değeri aralığında bulunur. Böylece dakikalar ölçeğinde viskozite geniş kayma hızı aralıklarında belirlenmiş olur. Bu çalışmada xanthan gum çözeltisinin akıtıldığı bir boruda sözü geçen ölçümler yapılmış ve viskozite-kayma hızı ilişkileri bulunmuştur. Karşılaştırmak amacı ile klasik yöntemle de viskozite ölçülmüş ve polimerin 0.6 g/l ve 1 g/l derişimlerinin viskoziteleri 7.5 cP (37 s^{-1} kayma hızında) ve 13.5 cP (35 s^{-1} kayma hızında) olarak bulunmuştur. Bu yöntemde ise 0.6 g/l derişimi için 9.4 ve 8.8 cP ve 1.0 g/l derişimi için ise 14.4 ve 15.2 cP değerleri bulunmuştur. Görüldüğü gibi standart ölçüm yöntemi ile uyumlu sonuçlar elde edilmiştir.

Anahtar Sözcükler: Viskozite, ultrasound Doppler, kayma hızı, polimer, boru akışı.

ABSTRACT

The aim of this study is to develop a method to measure viscosity of non-Newtonian fluids over a wide range of shear rates in a short period of time and to enable this technique to be used as an on-line viscosity sensor on production processes. The technique is based on the measurement of velocity profile using ultrasound Doppler velocimeter (UDV), which is a non-disturbing and non-invasive method, and simultaneously to determine the pressure drop. Velocity profile is used to get shear rate distribution while the pressure drop is used to calculate the shear stress distribution. By taking ratio of these quantities, viscosity can be obtained within the shear rate range in the flow, zero at the pipe center and maximum at the tube wall within minutes. In this study xanthan gum solutions were circulated through a pipe on which the aforementioned measurements were taken. To compare the results of this study, viscosity of the solutions with polymer concentrations of 0.6 g/l and 1.0 g/l were also measured via a conventional technique and the results were found as 7.5 cP (at 37 s^{-1} shear rate) and 13.5 cP (at 35 s^{-1} shear rate), respectively. In this study those values are measured as 9.4 and 8.8 cP and 14.4 and 15.2 cP which compare well with the conventional method.

Key Words: Viscosity, ultrasound Doppler, shear rate, polymer, pipe flow.

1. GİRİŞ

Endüstride kullanılan ham maddelerin ve endüstriyel ürünlerin üretim süreci sırasındaki reolojik özellikleri, malzemelerin istenilen nitelikte olup olmadıklarının en önemli göstergelerindedir. Ayrıca, reolojik veya akış özellikleri üretim sürecini doğrudan etkilerler. Bu nedenle üretim sürecinin çeşitli kritik aşamalarından alınan örneklerin, laboratuvar koşullarında reolojik ölçümleri kalite kontrolü açısından oldukça önemli veriler sağlarlar. Ancak örneklerin bu şekilde tek tek, üretim sürecinin dışında incelenmesinin doğurabileceği bir takım sakıncalar vardır. En önemli reolojik özelliklerden olan viskozitenin, çoğu ürünlerin Newtonian olmamasından dolayı, belli bir kayma hızı aralığında belirlenmesi gerekir. Bu nedenle, örneklerin viskozitelerinin kullanışlı olabilecek şekilde karakterize edilmeleri zaman alıcı bir işlemdir. Dolayısı ile, üretim sürecindeki bir aksaklığın belirlenmesi ve müdahale edilmesi gecikecektir. Ayrıca, birçok örneğin reolojik özellikleri, içinde buldukları akış ortamı ile yakından ilintilidir. Bu nedenle laboratuvar koşullarındaki ölçümler, incelenen örneğin gerçek özelliklerini yansıtmayabilir. Görülmektedir ki, çeşitli reolojik ölçümlerinin üretim sürecinin üzerinde yapılmasının sağlayacağı avantajlar oldukça önemli olabilir. Ayrıca, sadece bir kayma hızı yerine, çok kısa süre içinde çeşitli kayma hızlarında viskozite ölçümlerini gerçekleştirebilecek bir yöntemin, bir çeşit “viskozite duyargası” olarak üretim sürecinin kontrol edilmesinin amacı ile kullanılabilme potansiyeli de bulunmaktadır.

Süreç üzerindeki viskozite ölçümleri için geliştirilmesi düşünülen yöntemin temeli, bir boru içerisindeki akışta çeşitli kayma hızlarının ve kayma gerilimlerinin olmasına dayanmaktadır. Herhangi bir yöntemle boru içerisindeki akıştaki hız dağılımı ölçülebilirse, kayma hızı dağılımının, akış hızı dağılımının pozisyona göre türevinin alınması ile belirlenmesi mümkün olabilir. Bu çalışmada akış hızı ölçümlerinin, akışı rahatsız etmemesi, hızlı ve hassas ölçüm olanağı sağlaması nedeni ile Ultrasound Doppler Hız Ölçümü yöntemi ile yapılması planlanmıştır. Bu ölçümler ile aynı anda belirlenen basınç düşmesi değerlerinden kayma geriliminin dağılımı da belirlenebilir. Böylece aynı noktaya denk düşen kayma gerilimi ve kayma hızlarının oranı, tanımı gereği, o noktadaki viskoziteyi verir. Sonuçta borunun merkezinde sıfır ve boru duvarında en yüksek değerine ulaşan kayma hızları aralığındaki viskozitelerin sadece bir deney ile kısa sürede ve üretim süreci üzerinde ölçülmesi mümkün olur.

Endüstride, süreç üzerinde viskozite ölçümleri yöntemlerinin uygulamaları bulunmaktadır. Üretim sürecini izleyebilme, otomatik kalite ve süreç kontrollerini sağlayabilme yönündeki avantajlarından dolayı, sürecin ekonomisi ve ürün kaliteleri üzerinde önemli rolleri vardır (DEALY, 1990). Ancak çeşitli alanlarda süreç üzerine monte edilmiş bu viskozite cihazları ya tek kayma hızında ya da oldukça kısıtlı kayma hızı aralıklarında ölçüm yapabilmeye uygundur (DEALY, 1984). Malzemelerin anlamlı reolojik karakterizasyonu ancak geniş kayma hızı aralıklarında gerçekleştirilen ölçümlerle sağlanabilir.

Son yıllarda literatürde, çok kısa sürede geniş kayma hızı aralıklarında viskozite ölçümlerinin yapıldığı çeşitli çalışmalar yer almıştır. Bu çalışmaların temeli, bir boru içerisindeki akışta çok geniş aralıklarda kayma hızlarının olmasına dayanan ve “noktasal reolojik ölçümü” olarak adlandırılan bir yöntemdir (POWELL, 1994, AROLA, 1997, AROLA, 1999, ULUDAG, 2001). Magnetik Rezonans Görüntüleme (MRG) kullanılarak belirlenen hız dağılımından hesaplanan kayma hızlarının akıştaki dağılımı aşağıda verilen eşitlik ile hesaplanır:

$$\dot{\gamma}(r) = \left| \frac{dv(r)}{dr} \right|$$

Ayrıca, deneyler sırasında ölçülen basınç düşmesinden de kayma gerilimi dağılımı bulunur. Burada boru içerisindeki akış üzerinde uygulanacak bir momentum denkleğinden elde edilen aşağıdaki ilişki kullanılır:

$$\sigma(r) = -\frac{\Delta P}{2L} r.$$

Eşitlikteki $\sigma(r)$ belli bir noktadaki kayma gerilimi, ΔP ise L uzunluğundaki bir boruda basınç düşmesidir. Akış içerisindeki aynı noktaya gelen kayma hızları ve kayma gerilimlerinin oranlarından viskoziteler hesaplanır. Bu yöntem ile çeşitli polimer çözeltileri, polimer eriyikleri ve katı tanecikli akışkanların viskozite ölçümleri başarı ile gerçekleştirilmiştir (POWELL, 1994, AROLA, 1997, AROLA, 1999, ULUDAG, 2001, LI, 1995, GIBBS, 1996, SUN, 1999). Bu çalışmalarda hız ölçümünde kullanılan MRG yöntemi ile oldukça hassas, akışı rahatsız etmeden, ışık geçirgenliği olan ya da olmayan malzemelerin hızlarının boru içerisindeki dağılımları belirlenebilmiştir. Ancak MRG yöntemi oldukça pahalı ve karmaşık bir yöntemdir (CALLAGHAN, 1991). Yüksek manyetik alan yaratan cihazların, üretim süreçlerinin üzerinde olmasının doğuracağı çeşitli güvenlik sakıncaları da vardır.

MRG yöntemi gibi, Ultrasound Doppler Hız Ölçümü (UDHÖ) de akış hızı dağılımlarının belirlenmesinde kullanılır. Bu yöntemin temeli, Doppler etkisine yani bir tanecikten yansiyıp gelen bir dalganın frekansındaki değişim, o taneciğin hızı ile orantılı olmasına bağlıdır. Bir borudaki akış hızı dağılımını bulmak için, hem ultrasound kaynağı hem de alıcı olarak kullanılan bir duyarga belli bir açı ile borunun dış yüzeyine monte edilir. MHz frekansları civarındaki ses paketleri ortama gönderilir. Akış içerisindeki çok küçük taneciklerden çarpıp gelen ses, tekrar aynı duyarga tarafından sinyale dönüştürülür ve ultrasound cihazına iletilir. Sesin ortama gönderilme anı ile, tanecikten çarpıp tekrar duyargaya ulaşması sırasında geçen süreden o parçacığın konumu şu eşitlik kullanılarak belirlenir:

$$x = \frac{ct_f}{2}$$

Bu eşitlikteki x duyarga ile parçacık arasındaki uzaklık, t_f sesin duyargadan çıkıp parçacıktan yansdıktan sonra tekrar duyargaya ulaşması için gerekli süre ve c sesin akış ortamındaki hızıdır. Ayrıca yansiyıp geri gelen sesin frekansındaki değişim parçacığın hızına bağlıdır. Boru eksenine paralel hızlar (w) ile ölçümlerde kullanılan parametreler ve frekanstaki Doppler değişimi (f_d) arasındaki ilişki ise şöyle yazılabilir:

$$w = \frac{cf_d}{2f_0 \cos \theta}$$

Bu eşitlikteki f_0 kullanılan ultrasound frekansını, θ ise duyarga ile boru duvarı arasındaki açığı temsil eder. Genel olarak 1 m/s civarındaki hızlar, 10 Khz'den daha az Doppler frekans değişimlerine neden olurlar.

Ultrasound Doppler Hız Ölçümü (UDHÖ) yönteminin, MRG gibi bir takım avantajları vardır. UDHÖ yöntemi de, ortamın içerisine bir cihaz koymayı gerektirmediğinden akışı rahatsız etmez. Ayrıca ışık geçirgenliğinin ölçümler üzerinde bir etkisi yoktur. MRG yöntemine göre çok daha ucuz ve kolaydır. Bu nedenlerden dolayı UDHÖ yönteminin çeşitli akış ortamlarında kullanıldığı çalışmalara gittikçe artan sıklıkta rastlanır olmuştur. UDHÖ yöntemi ilk olarak insan vücudundaki kan akışını (BRANDESTINI, 1976, TAKEDA, 1986, TAKEDA, 1987, TAKEDA, 1995, TORTOLLI, 1997, JENSEN, 2000) çalışmak amacı ile kullanılmış, daha sonraları çok farklı akış ortamlarında ve geometrilerinde başarı ile uygulanmıştır (TAKEDA, 1991, DAVID,

1991, WUNDERLICH, 1999). Tipik UDHÖ deneylerinde bir saniyenin altında gerçekleştirilen ölçümlerle sağlanan pozisyon ve hız çözünürlükleri 1mm ve 1mm/s civarındadır. Daha uzun sürelerle yani birkaç saniyelik ölçümlerle, çözünürlüklerin çok daha geliştirilmesi olasıdır. Görüldüğü gibi oldukça kısa sürede, yüksek çözünürlükte hız dağılımları bu yöntemle ölçülebilmektedir.

UDHÖ yönteminin geliştirildiği ve kullanışlılığının kanıtlandığı sözü geçen çalışmalardan sonra, literatürde son zamanlarda yöntemin çeşitli alanlara uygulanması ile yayınlar da yer almaya başlamıştır. Çok fazlı akışlardaki hız ölçümlerinin bu yöntemle başarılı bir şekilde kullanılabilmesi gösterilmiştir (TONG, 2002, WANG, 2003). Başka bir çalışmada, çok fazlı akışlarda boru duvarındaki akışkan kayma hızının (wall slip) bu yöntem kullanılarak belirlenmiştir (OURIEV, 2002). Ayrıca ultrasound'un ortamda ilerleme ve yansıma özellikleri ile ortamdaki farklı fazların (gaz, sıvı, katı) boyutları ve derişimleri arasındaki ilişkiden yararlanarak, parçacık boyutları ve derişimlerinin de belirlenebileceği gösterilmiştir (NELSON, 2001, SAYAN, 2002, HINDLE, 2002).

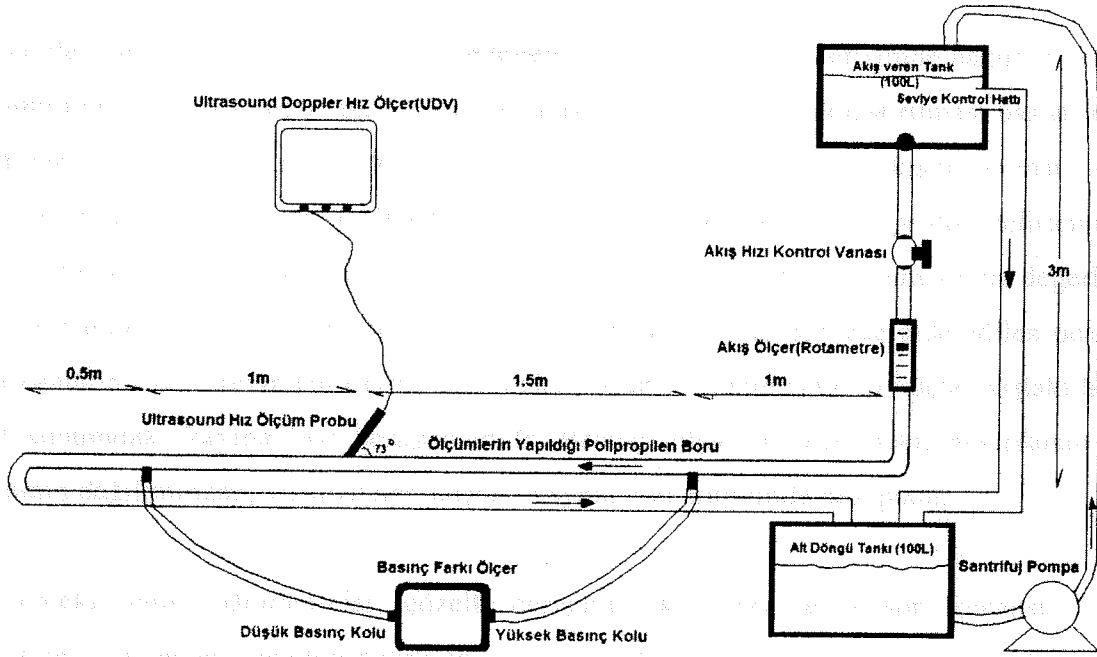
Son zamanlarda yapılmış çalışmalarla bu yöntemin aynı zamanda reolojik ölçümler için de kullanılabilmesi gösterilmiştir. Bu çalışmalarda çok fazlı (KIDMOSE, 2001) veya tek fazlı viskoelastik (DAKAR, 2002, OURIEV, 2003) akışkanların viskozite ölçümleri yapılmıştır. Bu çalışmada izlenen yöntem ile de viskozitenin değişik kayma hızı aralığında ölçülmesi sağlanmıştır. Deneyler sırasındaki en önemli parametreler polimer derişimi, çözelti hızı ve sensör frekansdır. Deneysel ayrıntılar aşağıdaki bölümlerde verilmiştir. Deneysel sonuçlar, proje önerisinde de verilmiş yukarıdaki yöntemi izleyerek temel amaç olan "online" viskozite ölçümlerinin otomatik olarak geniş kayma hızı aralıklarında gerçekleştirileceğini göstermiştir.

2. GELİŞME

2.1 Deneysel

Deneyler bir akış sisteminde dolaştırılan akışkanın boru içerisindeki hız dağılımını UDHÖ cihazı ile ölçülmesi ve aynı zamanda akıştaki basınç düşmesinin belirlenmesi ile gerçekleştirilmiştir. Kullanılan akış sistemi Şekil 1'de gösterilmiştir. Akış düzeneği iki tank, sert

kalın etli bir boru, bağlantıları sağlayan hortumlar, bir pompa, bir rotametre ve vanadan oluşmaktadır. İki tank arasında sürekli pompalanan çözelti ile yukarıdaki tankın hep taşması sağlanmış, taşan çözelti geri alttaki tanka akıtılmıştır. Yukarıdaki tank ayrıca ölçümlerin yapıldığı 2 cm çapındaki boruyu da beslemiş, buradan akan çözelti de alttaki tanka akıtılmıştır. Böylece yukarıdaki tankın seviyesi sabit kalmış ve istenen hızlarda, kararlı, düzgün akışlar elde edilmiştir. Ayrıca ölçüm sensörlerinin boru üzerindeki konumlarının akışın başlangıç ve bitiş etkilerinin olmadığı yerlerde olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 1. Deneysel akış sistemi.

Hız ölçümlerinde kullanılan UDHÖ cihazı Signal Processing (İsviçre) ürünü DOP 2000 Model 2125'dir. Cihazın sensörü belli bir açı ile boruya takılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Cihazdaki programlar ölçüm değerlerini işleyip hız profilini doğrudan vermeye ya da ham verilerin alınarak başka bir bilgisayarda işlenmesine uygundur. UDHÖ ile ilgili tüm parametrelerin ayarlanması cihazdaki programlar aracılığı ile gerçekleştirilmiştir.

Deneyleerde Xanthan Gum'ın sudaki 0.6 ve 1 gr/litre derişimindeki çözeltileri kullanılmıştır. Çözeltilerin Newtoninan olmadığı yani viskozitesinin kayma hızına göre değiştii görölmüştür. Deneyleerde elde edilen sonuçları karşılaştırmak amacı ile çözeltilerin viskoziteleri ayrıca Haake Viscotester VT-01 viskometresi ile de ölçölmüştür. Bu viskometre, sabit bir silindirik kap içine yerleştiren örnek sıvı içinde ikinci bir silindiri döndürmek için gerekli kuvvet çifti verisinden viskozite ölçmektedir. Cihaz iç silindir için yaklaşık 1.02 Devir/saniye dönüş hızı sağlamaktadır. İki silindir arasındaki boşluk mesafesinden yararlanılarak cihazın sıvı üzerine uyguladığı kayma hızı çıkarılmıştır.

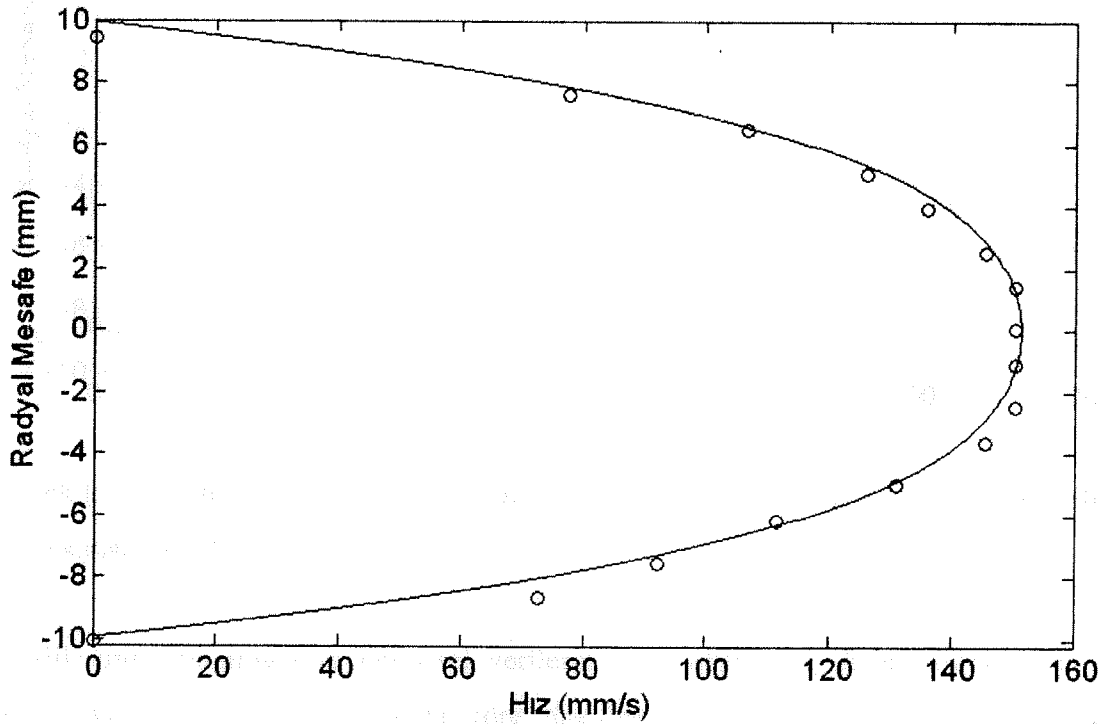
Deneyleerde izlenen yöntem şu şekilde özetlenebilir. Sistem istenen derişimde hazırlanmış çözeltili ile doldurulur. Daha sonra pompa ile iki tank arasındaki çözeltilinin dolaştırılması başlatılır. Vana yardımıyla boru içerisinde çözeltilinin istenen hızda akması sağlanır. Akışın laminar olmasına dikkat edilmelidir. Daha sonra UDHÖ cihazı ile borudaki akışın hız profili belirlenir. Aynı zamanda borudaki basınç düşmesi de ölçölür. Cihazdan alınan radyal konum ve hız değerleri ayrı bir bilgisayarda dördüncü dereceden bir polinom ile karşılaştırılır. Böylece elde edilen polinomun radyal konuma göre türevinden kayma hızı fonksiyonunu bulunmuştur. Sonuçta akıştaki herhangi radyal konumdaki kayma hızı hesaplanabilir. Basınç düşmesi değerinden hesaplanan kayma geriliminin dağılımından, viskoziteler akıştaki kayma hızı aralığında hesaplanır.

Deneyleerdeki temel parametreler, çözeltili derişimi, akış hızı ve sensör frekansı olmuştur. Literatürde Newtonian olmadığı belirtilen 0.6 ve 1 gr/litre derişimlerindeki Xanthan Gum'ın sulu çözeltileri kullanılmıştır. Söz konusu derişimler yukarıda açıklanan deney sistemi için uygun viskoziteler vermiştir. Çok daha düşük viskoziteler istenilen hızlara çıkamadan kargaşalı akışa, çok daha yüksek viskoziteler ise yukarıdaki tankın yüksekliğinin az olmasından dolayı düşük akış hızlarına neden olarak, deneyleeri güçleştirebilirlerdi. Çözeltilinin akış hızı ise 2 ve 3 litre/dak olarak ayarlanmıştır. Böylece hem kargaşalı akıştan kaçınılmış hem de hız çözünürlüğünü düşürmeden cihazın ölçebileceği en düşük hızların üzerine çıkmıştır. Ölçümler 2 ve 4 MHz frekanslarında gerçekleştirilmiştir. Frekansın artması ile daha iyi hız çözünürlüğü etmek mümkün olurken, ses paketçiklerinin çözeltili ortamında dağıtılmasından dolayı sinyal kaybının olumsuz etkileri de artar. O yüzden düşük frekanslar ile daha derinlerde ölçüm yapılabilir. Deneyleerde

kullanılan borunun çapı 2 cm'dir. Her iki frekansın da bu kalınlıktaki ortamda çalışabildiği görülmüştür.

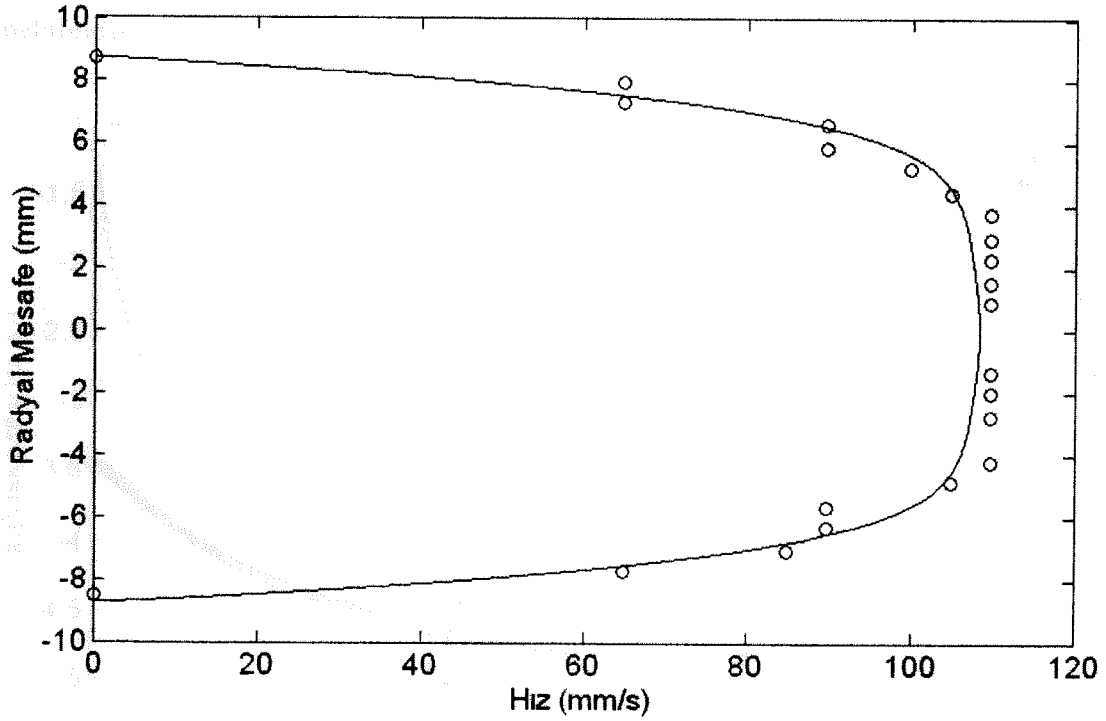
2.2. Deneysel Veriler ve Değerlendirilmesi

Deneysel ölçümler sonunda elde edilmiş bir hız dağılımı Şekil 2'de görülmektedir. Çözeltinin derişimi 0.6 g/l, akış hızı 3 l/dak'dır. Ölçümler 2 MHz 'de gerçekleştirilmiştir. Bu ve bundan sonraki tüm hız profili grafiklerinde düşey eksen borudaki radyal mesafe, yatay eksen ise hızdır. Boş noktalar doğrudan ölçüm değerleri iken, çizgi bu noktaları kullanarak elde edilmiş dördüncü dereceden polinomun $(-0.009 r^4 - 0.624 r^2 + 151.302)$ grafiğidir. Düşey eksendeki 0 konumu borunun merkezine denk düşmektedir. Görüldüğü gibi hız boru duvarında (+/- 10 mm) 0, borunun merkezinde ise en yüksek değerindedir. Ölçümler en fazla 1 saniye sürdüğünden, tüm hız profilinin belirlenmesi göz önüne alındığında oldukça önemli avantajdır. Ayrıca sensörün çözeltiye temas etmemesinden dolayı, akış ortamını bozacak bir etkiden kaçınılmıştır.



Şekil 2. Xanthan gum çözeltisinin hız dağılımı. Derişim=0.6 g/l, hız=3 l/dak., ultrasound frekansı= 2 MHz.

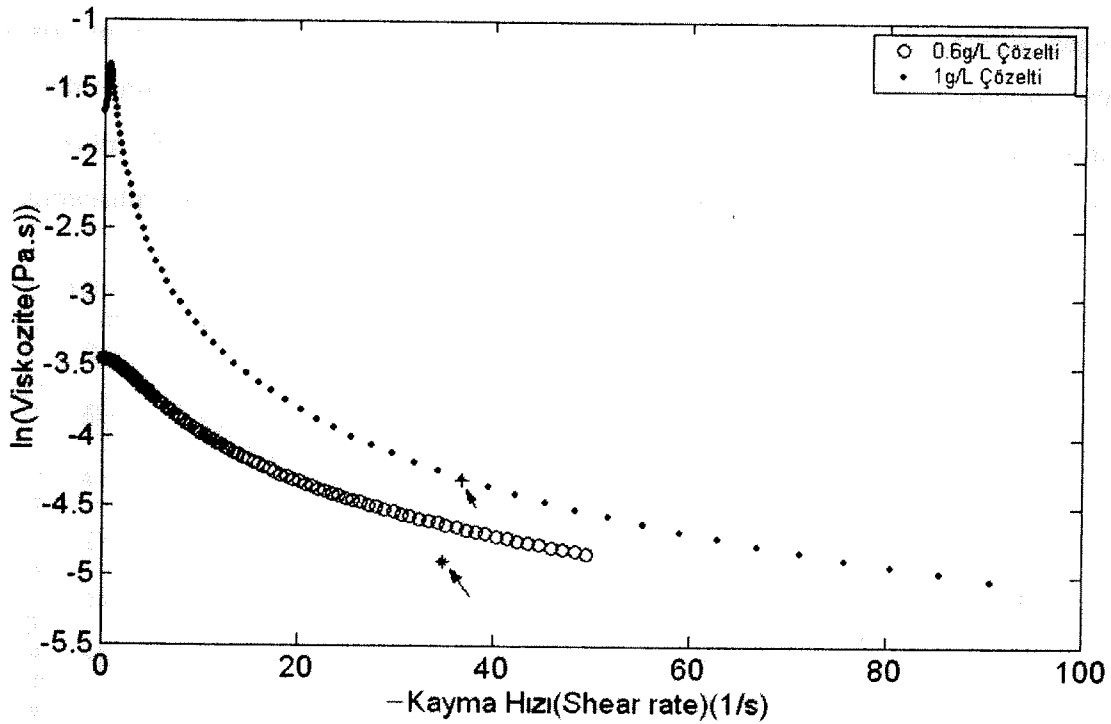
Polimer derişiminin 1g/l olduğu ve 4MHz frekansında yapılan ölçümlerin sonucu Şekil 3’de verilmiştir. Bir önceki sonuçlar 2 MHz’de ölçülmüştür ve daha düzgün sonuçların elde edildiği görülmüştür. Yüksek frekanslarda çözünürlük artarken, ultrasound sinyallerinin ortamda daha fazla zayıflatılması da olur. O yüzden sinyaldeki gürültünün artması gözlemlenir. Şekil 3’deki hız noktalarının dağılımındaki olumsuzlukların en önemli nedeni bu olabilir. Ayrıca borunun merkezindeki daha az hız değişimi polimer derişiminin daha yüksek olmasından kaynaklanabilir. Bu nedenlerle boru merkezine yakın bölgelerdeki ölçüm hataları çok daha belirgin olur.



Şekil 3. Xanthan gum çözeltisinin hız dağılımı. Derişim=1.0 g/l, hız=3 l/dak., ultrasound frekansı= 4 MHz.

Hız profillerinin bulunması ve deneysel verilerin bir fonksiyonla ifade edilmesinden sonraki aşama, elde edilen fonksiyonların konuma göre türevlerini alarak kayma hızlarının dağılımının bulunmasıdır. Aynı zamanda basınç farkı ölçümlerinden kayma gerilimi dağılımı da hesaplanır ve aynı konuma gelen kayma gerilimi, kayma hızı oranlarından viskoziteler bulunur. Şekil 2 ve 3’te verilmiş hız dağılımlarından ve aynı deneylerdeki basınç farkı ölçümlerinden (sırasıyla 196.8

Pa ve 329.9 Pa) elde edilmiş viskoziteler Şekil 4’de görülmektedir. Şekilde düşey eksende logaritmik ölçekte viskozite, yatay eksen ise lineer ölçekte kayma hızı verilmiştir. Beklenildiği gibi yoğun derişimdeki viskoziteler düşük derişime göre daha yüksek çıkmıştır. Ayrıca standart viskozite ölçüm cihazı (Haake VT-01) ile yapılmış ölçümler, bu çalışmanın sonuçları ile, düşük derişimdeki küçük farka rağmen, uyum halindedir. Standart ölçümlerde 0.6 g/l derişimindeki polimer çözeltisinin 37 s^{-1} kayma hızındaki viskozitesi 7.5 cP, 1.0 g/l derişiminin 35 s^{-1} kayma hızındaki viskozitesi ise 13.5 cP olarak ölçülmüştür. UDHÖ yönteminde ise denk kayma hızlarında ve derişimlerdeki viskoziteler sırasıyla 9.4 ve 14.4 cP olarak bulunmuştur. Düşük derişimdeki iki farklı yöntemle bulunmuş viskozitedeki farkın en önemli nedeni düşük viskozite deneylerinin ölçüm hataları ve UDV cihazının çözünürlük limitlerinden daha fazla etkilenebilmesi olabilir.

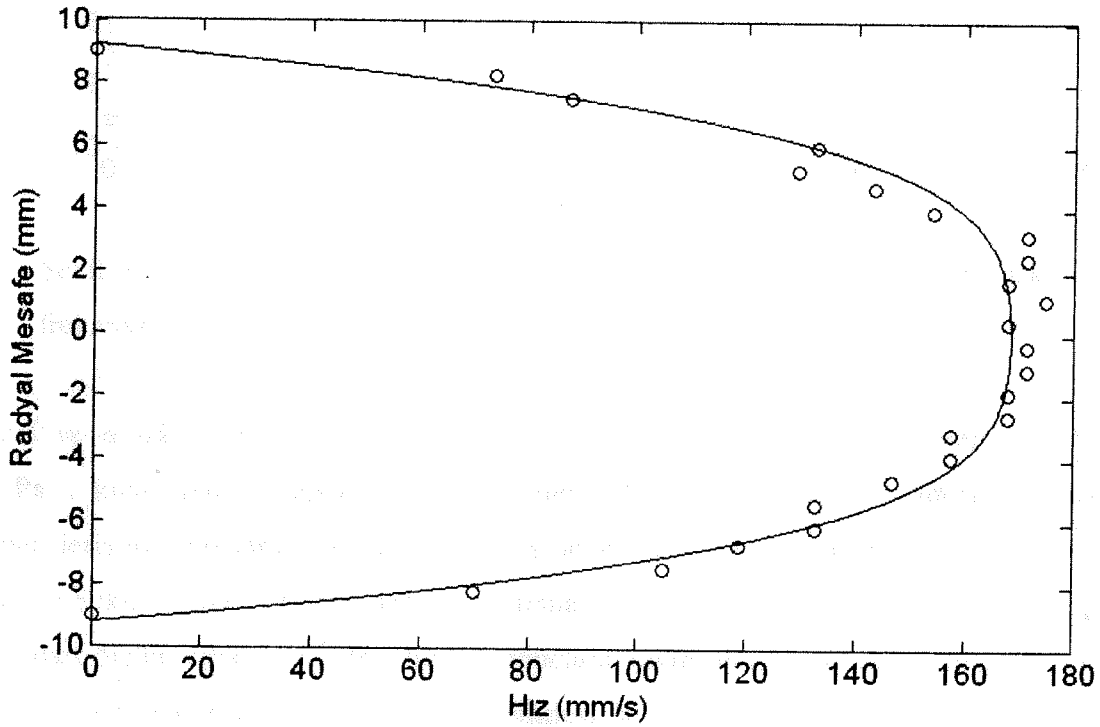


Şekil 4. Viskozitenin kayma hızına göre 0.6 g/l ve 1 g/l polimer derişimindeki dağılımı (bu sonuçlar Şekil 2 ve 3’te verilmiş hız dağılımlarından hesaplanmıştır).

Borunun merkezine denk gelen sıfır kayma hızlarındaki ölçüm hataları çok daha önemlidir. Yukarıda da belirtildiği gibi bu bölgedeki hız değişimi çok küçük olduğundan (borunun merkezinde sıfır), kayma hızlarının belirlenmesindeki hatalar yüksek olur. O nedenle boru

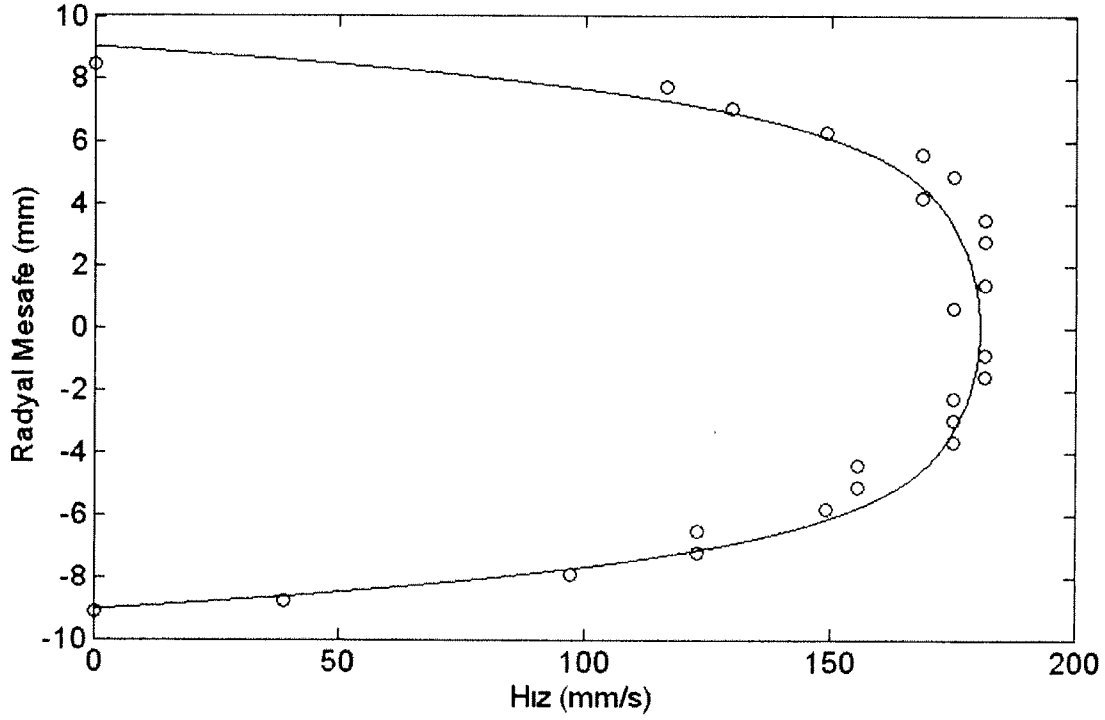
merkezine yakın yerlerde ya da düşük kayma hızlarındaki viskozite deneyleri güvenilir değildir. UDV aletinin çözünürlüğünü ve sinyal/gürültü oranını artırarak bu bölgeyi çok daha küçültmek olasıdır. Ancak şekle bakıldığında, düşük kayma hızları göz ardı edilirse, viskozitenin oldukça geniş kayma hızı aralıklarında belirlenmiş olduğu görülür. UDV ölçümlerinin bir iki saniyede, verilerin işlenmesinin de birkaç dakikada yapılabildiği göz önüne alındığında bu yöntemin en önemli avantajı ortaya çıkar. Diğer ölçüm teknikleriyle geniş kayma hızı aralıklarında viskozite ölçümleri hem yoğun emek hem de uzun zaman gerektirir. Dolayısıyla bu yöntemle doğrudan üretim hattındaki akışkanların viskoziteleri, ya da söz konusu akışkanın kritik özellikleri “online” olarak belirlenebilir.

Akış hızının ölçümler üzerindeki etkisini görmek için akış hızı dakikada üç litreden dört litreye çıkarıldığı deneyler yapılmıştır. Şekil 5’de bu hızda ve 0.6 g/lt polimer derişimdeki deney sonuçları verilmiştir. Yüksek hızların en önemli yararı daha yüksek çözünürlük değerlerinde çalışmanın mümkün olması dolayısı ile ortamdaki sinyal/gürültü oranının artmasının sağlanmasıdır. Yüksek hızların diğer bir yararı da akışta daha geniş aralıklarda kayma hızlarının elde edilmesidir. Böylece viskozitenin belirlendiği bölgenin de daha geniş olması sağlanmış olur.



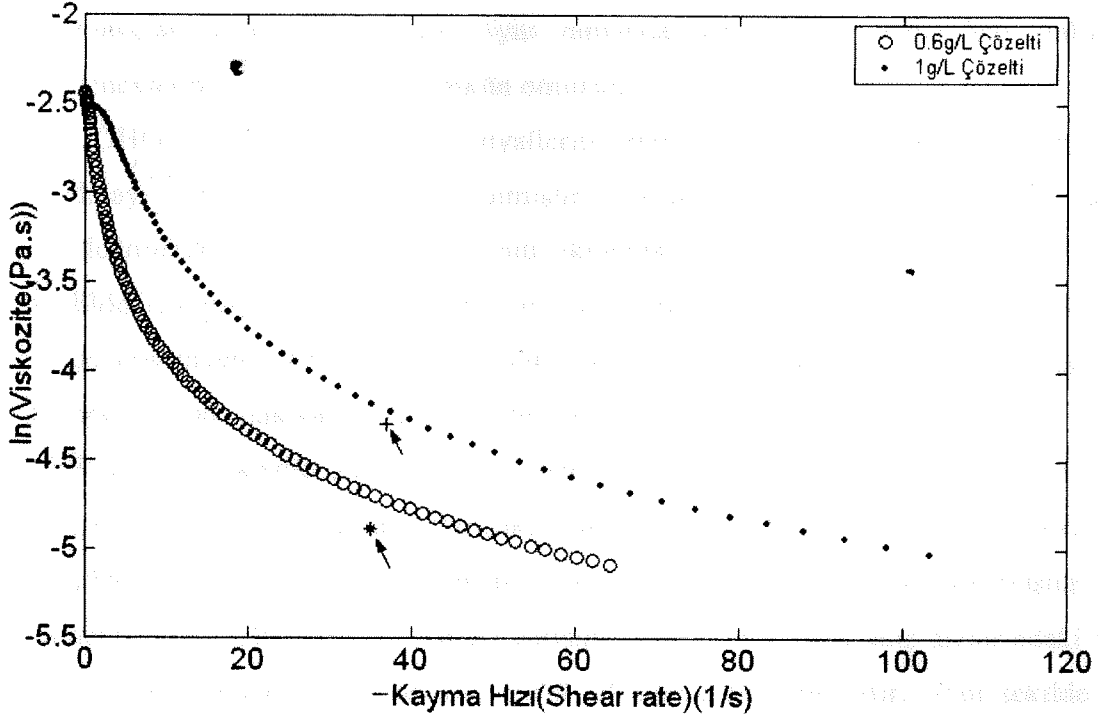
Şekil 5. Xanthan gum çözeltisinin hız dağılımı. Derişim=0.6 g/l, hız=4 l/dak., ultrasound frekansı= 4 MHz.

Şekil 6'da, polimer derişimi dışında, bir önceki şekilde verilmiş deney koşullarında yapılmış ölçümlerin sonucu görülmektedir. Görüleceği gibi bu durumda da polimer derişiminin artması beklenildiği gibi hız dağılımının merkeze yakın bölgelerde daha az değişkenlik göstermesine neden olmuştur.



Şekil 6. Xanthan gum çözeltisinin hız dağılımı. Derişim=1.0 g/l, hız=4 l/dak., ultrasound frekansı= 4 MHz.

Şekil 5 ve 6'daki sonuçlardan ve deneyler sırasındaki basınç farkı değerlerini (219.9 Pa ve 376.2Pa) kullanarak hesaplanmış viskoziteler şekil 7'de görülebilir. İdeal koşullarda aynı polimer derişimi için farklı hızlarda yapılmış deneylerin aynı sonuçları vermesi beklenir. Şekil 4'deki ve Şekil 7'deki viskozite değerleri karşılaştırıldığında bu değerlerin hem birbirlerine hem de standart ölçüm cihazı ile elde edilmiş sonuçlara yakın olduğu görülmektedir (8.8 cP ve 15.2 cP). Karşılaştırmaların daha rahat yapılabilmesi için yukarıdaki bütün grafiklerin rakamsal sonuçları ekte tablolar halinde verilmiştir.



Şekil 7. Viskozitenin kayma hızına göre 0.6 g/l ve 1 g/l polimer derişimindeki dağılımı (bu sonuçlar Şekil 5 ve 6'da verilmiş hız dağılımlarından hesaplanmıştır).

Genel benzerliklerine rağmen Şekil 4 ve Şekil 7 arasında bir takım farkların da olduğu görülmektedir. Birincisi, 4 l/dak hızı beklenildiği gibi 3 l/dak hızına göre daha geniş kayma hızında sonuçlar vermiştir. Diğer önemli fark ise boru merkezine yakın bölgelerdeki düşük kayma hızı değerlerinde görülmektedir. Yukarıda da açıklandığı gibi akış hızı artırıldıkça, daha yüksek hız çözünürlüklerinde çalışmak mümkün olur. Böylece merkeze yakın bölgelerdeki küçük hız değişimlerinin daha kolay belirlenmesi mümkün olur. Şekil 7'deki düşük kayma hızı bölgelerindeki daha iyi sonuçların en önemli nedeni budur.

3. SONUÇ

Bu çalışmada yapılan UDHÖ deneylerinden sonuçları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- i) UDV ile saniye ölçeğinde bir akış ortamındaki hız dağılımı belirlenebilir.
- ii) Hız dağılımları polimer derişimleri artırılınca beklenildiği gibi Newtonian olmayan özelliklerin daha baskın olmasından dolayı, boru merkezinde parabolik dağılımdan uzaklaşarak daha düz hale gelmiştir.

- iii) Akış hızı artırıldıkça daha yüksek hız çözünürlükleriyle çalışılabildiğinden, deneysel sonuçlar daha iyi çıkmıştır. Aynı zamanda daha geniş kayma hızı aralıklarında deneylerin yapılabilmesi mümkün olmuştur.
- iv) UDHÖ frekansı artırıldıkça, sinyallerin ortamda dağıtılma etkisinin de artmasından dolayı sinyal/gürültü oranı azalmıştır. Ancak frekansın artırılması aynı zamanda ölçümlerdeki çözünürlükleri olumlu etkilemiştir.
- v) Elde edilmiş hız dağılımları ve eş zamanlı gerçekleştirilmiş basınç düşmesi değerlerinden Newtonian olmayan akışkanların viskoziteleri geniş kayma hızı aralıklarında dakikalar ölçeğinde belirlenebileceği görülmüştür.
- vi) Standart viskozite cihazı ile yapılan ölçümlerde 0.6 g/l derişimindeki polimer çözeltisinin 37 s^{-1} kayma hızındaki viskozitesi 7.5 cP, 1.0 g/l derişimindeki polimer çözeltisinin 35 s^{-1} kayma hızındaki viskozitesi ise 13.5 cP olarak ölçülmüştür. UDHÖ sonuçlarına göre ise aynı 0.6 g/l derişimi için 3 ve 4 l/dak akış hızlarındaki ve aynı kayma hızındaki viskozite 9.4 ve 8.8 cP olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde 1.0 g/l derişimi için 14.4 ve 15.2 cP değerleri bulunmuştur. Farklı hızlardaki ölçümlerin değerleri birbirine ve standart sonuca oldukça yakın çıkmıştır.

Görüldüğü gibi bu projede yapılan deneylerle ve bulunan sonuçlarla, proje önerisinde belirtilmiş, çok kısa sürede (dakikalar) otomatik olarak viskozitenin akış ortamı üzerinde ve akışı etkilemeden belirlenmesinin mümkün olabileceği gösterilmiştir. Karmaşık akışkanların (polimer çözeltileri, çok fazlı karışımlar, vs...) viskozite-kayma hızı karakteristikleri, fiziksel ve kimyasal durumlarını gözlemlmek açısından çok kullanışlıdır. Bilindiği gibi viskozite hem fiziksel hem de kimyasal özelliklere çok sıkı bağlıdır. Üretim süreçleri üzerinde kullanılması halinde, nihai veya ara ürünlerin fiziksel ve kimyasal özelliklerinin sürekli gözlemlenerek, olabilecek aksaklıkları hemen belirlemek ve gerekli önlemleri almak mümkün olabilecektir. Böylece hem ürün kalitesi hem de üretim ekonomisi üzerinde olumlu katkılar yapabilecektir.

Bu projeye ileride de devam edilecektir. Özellikle daha doğru ve hassas ölçümlerin yapılabilmesine çalışılacaktır. UDHÖ yöntemi diğer karmaşık akışlara da uygulanacaktır. Kargaşalı akışın ultrasound sinyalleri üzerindeki etkileri modellenip, deneysel olarak doğruluğu test edilecektir. Kargaşalı akış ile sinyaldeki değişimlerin modellerini kullanarak, kargaşalı

akışların da doğrudan çalışılması mümkün olacaktır. Ayrıca kargaşalı akışlardaki çeşitli suda çözülen polimerlerin sürtünmeyi azaltma etkilerini çalışırken de bu yöntem kullanılacaktır.

KAYNAKLAR

- AROLA D. F., Barrall G. A., Powell R. L., McCarthy K. L., McCarthy M. J., *Chem. Engr. Sci.*, 52, 2049-2057, (1997).
- AROLA D. F., Powell R.L., Barrall G.A., McCarthy M. J., *J. Rheol.*, 43, 9-30, (1999).
- BRANDESTINI M., *Biomedizinische Technik*, 21, 291-293, (1976).
- CALLAGHAN, P. T., *Principles of Nuclear Magnetic Resonance Microscopy*, Oxford University Pres, New York, (1991).
- DAKAR G. M., Grineva O.V., *Russian J Physical Chemistry*, 76, 761-766, (2002).
- DAVID J. Y., Jones S. A., Giddens D.P., *IEEE Transcations on Biomedical Engineering*, 38, 589-596, (1991).
- DEALY J. M., *Chem. Engr.*, 91, 62-70, (1984).
- DEALY, J. M., Wissbrun, K. F., *Melt Rheology and Its Role in Plastics Processing: Theory and Applications*; Van Nostrand Reinhold, New York, (1990).
- GIBBS S. J., James K. L., Hall L. D. *J. Rheol.*, 40, 425-440, (1996).
- HINDLE S. A., Povey M. J. W., Smith K. W., *J The American Oil Chemists Society*, 79, 993-1002, (2002).
- JENSEN J. A., *Ultrasonics*, 38, 358-362, (2000).
- KIDMOSE U., Pedersen L., Nielsen M., *J Texture Studies*, 32, 321-334, (2001).
- LI T. Q., McCarthy K. L., *J. Non-Newtonian Fluid Mech.*, 57, 155-175, (1995).
- NELSON P. V., Povey M. J. W., Wang Y. T., *Review of Scientific Instruments*, 72, 4234-4241, (2001).
- OURIEV B., *Colloid J.*, 64, 740-745, (2002).
- OURIEV B., Windhab E., *Measurement Science and Technology*, 14, 140-147, (2003).
- Powell R. L., Maneval J. E., Seymour J. D., McCarthy K. L., McCarthy M. J., *J. Rheol.*, 38, 1465-1470, (1994).
- SAYAN P., Ulrich J., *Chemical Engineering and Processing*, 41, 281-287, (2002).
- SUN L., Gao Amin M. H., Hall L. D., Wolf B., Frith W. J., Ablett S., *Measurement Science and Technology*, 10, 1272-1278, (1999).

- TAKEDA Y., *International J. Heat and Fluid Flow*, 313-318, (1986).
- TAKEDA Y., *Nuclear Technology*, 79, 120-124, (1987).
- TAKEDA Y., *Nuclear Engineering and Design*, 126, 277-284, (1991).
- TAKEDA Y., *Experimental Thermal and Fluid Science*, 10, 444-453, (1995).
- TONG H., Povey M. J. W., *Ultrasonics*, 40, 37-41, (2002).
- TORTOLLI P., Guidi G., Guidi F., Berti P., Righi D., *Ultrasound in Med. & Biol.*, 23, 899-910, (1997).
- ULUDAG Y., McCarthy M. J., Barrall G. A., Powell R. L., *Macromolecules*, 34, 5520-5524, (2001).
- WANG T. F., Wang J. F., Ren F., Jin Y., *Chemical Engineering J.*, 92, 111-122, (2003).
- WUNDERLICH T., Brunn P. O., *Flow Measurement and Instrumentation*, 10, 210-205, (1999).

EKLER

EK 1. Şekil 2'nin tablo değerleri $V(\text{mm/s}) = -0.0093.r^4 - 0.6243.r^2 + 151.3023$, $r=\text{mm}$.

| r (mm)-----Visc (Pa.s)---Kayma hızı (1/s) | r (mm)-----Visc (Pa.s)---Kayma hızı (1/s) |
|---|---|
| 0 0 0 | 5.0000 0.0181 -10.8842 |
| 0.1000 0.0315 -0.1249 | 5.1000 0.0178 -11.2931 |
| 0.2000 0.0315 -0.2500 | 5.2000 0.0175 -11.7134 |
| 0.3000 0.0314 -0.3756 | 5.3000 0.0172 -12.1453 |
| 0.4000 0.0314 -0.5018 | 5.4000 0.0169 -12.5890 |
| 0.5000 0.0313 -0.6289 | 5.5000 0.0166 -13.0448 |
| 0.6000 0.0312 -0.7572 | 5.6000 0.0163 -13.5128 |
| 0.7000 0.0311 -0.8867 | 5.7000 0.0160 -13.9932 |
| 0.8000 0.0309 -1.0179 | 5.8000 0.0158 -14.4864 |
| 0.9000 0.0308 -1.1508 | 5.9000 0.0155 -14.9925 |
| 1.0000 0.0306 -1.2857 | 6.0000 0.0152 -15.5117 |
| 1.1000 0.0304 -1.4228 | 6.1000 0.0150 -16.0443 |
| 1.2000 0.0302 -1.5624 | 6.2000 0.0147 -16.5905 |
| 1.3000 0.0300 -1.7047 | 6.3000 0.0145 -17.1505 |
| 1.4000 0.0298 -1.8499 | 6.4000 0.0142 -17.7245 |
| 1.5000 0.0295 -1.9981 | 6.5000 0.0140 -18.3128 |
| 1.6000 0.0293 -2.1498 | 6.6000 0.0137 -18.9156 |
| 1.7000 0.0290 -2.3050 | 6.7000 0.0135 -19.5331 |
| 1.8000 0.0288 -2.4639 | 6.8000 0.0133 -20.1655 |
| 1.9000 0.0285 -2.6269 | 6.9000 0.0130 -20.8130 |
| 2.0000 0.0282 -2.7942 | 7.0000 0.0128 -21.4760 |
| 2.1000 0.0279 -2.9658 | 7.1000 0.0126 -22.1545 |
| 2.2000 0.0276 -3.1422 | 7.2000 0.0124 -22.8488 |
| 2.3000 0.0272 -3.3234 | 7.3000 0.0122 -23.5592 |
| 2.4000 0.0269 -3.5098 | 7.4000 0.0120 -24.2858 |
| 2.5000 0.0266 -3.7016 | 7.5000 0.0118 -25.0290 |
| 2.6000 0.0262 -3.8989 | 7.6000 0.0116 -25.7888 |
| 2.7000 0.0259 -4.1019 | 7.7000 0.0114 -26.5656 |
| 2.8000 0.0256 -4.3111 | 7.8000 0.0112 -27.3595 |
| 2.9000 0.0252 -4.5264 | 7.9000 0.0110 -28.1708 |
| 3.0000 0.0249 -4.7482 | 8.0000 0.0109 -28.9997 |
| 3.1000 0.0245 -4.9767 | 8.1000 0.0107 -29.8465 |
| 3.2000 0.0242 -5.2121 | 8.2000 0.0105 -30.7112 |
| 3.3000 0.0238 -5.4546 | 8.3000 0.0103 -31.5943 |
| 3.4000 0.0235 -5.7045 | 8.4000 0.0102 -32.4958 |
| 3.5000 0.0231 -5.9619 | 8.5000 0.0100 -33.4161 |
| 3.6000 0.0228 -6.2272 | 8.6000 0.0099 -34.3552 |
| 3.7000 0.0224 -6.5005 | 8.7000 0.0097 -35.3136 |
| 3.8000 0.0221 -6.7820 | 8.8000 0.0095 -36.2913 |
| 3.9000 0.0217 -7.0720 | 8.9000 0.0094 -37.2886 |
| 4.0000 0.0214 -7.3706 | 9.0000 0.0092 -38.3058 |
| 4.1000 0.0210 -7.6782 | 9.1000 0.0091 -39.3430 |
| 4.2000 0.0207 -7.9949 | 9.2000 0.0090 -40.4005 |
| 4.3000 0.0203 -8.3210 | 9.3000 0.0088 -41.4785 |
| 4.4000 0.0200 -8.6566 | 9.4000 0.0087 -42.5772 |
| 4.5000 0.0197 -9.0021 | 9.5000 0.0086 -43.6968 |
| 4.6000 0.0193 -9.3576 | 9.6000 0.0084 -44.8376 |
| 4.7000 0.0190 -9.7233 | 9.7000 0.0083 -45.9998 |
| 4.8000 0.0187 -10.0995 | 9.8000 0.0082 -47.1836 |
| 4.9000 0.0184 -10.4864 | 9.9000 0.0081 -48.3893 |
| | 10.0000 0.0079 -49.6170 |

EK 2. Şekil 3'ün tablo değerleri $V(\text{mm/s}) = -0.0003.r^6 + 0.0067.r^4 - 0.1749.r^2 + 108.2563$ $r=\text{mm}$.

| r (mm)-----Visc (Pa.s)---Kayma hızı (1/s) | r (mm)-----Visc (Pa.s)---Kayma hızı (1/s) |
|---|---|
| 0 | 0 |
| 0.1000 | 0.1888 -0.0350 |
| 0.2000 | 0.1892 -0.0697 |
| 0.3000 | 0.1899 -0.1042 |
| 0.4000 | 0.1909 -0.1382 |
| 0.5000 | 0.1922 -0.1716 |
| 0.6000 | 0.1938 -0.2043 |
| 0.7000 | 0.1957 -0.2360 |
| 0.8000 | 0.1979 -0.2668 |
| 0.9000 | 0.2003 -0.2964 |
| 1.0000 | 0.2031 -0.3249 |
| 1.1000 | 0.2061 -0.3522 |
| 1.2000 | 0.2094 -0.3781 |
| 1.3000 | 0.2129 -0.4028 |
| 1.4000 | 0.2167 -0.4262 |
| 1.5000 | 0.2207 -0.4484 |
| 1.6000 | 0.2249 -0.4693 |
| 1.7000 | 0.2293 -0.4892 |
| 1.8000 | 0.2337 -0.5082 |
| 1.9000 | 0.2382 -0.5264 |
| 2.0000 | 0.2426 -0.5440 |
| 2.1000 | 0.2468 -0.5614 |
| 2.2000 | 0.2508 -0.5787 |
| 2.3000 | 0.2545 -0.5964 |
| 2.4000 | 0.2576 -0.6148 |
| 2.5000 | 0.2600 -0.6344 |
| 2.6000 | 0.2617 -0.6556 |
| 2.7000 | 0.2623 -0.6791 |
| 2.8000 | 0.2619 -0.7054 |
| 2.9000 | 0.2603 -0.7352 |
| 3.0000 | 0.2574 -0.7691 |
| 3.1000 | 0.2531 -0.8081 |
| 3.2000 | 0.2476 -0.8529 |
| 3.3000 | 0.2408 -0.9044 |
| 3.4000 | 0.2328 -0.9637 |
| 3.5000 | 0.2238 -1.0318 |
| 3.6000 | 0.2140 -1.1099 |
| 3.7000 | 0.2036 -1.1991 |
| 3.8000 | 0.1928 -1.3008 |
| 3.9000 | 0.1817 -1.4163 |
| 4.0000 | 0.1706 -1.5470 |
| 4.1000 | 0.1596 -1.6946 |
| 4.2000 | 0.1489 -1.8606 |
| 4.3000 | 0.1386 -2.0467 |
| 4.4000 | 0.1288 -2.2548 |
| 4.5000 | 0.1194 -2.4867 |
| 4.6000 | 0.1106 -2.7445 |
| 4.7000 | 0.1023 -3.0301 |
| 4.8000 | 0.0947 -3.3460 |
| 4.9000 | 0.0875 -3.6942 |
| 5.0000 | 0.0809 -4.0773 |
| 5.1000 | 0.0748 -4.4976 |
| 5.2000 | 0.0692 -4.9579 |
| 5.3000 | 0.0640 -5.4609 |
| 5.4000 | 0.0593 -6.0094 |
| 5.5000 | 0.0549 -6.6063 |
| 5.6000 | 0.0509 -7.2548 |
| 5.7000 | 0.0473 -7.9579 |
| 5.8000 | 0.0439 -8.7191 |
| 5.9000 | 0.0408 -9.5418 |
| 6.0000 | 0.0380 -10.4295 |
| 6.1000 | 0.0353 -11.3859 |
| 6.2000 | 0.0330 -12.4148 |
| 6.3000 | 0.0307 -13.5203 |
| 6.4000 | 0.0287 -14.7063 |
| 6.5000 | 0.0268 -15.9771 |
| 6.6000 | 0.0251 -17.3371 |
| 6.7000 | 0.0235 -18.7908 |
| 6.8000 | 0.0221 -20.3428 |
| 6.9000 | 0.0207 -21.9979 |
| 7.0000 | 0.0194 -23.7611 |
| 7.1000 | 0.0183 -25.6375 |
| 7.2000 | 0.0172 -27.6323 |
| 7.3000 | 0.0162 -29.7509 |
| 7.4000 | 0.0153 -31.9989 |
| 7.5000 | 0.0144 -34.3819 |
| 7.6000 | 0.0136 -36.9059 |
| 7.7000 | 0.0128 -39.5769 |
| 7.8000 | 0.0121 -42.4012 |
| 7.9000 | 0.0115 -45.3850 |
| 8.0000 | 0.0109 -48.5349 |
| 8.1000 | 0.0103 -51.8577 |
| 8.2000 | 0.0098 -55.3602 |
| 8.3000 | 0.0093 -59.0495 |
| 8.4000 | 0.0088 -62.9329 |
| 8.5000 | 0.0084 -67.0177 |
| 8.6000 | 0.0080 -71.3115 |
| 8.7000 | 0.0076 -75.8223 |
| 8.8000 | 0.0072 -80.5578 |
| 8.9000 | 0.0069 -85.5264 |
| 9.0000 | 0.0065 -90.7364 |

EK 3. Şekil 5'in tablo değerleri $V(\text{mm/s}) = -0.0205.r^4 - 0.2523.r^2 + 168.4612$, $r=\text{mm}$

| r (mm) | Visc (Pa.s) | Kayma hızı (1/s) | r (mm) | Visc (Pa.s) | Kayma hızı (1/s) |
|--------|-------------|------------------|--------|-------------|------------------|
| 0 | - | 0 | 4.6000 | 0.0196 | -10.3022 |
| 0.1000 | 0.0870 | -0.0505 | 4.7000 | 0.0190 | -10.8846 |
| 0.2000 | 0.0866 | -0.1016 | 4.8000 | 0.0184 | -11.4901 |
| 0.3000 | 0.0859 | -0.1536 | 4.9000 | 0.0178 | -12.1192 |
| 0.4000 | 0.0850 | -0.2071 | 5.0000 | 0.0172 | -12.7724 |
| 0.5000 | 0.0838 | -0.2626 | 5.1000 | 0.0167 | -13.4502 |
| 0.6000 | 0.0824 | -0.3205 | 5.2000 | 0.0162 | -14.1531 |
| 0.7000 | 0.0807 | -0.3813 | 5.3000 | 0.0157 | -14.8815 |
| 0.8000 | 0.0790 | -0.4457 | 5.4000 | 0.0152 | -15.6361 |
| 0.9000 | 0.0770 | -0.5139 | 5.5000 | 0.0147 | -16.4172 |
| 1.0000 | 0.0750 | -0.5866 | 5.6000 | 0.0143 | -17.2254 |
| 1.1000 | 0.0728 | -0.6642 | 5.7000 | 0.0139 | -18.0611 |
| 1.2000 | 0.0706 | -0.7472 | 5.8000 | 0.0135 | -18.9249 |
| 1.3000 | 0.0684 | -0.8361 | 5.9000 | 0.0131 | -19.8172 |
| 1.4000 | 0.0661 | -0.9314 | 6.0000 | 0.0127 | -20.7385 |
| 1.5000 | 0.0638 | -1.0336 | 6.1000 | 0.0124 | -21.6893 |
| 1.6000 | 0.0616 | -1.1432 | 6.2000 | 0.0120 | -22.6702 |
| 1.7000 | 0.0593 | -1.2607 | 6.3000 | 0.0117 | -23.6815 |
| 1.8000 | 0.0571 | -1.3865 | 6.4000 | 0.0114 | -24.7239 |
| 1.9000 | 0.0549 | -1.5212 | 6.5000 | 0.0111 | -25.7977 |
| 2.0000 | 0.0528 | -1.6652 | 6.6000 | 0.0108 | -26.9035 |
| 2.1000 | 0.0508 | -1.8190 | 6.7000 | 0.0105 | -28.0418 |
| 2.2000 | 0.0488 | -1.9832 | 6.8000 | 0.0102 | -29.2131 |
| 2.3000 | 0.0469 | -2.1582 | 6.9000 | 0.0100 | -30.4178 |
| 2.4000 | 0.0450 | -2.3445 | 7.0000 | 0.0097 | -31.6564 |
| 2.5000 | 0.0432 | -2.5427 | 7.1000 | 0.0095 | -32.9295 |
| 2.6000 | 0.0415 | -2.7531 | 7.2000 | 0.0093 | -34.2375 |
| 2.7000 | 0.0399 | -2.9763 | 7.3000 | 0.0090 | -35.5809 |
| 2.8000 | 0.0383 | -3.2128 | 7.4000 | 0.0088 | -36.9603 |
| 2.9000 | 0.0368 | -3.4631 | 7.5000 | 0.0086 | -38.3760 |
| 3.0000 | 0.0354 | -3.7277 | 7.6000 | 0.0084 | -39.8287 |
| 3.1000 | 0.0340 | -4.0070 | 7.7000 | 0.0082 | -41.3187 |
| 3.2000 | 0.0327 | -4.3015 | 7.8000 | 0.0080 | -42.8466 |
| 3.3000 | 0.0315 | -4.6118 | 7.9000 | 0.0078 | -44.4129 |
| 3.4000 | 0.0303 | -4.9384 | 8.0000 | 0.0076 | -46.0181 |
| 3.5000 | 0.0291 | -5.2816 | 8.1000 | 0.0075 | -47.6626 |
| 3.6000 | 0.0281 | -5.6421 | 8.2000 | 0.0073 | -49.3470 |
| 3.7000 | 0.0270 | -6.0203 | 8.3000 | 0.0071 | -51.0717 |
| 3.8000 | 0.0260 | -6.4167 | 8.4000 | 0.0070 | -52.8372 |
| 3.9000 | 0.0251 | -6.8318 | 8.5000 | 0.0068 | -54.6441 |
| 4.0000 | 0.0242 | -7.2661 | 8.6000 | 0.0067 | -56.4928 |
| 4.1000 | 0.0234 | -7.7200 | 8.7000 | 0.0066 | -58.3838 |
| 4.2000 | 0.0225 | -8.1942 | 8.8000 | 0.0064 | -60.3176 |
| 4.3000 | 0.0218 | -8.6890 | 8.9000 | 0.0063 | -62.2947 |
| 4.4000 | 0.0210 | -9.2049 | 9.0000 | 0.0062 | -64.3155 |
| 4.5000 | 0.0203 | -9.7425 | | | |

EK 4. Şekil 6'nın tablo değerleri $V(\text{mm/s}) = -0.0003.r^6 + 0.0008.r^4 - 0.4713.r^2 + 180.4830$, $r=\text{mm}$.

| r (mm) | Visc (Pa.s) | Kayma hızı (1/s) | r (mm) | Visc (Pa.s) | Kayma hızı (1/s) |
|--------|-------------|------------------|--------|-------------|------------------|
| 0 | - | 0 | 4.8000 | 0.0433 | -8.3462 |
| 0.1000 | 0.0798 | -0.0943 | 4.9000 | 0.0416 | -8.8723 |
| 0.2000 | 0.0798 | -0.1885 | 5.0000 | 0.0399 | -9.4362 |
| 0.3000 | 0.0799 | -0.2827 | 5.1000 | 0.0382 | -10.0402 |
| 0.4000 | 0.0799 | -0.3768 | 5.2000 | 0.0366 | -10.6869 |
| 0.5000 | 0.0799 | -0.4709 | 5.3000 | 0.0350 | -11.3789 |
| 0.6000 | 0.0799 | -0.5649 | 5.4000 | 0.0335 | -12.1188 |
| 0.7000 | 0.0799 | -0.6589 | 5.5000 | 0.0321 | -12.9095 |
| 0.8000 | 0.0800 | -0.7528 | 5.6000 | 0.0306 | -13.7539 |
| 0.9000 | 0.0800 | -0.8468 | 5.7000 | 0.0293 | -14.6551 |
| 1.0000 | 0.0800 | -0.9408 | 5.8000 | 0.0279 | -15.6161 |
| 1.1000 | 0.0800 | -1.0350 | 5.9000 | 0.0267 | -16.6401 |
| 1.2000 | 0.0800 | -1.1293 | 6.0000 | 0.0255 | -17.7307 |
| 1.3000 | 0.0799 | -1.2240 | 6.1000 | 0.0243 | -18.8912 |
| 1.4000 | 0.0799 | -1.3191 | 6.2000 | 0.0232 | -20.1252 |
| 1.5000 | 0.0798 | -1.4149 | 6.3000 | 0.0221 | -21.4365 |
| 1.6000 | 0.0796 | -1.5115 | 6.4000 | 0.0211 | -22.8288 |
| 1.7000 | 0.0795 | -1.6091 | 6.5000 | 0.0201 | -24.3063 |
| 1.8000 | 0.0793 | -1.7080 | 6.6000 | 0.0192 | -25.8729 |
| 1.9000 | 0.0791 | -1.8084 | 6.7000 | 0.0183 | -27.5328 |
| 2.0000 | 0.0788 | -1.9107 | 6.8000 | 0.0175 | -29.2905 |
| 2.1000 | 0.0784 | -2.0153 | 6.9000 | 0.0167 | -31.1504 |
| 2.2000 | 0.0780 | -2.1224 | 7.0000 | 0.0159 | -33.1171 |
| 2.3000 | 0.0775 | -2.2327 | 7.1000 | 0.0152 | -35.1953 |
| 2.4000 | 0.0770 | -2.3464 | 7.2000 | 0.0145 | -37.3901 |
| 2.5000 | 0.0763 | -2.4643 | 7.3000 | 0.0138 | -39.7063 |
| 2.6000 | 0.0756 | -2.5868 | 7.4000 | 0.0132 | -42.1492 |
| 2.7000 | 0.0748 | -2.7145 | 7.5000 | 0.0126 | -44.7241 |
| 2.8000 | 0.0740 | -2.8482 | 7.6000 | 0.0121 | -47.4364 |
| 2.9000 | 0.0730 | -2.9886 | 7.7000 | 0.0115 | -50.2918 |
| 3.0000 | 0.0720 | -3.1364 | 7.8000 | 0.0110 | -53.2961 |
| 3.1000 | 0.0708 | -3.2925 | 7.9000 | 0.0105 | -56.4550 |
| 3.2000 | 0.0696 | -3.4578 | 8.0000 | 0.0101 | -59.7748 |
| 3.3000 | 0.0683 | -3.6333 | 8.1000 | 0.0096 | -63.2617 |
| 3.4000 | 0.0670 | -3.8199 | 8.2000 | 0.0092 | -66.9219 |
| 3.5000 | 0.0655 | -4.0187 | 8.3000 | 0.0088 | -70.7621 |
| 3.6000 | 0.0640 | -4.2310 | 8.4000 | 0.0085 | -74.7890 |
| 3.7000 | 0.0624 | -4.4580 | 8.5000 | 0.0081 | -79.0095 |
| 3.8000 | 0.0608 | -4.7008 | 8.6000 | 0.0078 | -83.4305 |
| 3.9000 | 0.0592 | -4.9610 | 8.7000 | 0.0074 | -88.0593 |
| 4.0000 | 0.0574 | -5.2399 | 8.8000 | 0.0071 | -92.9033 |
| 4.1000 | 0.0557 | -5.5392 | 8.9000 | 0.0068 | -97.9699 |
| 4.2000 | 0.0539 | -5.8602 | 9.0000 | 0.0066 | -103.2670 |
| 4.3000 | 0.0521 | -6.2049 | | | |
| 4.4000 | 0.0504 | -6.5748 | | | |
| 4.5000 | 0.0486 | -6.9720 | | | |
| 4.6000 | 0.0468 | -7.3982 | | | |
| 4.7000 | 0.0450 | -7.8556 | | | |

PROJE ÖZET BİLGİ FORMU

| |
|---|
| Proje Kodu: MISAG-232 |
| Proje Başlığı: Ultrasound Doppler Hız Ölçümü Yöntemi ile Kompleks Akışkanların Viskozitelerinin Ölçülmesi |
| Proje Yürütücüsü ve Yardımcı Araştırmacılar: Dr. Yusuf Uludağ, Arş. Gör. Volkan Köseli, Şerife Zeybek |
| Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi: ODTÜ Kimya Müh. Böl., 06531, Ankara |
| Destekleyen Kuruluş(ların) Adı ve Adresi: TÜBİTAK |
| Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri: 1/10/2002 – 1/4/2004 |
| Öz (en çok 70 kelime): Bu çalışmada Newtonian olmayan çözeltilerin viskozitelerinin geniş kayma hızı aralıklarında ölçülmesi gerçekleştirilmiştir. Yöntemin temeli ultrasound Doppler hız ölçümü ile borudaki hız profiline belirlenmesine ve eş zamanlı yapılan basınç düşmesinin ölçülmesine dayanmaktadır. Böylece hesaplanan kayma hızı ve kayma gerilimi dağılımlarından viskoziteler hesaplanmıştır. |
| Anahtar Kelimeler: Viskozite, ultrasound Doppler, kayma hızı, polimer, boru akışı. |
| |
| Bilim Dalı: Doçentlik Bilim Dalı Kodu: |