

## DENEY NO:1 SICAKLIK ÖLÇÜMÜ VE KALİBRASYON

### DENEYİN AMACI

Platin dirençli ısı çiftin ve termistörün termoelektriksel özelliklerinin incelenmesi; termometredeki sıcaklığın etkisinin ve sıcaklığın buhar basıncına etkisinin incelenmesi ve sıcaklıktaki ani değişmelerin sıcaklığa-duyarlı cihazların cevabına etkisinin incelenmesidir. Sensör çıktılarının mühendislik birimlerine dönüşümlerini incelemek ve sıcaklık sensörlerinin kalibrasyonu için doğru sabit noktaları belirlenerek, yaygın olarak kullanılan sıcaklık ölçeklerinin incelenmesi, bağıl ve mutlak sıcaklık ölçekleri arasında farkın tanımlanması ve referans PRT eşitliğinin ve düzeltme eşitliklerinin kullanımının incelenmesidir.

### KURAMSAL TEMELLER

Birçok madde ısıtıldığında ya da soğutulduğunda, fiziksel ve kimyasal özelliklerinde değişmeler meydana gelmektedir. Endüstriyel süreçlerde karşılaşılan en önemli ölçüm değişkenlerinden biri sıcaklıktır. Bir değişkenin ölçülmesi ya da kontrol edilmesi **ölçme** ya da **kontrollü değişken** olarak adlandırılır.

**Sıcaklık;** kesin bir ölçekte sıcaklığın ya da soğukluğun derecesi olarak tanımlanmaktadır. Sıcaklık ya da soğukluk moleküler hareketin sonucudur. Birmaddenin molekülleri ne kadar hızlı hareket ederse, o maddenin sıcaklığı o kadar artar. **Isı** ise enerjinin bir şeklidir ve kalori ya da BTU olarak ölçülür.

İki madde birbiri ile temas ettiğinde bir ısı akışı meydana gelmektedir. Bu akış yüksek sıcaklığa sahip maddeden düşük sıcaklığa sahip maddeye doğrudur. Isı akışı iki madde aynı sıcaklığa ulaştığında yani dengeye geldiğinde durmaktadır.

### 1. Sıcaklık Ölçümü

Sıcaklık ölçümü, genellikle sıcaklığa duyarlı prob ya da ölçülecek madde ile temas eden prob tarafından gerçekleştirilmekte ve madde termal dengeye gelene kadar beklenmektedir. Sıcaklık, probtaki bazı özelliklerdeki değişme ile gösterilmektedir. Bu değişme ölçülebilir ve bilinen sıcaklıklardaki sensörlerin davranışları ile karşılaştırılabilir- mektedir.

Sıcaklık ölçüm tekniği seçilirken sensörlerin ve ilişkili aletlerin ne şekilde cevap verdiği göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Elektronik cihazlar mekanik termometrelerden daha pahalı olmalarına rağmen, ölçümlerde daha doğru sonuçlar elde edilmesini ve çok kanallı sistemlerde çalışmayı sağlamaktadırlar [2]. Termometreler sıcaklığı ölçmek için kullanılmaktadırlar ve kullanıldıkları yere göre farklılık göstermektedirler. Farklı maddelerden yapılmış ve farklı prensiplerde tipleri aşağıda verilmektedir:

### 1.1. Sıvı-dolu termometreler

Sıvı dolu termometrelerde sıcaklık artışı, içerisinde bulunan sıvının genleşmesi ile gerçekleşmektedir. Yaygın olarak kullanılan şekli, verilen herhangi bir sıcaklık yükselmesinde camın genişlemesinden daha fazla olan içerisindeki sıvının genleşmesine dayanan sıvı-cam termometredir.

Termometre sıvı dolu ampul ile kılcal tüpten oluşmaktadır. Tüp yalnız sıvı ve sıvı buharını içermektedir. Isıtmada sıvı kaba göre daha fazla genişler ve sıvı sütunu borunun içerisindeki delikte itilir, görünen genleşme doğrusal bir yer değiştirir. Boru boyunca yer alan ölçek sıcaklığın okunmasını sağlayacak sıcaklık birimine göre kalibre edilecektir. Cam termometrelerde kullanılan tek sıvı civa değildir. Farklı sıvılar, örneğin alkol, civanın donma noktasının altındaki sıcaklık ölçümlerinde kullanılmaktadırlar (-38.87 °C ya da -37.96 °F). Sıvı-dolu termometrelerde sıcaklığın kolay okunabilmesi için alkole boya karıştırılmaktadır. Sıvı dolu cam termometreler -300 °F ile +600 °F sıcaklık aralığında kullanılmaktadırlar. Civa dolu termometreler ise -30 °F ile 800 °F arasındaki sıcaklıklarda kullanılır.

### 1.2. Bimetalik termometreler

Bimetalik termometrelerin çalışması, farklı metallerin farklı termal genleşme katsayısına sahip olması prensibini temel almaktadır. Farklı fiziksel özellikteki iki metalik alaşım birlikte eritilerek kaynaştırılır ve spiral ya da halka (helix) şekline getirilir. Buna **bimetalik element** denir. Bimetalik element ısıtıldığında her alaşım farklı termal genişlemeye sahip olduğu için açılmaktadır. Helixin açılması ile mil tarafından helixe bağlı gösterge hareket etmekte ve kalibre edilmiş ölçeğin üzerindeki sıcaklığı göstermektedir. Bimetalik termometreler -300 °F ile +800 °F arasındaki sıcaklıklar için

kullanılmaktadırlar. Bu termometreler +1000 °F sıcaklığında gösterebilmesine rağmen sürekli olarak bu sıcaklıkta ölçüm alırsa helix aşırı gerileceği için kalıcı yanlışlıklar oluşabilmektedir.

### 1.3. Basınç Termometreleri

**Basınçlı termometreler**, dolgu ortamının (gaz, sıvı ya da buhar veya sıvı ve gazın karışımı olabilir) basıncı ya da hacmindeki değişmeden kaynaklanan sıcaklık değişimine dayanmaktadır. Dolgu ortamını içeren metal tüp mekanik göstergeye ya da kayıt cihazına bağlıdır. Örneğin Bourdon gauge ile direk olarak kalibrasyonu yapılmış ve eş değer buhar basıncına karşılık gelen sıcaklık değeri okunur.

Kalibrasyon sıcaklık artışı ile basıncın hızla yükselmesinden dolayı lineerlikten uzaklaşır. Bu nedenle, buhar basınç termometresi büyük sıcaklık değişimlerinin olduğu çalışmalar için uygundur. Düşük sıcaklıklarda veya hassas okumalarda kullanılmamaktadır.

### 1.4. Isıl çift

En basit elektriksel sıcaklığa duyarlı aygıt ısıl çifttir. **Isıl çift**, farklı iki metal alaşımın uçlarının kaynaklanması (birleştirilmesi) ile oluşmaktadır. Kaynak noktası sıcak nokta, diğer açık iki uç ise soğuk nokta (referans nokta) olarak anılır. Isıl çift olayı sıcak nokta ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkından doğmaktadır. Bu sıcaklık farkı ile orantılı, soğuk nokta uçlarında mV mertebesinde gerilim üretilir. Isıl çift sıcak noktası ve soğuk noktası arasındaki sıcaklık dağılımı nasıl olursa olsun üretilen gerilim, sıcak ile soğuk nokta arasındaki sıcaklık farkı ile orantılıdır. Dolayısıyla soğuk noktanın sıcaklığı önemlidir. Sıcak nokta aynı kalmak kaydı ile soğuk nokta sıcaklığı değiştiği takdirde farklı sıcaklıklar okunacaktır. Bu sebeple ısıl çift mV tablolarındaki değerlerde standardizasyon sağlamak için ölçülen sıcaklık karşılığı mV değerleri soğuk noktanın 0°C'de tutulması ile elde edilmiştir.

### 1.5. Direnç Termometreler

**Direnç termometre**, iletken bir telin direnç değerinin sıcaklıkla değişmesinden istifade edilerek oluşturulan bir sıcaklık sensörüdür. Sarımlı direnç,

sıcaklığı ölçülmek istenilen ortama daldırılır, üzerinden sabit akım geçirilir. Sıcaklığın değişimi ile sarımlı direncin direnç değeri değişir ve üzerinden geçen sabit akımla değişen bir gerilim elde edilir. Direnç termometreler iyi elektrik iletkenliğine sahip nikel, bakır ve tungsten gibi metallere yapılmış olup sıcaklığın artması ile artan rezistansa sahiptirler. Tekrarlanabilirliği sağlamak için yaygın olarak platin ve nikel kullanılmaktadır. Standartlarda en çok kullanılan Pt-100 ve Ni-100 gibi rezistans termometrelerin 0°C’deki direnç değeri standart 100 ohm’dur.

## 1.6. Termistörler

**Termistör** denilen mercimek büyüklüğündeki sensörler, metal-oksit yarı iletkenlerden yapılır. Bu sensörlerin elektriksel direnci sıcaklıkla değişmektedir. Bunların direnci ölçülerek ilgili kalibrasyon grafiğinden sıcaklık bulunur. Termistörler, negatif ve pozitif sıcaklık katsayılı termistörler olmak üzere iki çeşittir. Negatif **sıcaklık katsayılı termistörler**, dirençleri ısı miktarı ile ters orantılı olarak değişen dirençlerdir. **Pozitif sıcaklık katsayılı termistörler**, dirençleri ısı miktarı ile doğru orantılı olarak değişen dirençlerdir.

## 2. Kalibrasyon

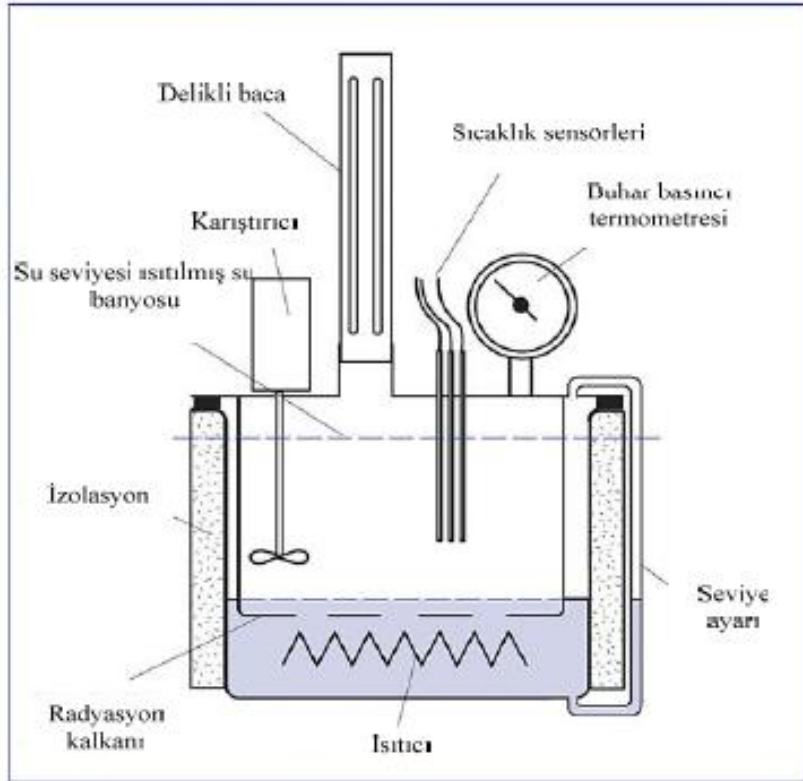
**Kalibrasyon**, tek noktalı veya çok noktalı olabileceği gibi, herkes tarafından bilinen veya kabul edilen değişkene göre cihazı veya aleti ayarlama işlemidir. Herhangi sıcaklık ölçüm cihazının kalibrasyonu bilinmeyen büyüklüğü karşılaştırmak için sabit referans noktalarının kullanımına dayanmaktadır. Sabit referansların kullanımı ölçüm cihazlarında aynı sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır.

Sıcaklığa duyarlı cihazın çıktıları belirli bir ölçekle lineer olması gerekmektedir. Kalibrasyon sırasında bütün sıcaklık aralıklarında okunan değerlere dikkat edilmeli ve ölçekte kullanılan standart değerler ile karşılaştırılmalıdır. Sıcaklığa karşı sensör çıktısı grafiğe geçirilmelidir. Bu grafik yardımıyla bilinen sensör çıktısına eşdeğer sıcaklık bulunabilmektedir. Sıcaklık ve sensör çıktısı arasındaki ilişki lineer olduğunda iki referans nokta kullanılarak cihazın kalibrasyonu mümkündür.

## DENEY DÜZENEGİ



Şekil 1. Deney düzeneği



Şekil 2. Hipsometre/Su banyosunun şeması

## DENEYİN YAPILIŞI

### *Deney A: Termometreye ait Özellikler*

- Deneye başlamadan önce buhar çıkışındaki delikli bacayı çıkartınız ve hipsometre/su banyosunu, sistemin ön tarafında bulunan seviye ayar göstergesindeki üstteki iki çizgi arasına gelecek şekilde saf su ile doldurunuz.
- Delikli bacayı tekrar yerine yerleştiriniz. Bu deney için endüstriyel PT100, referans PT100, düz çıplak uçlu ısı çift, termistör, cam termometre ve buhar basıncı termometresi kullanılacaktır.
- Sensörlerin hepsinin sensör taşıyıcıda güvenli olduğunu kontrol ediniz. (Sensörleri sensör taşıyıcısına sabitleyen cıvataların el sıkılığında olmasınadikkat ediniz). **DİKKAT:** Çıplak uçlu sensörlere dokunmayınız! Sensörleri taşırken çarpmayınız, vurmayınız!
- Sensörleri konsola doğru şekilde bağlayınız.
- Endüstriyel PT100 sensörünün “LOW” akım bağlantısında olduğunu kontrol ediniz. Isıl çift anahtarını “INT REF” getiriniz.
- Sensörleri su banyosunun üst kısmındaki conta üzerindeki deliklerden dikkatlice geçirin.
- Her bir sensör için başlangıç değerini okuyunuz. (Veriler konsol üzerindeki döner seçim düğmesi kullanılarak referans PRT, endüstriyel PRT, ısı çift ve termistörün değerleri dijital göstergeden okunacaktır. Buhar basınç termometre ve cam termometre okumaları direk olarak yapılacaktır.)
- Isıtıcı ve karıştırıcıyı açınız.
- Su banyosunun sıcaklığı artarken 2 °C aralıklarda her bir sensör için veri alın.
- Su kaynama noktasına ulaştığında birkaç dakika bu sıcaklıkta tutularak sensör okumalarını yapınız. (Bu süreç içerisinde su seviyesi sürekli kontrol edilmelidir). **DİKKAT:** Su kaynadığında devamlı bir buhar çıkışı olacağından yaralanmalara karşı dikkat ediniz.
- Isıtıcıyı kapatınız fakat soğumanın hızlı olabilmesi için karıştırıcıyı kapatmayınız. Su soğurken de 5°C aralıklarla sensörlerden veri alın.

### **Deney B: Sıcaklık Sensörlerinin Cevabı**

- Deneye başlamadan önce buhar çıkışıdaki delikli bacayı çıkartınız ve hipsometre/su banyosunu, sistemin ön tarafında bulunan seviye ayar göstergesindeki üstteki iki çizgi arasına gelecek şekilde saf su ile doldurunuz.
- Delikli bacayı tekrar yerine yerleştiriniz.
- İzole edilmiş buz kabını soğuk su ya da kırılmış buzla doldurunuz.
- Bu deney için endüstriyel PT100, referans PT100, kaplanmış ısıtıcı çift, 90° çıplak uçlu ısıtıcı çift, termistör ve cam termometresi kullanılacaktır.
- Düz çıplak uçlu ısıtıcı çifti, sensör taşıyıcısındaki civatayı gevşeterek çıkartınız ve yerine izole edilmiş buz kabındaki kaplanmış ısıtıcı çifti yerleştiriniz.
- Sensörlerin hepsinin sensör taşıyıcısında güvenli olduğunu kontrol ediniz ve civatanın el sıkılığında olmasına dikkat ediniz. **DİKKAT:** Çıplak uçlu sensörlere dokunmayınız! Sensörleri taşıırken çarpmayınız, vurmuyunuz!
- Sensörleri konsola doğru şekilde bağlayınız.
- Endüstriyel PT100 sensörünü “LOW” akım bağlantısına bağlayınız. Isıtıcı çift anahtarını “INT REF” getiriniz.
- Sensör taşıyıcısını izole edilmiş buz kabının içerisine daldırınız ve kararlı hale gelmesi için birkaç dakika bekleyiniz.
- PT100 referans termometrenin gösterdiği sıcaklık değerini kaydediniz. (Bu değer deneyde daha sonra referans değeri olarak kullanılacaktır).
- Sensörleri su banyosunun üst kısmındaki sensör taşıyıcı conta üzerindeki deliklere dikkatlice yerleştiriniz.
- Isıtıcıyı ve karıştırıcıyı açınız ve ısıtıcıyı maksimum seviyeye getiriniz.
- Referans termometre değeri izole edilmiş buz kabı sıcaklığından daha yüksek değeri gösterdiğinde (20 °C’den fazla) ısıtıcıyı kapatınız.
- Çalıştığımız sensörlerin okumasını döner seçim düğmesini kullanarak yapınız.
- PT100 referans termometre ile gösterilen sıcaklığı T1 olarak not ediniz.
- Hızlı fakat dikkatlice sensör taşıyıcısını su banyosundan izole edilmiş buz kabına yerleştiriniz.
- Beş saniye aralıklarla her bir sensör okumasını kaydediniz.
- Sensörden okunan değer sabitlendiğinde deneyi durdurunuz.
- PT100 referans termometre ile gösterilen sıcaklığı T2 olarak not ediniz.
- Cam termometresindeki okumaları ayrıca yapınız. Aynı ölçümleri bu defa sıcaklık

yükselmesine karşı sensör taşıyıcısını su banyosuna geri taşıyarak yapınız. Bu işlemleri her bir sensör için ayrı ayrı tekrarlayınız.

- Isıtıcıyı açınız ve maksimum seviyeye getiriniz.
- Su banyosunun sıcaklığını önceki sıcaklık değeri ile 100 °C arasındaki ortalama bir değere getiriniz ve ısıtıcıyı kapatarak ölçümleri tekrarlayınız.
- Isıtıcıyı açınız ve maksimum seviyeye getiriniz.
- Su banyosunun sıcaklığını kaynama noktasına getiriniz. Devamlı bir buhar çıkışını gözleyerek aynı ölçümleri tekrar ediniz.
- Isıtıcıyı ve karıştırıcıyı kapatınız.

### ***Deney C: Sensör Kalibrasyonun Temelleri***

- Deneye başlamadan önce buhar çıkışındaki delikli bacayı çıkartınız ve hipsometre/su banyosunu, sistemin ön tarafında bulunan seviye ayar göstergesindeki alttaki iki çizgi arasına gelecek şekilde saf su ile doldurunuz.
- Delikli bacayı tekrar yerine yerleştiriniz.
- Bu deney için referans PT100 termometre, düz çıplak uçlu ısı çift ve kaplanmış ısı çift kullanılacaktır. Kaplanmış ısı çift hariç sensörlerin hepsinin taşıyıcıda güvenli olduğunu kontrol ediniz. (Sensörleri sensör taşıyıcısına sabitleyen cıvataların el sıkılığında olmasına dikkat ediniz).
- Kaplanmış ısı çifti izole edilmiş buz kabın üzerinden çıkartınız ve cihaza yakın ve güvenli bir yere koyunuz (Ünitenin arka tarafı olabilir). **DİKKAT:** Çıplak uçlu sensörlere dokunmayınız! Sensörleri taşıırken çarpmayınız, vurmayınız!
- Sensörleri konsola doğru şekilde bağlayınız.
- Isıl çift anahtarını “EXT ICE POINT” ayarlayınız.
- Isıtıcıyı ve karıştırıcıyı açınız ve ısıtıcıyı maksimum seviyeye getiriniz.
- Saf sudan hazırlanmış küçük parçalara ayrılmış buz izole edilmiş buz kabına doldurunuz.
- Sensör taşıyıcısını metal tutucuya yerleştiriniz ve okunacak değerlerin sabitlenebilmesi için birkaç dakika bekleyiniz.
- Konsol üzerindeki düğmeyi “THERMOCOUPLE” ayarlayınız.

Bu deney için ısı çift devresinin iki bağlantısının birinde kaplanmış ısı çift diğeri ise düz çıplak uçlu ısı çift bulunmaktadır.



## 1. Isıl çift davranışı

- PT100 referans termometre okumasını ve ısı çift çıktısını kaydediniz. Bu değer  $e_0$ 'dır.
- Sensörleri izole edilmiş buz kabına yerleştiriniz ve okumanın sabitlenmesi için bekleyiniz. PT100 REF okumasını ve ısı çift çıktısını  $e_1$  olarak not ediniz.
- Sensörleri tekrar metal taşıyıcıya yerleştiriniz ve kararlı okuma sağlamak için bekleyiniz.
- PT100 REF okumasını ve ısı çift çıktısını kaydediniz.
- Sensör taşıyıcısını izole edilmiş buz kabına taşıyınız ve ölçümleri tekrarlayınız.
- Hipsometredeki su kaynama noktasına ulaşıncaya kadar bekleyiniz (buhar çıkışından buhar yükselecektir). Sensör taşıyıcısını hipsometrenin üst kısmına taşıyınız ve sensör çıktısını  $e_2$  olarak kaydediniz.
- İzole edilmiş buz kabında daha önce yapılan işlemi tekrarlayınız.  
*HİPSOMETREDEKİ SU SEVİYESİNİN SEVİYE GÖSTERGESİNDEKİ EN ALTTAKİ ÇİZGİNİN ALTINA İNMEMESİNE DİKKAT EDİNİZ.*
- Üç sıcaklığın her biri için (örneğin, izole edilmiş buz kabındaki, metal tutucudaki ve hipsometredeki sensör taşıyıcı ile) ısı çift çıktısının birbiri ile uyumlu ve tekrarlanabilir değer olduğunu doğrulayınız.
- Kaplanmış ısı çifti izole edilmiş buz kabının üzerine taşıyınız ve hipsometrenin üst kısmına sensör taşıyıcısını yerleştiriniz. Sensör okuması kararlı hale gelinceye kadar bekleyiniz ve ısı çift çıktısını  $e_3$  olarak kaydediniz.
- $e_3$  çıktısı ile  $e_1+e_2$ 'nin eşit olduğunu doğrulayınız.
- Hipsometredeki su seviyesini ve izole edilmiş buz kabındaki buz kontrol ediniz (Hipsometreye su ilave ederken dikkat ediniz).

## 2. Temel ısı çift kalibrasyonu

Deney A'dan ısı çiftin sıcaklık ile çıktı arasında lineer değişimin olduğu gözlenebilir. Bu özellikler verilen sensör çıktısı ile sıcaklık ilişkisini belirlemek için kullanılabilir. Bu yüzden sensör kalibre edilir.

- Sensör taşıyıcısını izole edilmiş buz kabının üzerine yerleştiriniz. Kararlı okuma gerçekleşinceye kadar bekleyiniz ve ısı çift çıktısını kaydediniz. Bu değer, suyun donma noktasına karşılık gelir ki  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak alınmalıdır.

- Sensör taşıyıcıyı hipsometreye yerleştiriniz. Kararlı okuma gerçekleşinceye kadar bekleyiniz ve ısı çift çıktısını kaydediniz. Bu değer suyun kaynama noktasıdır.
- Barometre kullanılarak laboratuardaki atmosfer basıncını belirleyiniz. Bu basınç değerinde suyun kaynama noktasını Çizelge 1’den bulunuz.
- Sıcaklığa karşı sensör çıktı grafiğinde iki referans nokta belirleyiniz ve bu noktaları bir doğru ile birleştiriniz. Eğer ısı çift birleşimi 0 °C’de korunuyorsa, diğer ısı çift birleşimindeki sıcaklığı belirlemek, sensör çıktısı kullanılarak mümkündür.
- Sensör taşıyıcısını, yakınındaki metal tutucuya yerleştirerek kalibrasyon grafiğini test edin ve sensörlerin oda sıcaklığına gelmesini bekleyiniz. Isıl çiftin gösterdiği okumaya, grafiği kullanarak, karşılık gelen sıcaklıkları bulunuz. Bu değeri PT100 referans termometreden elde edilenle karşılaştırınız.
- Hipsometredeki su seviyesini ve izole edilmiş buz kabındaki buzı kontrol ediniz (Hipsometreye su ilave ederken dikkat ediniz).

### ***3. Isıl çift termometrenin kalibrasyonu***

- Sensör taşıyıcıyı izole edilmiş buz kabının içerisine yerleştiriniz ve okuma sabitleninceye kadar birkaç saniye bekleyiniz.
- Döner seçim düğmesini “CALIBRATION” ayarlayınız. Dijital göstergeden °C olarak okuyunuz.
- Göstergeden sıfırı okuyana kadar “ZERO” düğmesinden sıfırı ayarlayınız. Güç çeviricisi 0 °C’ye eşitleninceye kadar elektromotor kuvveti ayarlanır.
- Sensör taşıyıcıyı hipsometreye yerleştiriniz ve okuma sabitleninceye kadar birkaç saniye bekleyiniz.
- Deneyde daha önceden belirlenen suyun kaynama noktasına eşitleninceye kadar “SPAN” düğmesinden değeri ayarlayınız.
- Kalibrasyon testi için ısıtıcıyı ve karıştırıcıyı kapatınız. Sensör taşıyıcıyı izole edilmiş buz kabına taşıyınız.
- PT100 termometre ve kalibrasyon yapılmış ısı çift termometreden okuma yapınız.
- Hipsometreyi su seviye göstergesindeki en üst iki çizgi aralığına kadar saf su ile doldurunuz. Isıtıcı ve karıştırıcıyı açınız.
- Su kaynama noktasına gelinceye kadar 30 saniye aralıklarla kalibrasyonu yapılmış ısı çift termometre ve PT100 referans termometre ile okuma yapınız.
- Isıtıcıyı ve karıştırıcıyı kapatınız.

### ***Deney D: Sıcaklık Ölçekleri ve Referans Eşitlikler***

- Deneye başlamadan önce buhar çıkışıdaki delikli bacayı çıkartınız ve hipsometre/su banyosunu, sistemin ön tarafında bulunan seviye ayar göstergesindeki alttaki iki çizgi arasına gelecek şekilde saf su ile doldurunuz.
- Delikli bacayı tekrar yerine yerleştiriniz.
- Bu deney için referans PT100 termometre ve endüstriyel PT100 sensör kullanılacaktır. Sensörlerin hepsinin taşıyıcıda güvenli olduğunu kontrol ediniz. **DİKKAT:** Çıplak uçlu sensörlere dokunmayınız! Sensörleri taşırken çarpmayınız, vurmuyunuz!
- Endüstriyel PT100 sensörünü “LOW” akım bağlantısına bağlayınız.
- Isıtıcıyı ve karıştırıcıyı açınız ve ısıtıcıyı maksimum seviyeye getiriniz.
- Saf su ile hazırlanmış buz ufacıklar halinde kırarak izole edilmiş buz kabına doldurunuz.
- Sensör taşıyıcısını metal tutucuya yerleştiriniz.
- Laboratuvarın barometrik basıncını belirleyiniz ve bu basınçtaki suyun kaynama noktasını Çizelge 1’den okuyunuz.
- Çizelge 2’yi kullanılarak suyun kaynama noktasındaki  $W_{ref}$  değerini belirleyiniz.
- Sensör taşıyıcısını izole edilmiş buz kabına yerleştiriniz. Konsolun önünde bulunan “IND PT100(LO)” düğmesini açınız ve direnç değerini okuyunuz. Bu değer donma noktasındaki,  $R(0.00^{\circ}\text{C})$ ’deki sensör direnç değerini verir.
- Hipsometredeki su kaynama noktasına ulaşmaya kadar bekleyiniz. (Hipsometredeki su seviyesini sürekli kontrol ediniz gerekirse su ilavesi yapınız).  
**HİPSOMETREDEKİ SU SEVİYESİNİN SEVİYE GÖSTERGESİNDEKİ EN ALTTAKİ ÇİZGİNİN ALTINA İNMEMESİNE DİKKAT EDİNİZ.**
- Sensör taşıyıcısını hipsometreye yerleştiriniz. Sensör değerleri sabitleninceye kadar bekleyiniz ve endüstriyel PRT’den değerleri okuyunuz. Bu değer ikinci sensör çıktısını  $R(T)$ ’yi vermektedir.
- Isıtıcıyı kapatınız ve sensör taşıyıcısını metal ayağın üzerine yerleştiriniz.
- Hipsometrenin soğuması için (buhar çıkışı olmayana kadar) birkaç dakika bekleyiniz.
- Hipsometre soğuduktan sonra delikli bacayı çıkartarak hipsometreyi soğuk saf su ile doldurunuz. Bu işlem sırasında buhar çıkışı varsa hipsometrenin soğuması için tekrar bekleyiniz. Hipsometre/su banyosunu, sistemin ön tarafında bulunan seviye ayar göstergesindeki üstteki iki çizgi arasına gelecek şekilde saf su ile doldurunuz.

- Sensör taşıyıcısı kabın üzerine yerleştiriniz.
- Referans PT100 termometre ve endüstriyel PT100 sensör çıktı değerlerini okumak için konsoldaki döner seçim düğmesini kullanınız.
- Sensör çıktıları sabitleninceye kadar bekleyiniz ve sonra iki sensörden okuma yapınız.
- Isıtıcıyı ve karıştırıcıyı açınız ve ısıtıcıyı maksimum seviyeye getiriniz.
- Bir dakika aralıklarla ısıtıcıyı minimum seviyeye getirip sensör çıktıları sabitleninceye kadar bekleyiniz. İki sensörden okuma yapınız ve tekrar ısıtıcıyı maksimum seviyeye getiriniz.
- Su banyosu kaynama noktasına ulaşıncaya kadar veri almaya devam ediniz. Daha sonra ısıtıcıyı ve karıştırıcıyı kapatınız.

## HESAPLAMALAR VE SONUÇLAR

### Deney D: Sıcaklık Ölçekleri ve Referans Eşitlikler

- Deneysel verileri kullanarak,  $W_{ref}$  değerlerini referans eşitliğini kullanarak hesaplayınız.

Platin direnç termometre için, 0 °C ile 961.8 °C arasında referans eşitliği aşağıdaki şekilde verilmiştir:

$$W_{ref} = C_0 + \sum_{i=1}^9 C_i \left\{ \frac{\left[ \left( \frac{T_{ref}}{^{\circ}\text{C}} \right) - 481 \right]^i}{481} \right\}$$

$$W_{ref} = \frac{R_{ref}(T)}{R(0.01^{\circ}\text{C})} \text{ referans direnç oranı}$$

$T_{ref}$ : sabit referans sıcaklığı

i=0'da  $C_0 = C_i$

$i$  ve  $C_i$  değerleri aşağıdaki tabloda verilmektedir:

$i$	$C_i$	$i$	$C_i$
0	2.78157254	5	0.00511868
1	1.64650916	6	0.00187982
2	-0.13714390	7	-0.00204472
3	-0.00649767	8	-0.00046122
4	-0.00234444	9	0.00057424

- Termometre direnç oranını,  $W$  aşağıdaki eşitlik ile hesaplayınız:

$$W = \frac{R(T)}{R(0.00^\circ\text{C})}$$

- $W$ 'nin bu değerini ve hesaplanan  $W_{ref}$  değerini kullanarak “a” katsayısını hesaplayınız:

$$W - W_{ref} = a(W - 1)a = \frac{W - W_{ref}}{W - 1}$$

- Referans eşitliğinden iterasyon ile aşağıdaki eşitlik kullanılarak  $T$ 'yi hesaplayınız:

$$\frac{T}{^\circ\text{C}} = D_0 + \sum_{i=1}^9 D_i \left\{ \frac{[(W_{ref}) - 2.64]}{1.64} \right\}^i$$

$i$	$D_i$	$i$	$D_i$
0	439.932854	5	0.005184
1	472.418020	6	-0.963864
2	37.684494	7	-0.188732
3	7.472018	8	0.191203
4	2.920828	9	0.049025

## TARTIŞMA

### Deney A: Termometreye ait özellikler

- Verileri aşağıdaki tabloya kaydediniz.

PT100REF Termometresi (°C)	PT100IND Termometresi (Ω)	Isıl çift (μV)	Termistör (Ω)	Cam Termometre (°C)	Buhar Basıncı Termometresi (°C)

- PT100 Referans okumalarına karşı her bir sensör okumalarını grafiğe geçiriniz.
- İncelenilen sıcaklık aralığında her bir sensör davranışını inceleyiniz.
- Soğuma sırasında elde edilen değerler ile ısınma sırasında elde edilen değerleri karşılaştırınız.
- Sıcaklık ölçümleri için her bir cihazın uygunluğunu yorumlayınız.
- Her bir cihazın avantajlarını ve limitlerini, çevresel etkilere dayanımı ve ölçüm kolaylığı yönünden tartışınız.
- Sensör yapımında kullanılan malzemelerdeki aranan özellikleri belirtiniz.

### Deney B: Sıcaklık Sensörlerinin Cevabı

- Her bir sıcaklık aralığı için aşağıdaki tabloda bulunan başlıkları kullanarak sonuçları yazınız.

Zaman (s)	PT100 REF (°C)	PT100 IND (Ω)	Ucu Açık Kaynaklı Isıl Çift (V)	Muhafazalı Isıl Çift (V)	Termistör (Ω)	Cam Termometre (°C)

- Her bir sensör için zamana karşı verilerinizi grafiğe geçiriniz.
- Her grafikte, okumanın sabitlendiği son değerin %63.2'si olan Sensör değerini işaretleyiniz. Basamak değişiminden sonra benzer zamanda bunoktay1 sıcaklık farkını dikkate almadan tespit ediniz. Bu değer sensörün cevabıdır.
- Farklı sensörlerin cevaplarını ve cevabın doğruluğa etkisini yorumlayınız.
- İki ısı1 çift için elde edilen sonuçları karşılaştırınız. Isıl çiftin kaplanmış olmasının sensör cevabına etkisini açıklayınız.
- İki platin direnç termometreleri için elde edilen sonuçları karşılaştırınız. Sensör cevabına kılıf çapının etkisini açıklayınız.
- Sıcaklıktaki hızlı değişimleri veya küçük salınımların sabit olabildiği uygulamalar için her sensörün uygunluğunu tartışınız. Hem hızlı cevabın hem de çevresel etkilere dayanımlı bir tasarımın istendiği endüstri uygulamaları için sıcaklık sensörü tasarımının zorluklarını açıklayınız.

### **Teknik Bilgi**

- PT100 Referans termometre kılıf çapı: 2 mm'dir.
- PT100 Endüstriyel termometre kılıf çapı: 10 mm'dir.
- Termistör ve muhafazalı ısı1 çiftin kılıf çapları: 3 mm'dir.

### ***Deney C: Sensör Kalibrasyonun Temelleri***

- Atmosfer Basıncı: .....
- Deney Süresince Suyun Kaynama Noktası: ..... °C
- Aşağıdaki tabloyu doldurunuz:

<b>Isıl Çift Çıktılar</b>			
<b>e<sub>0</sub></b>	<b>e<sub>1</sub></b>	<b>e<sub>2</sub></b>	<b>e<sub>3</sub></b>

- Isıl Çift Çıktısı (Donma Noktası): ..... V(0°C'de ref. junction)
- Isıl Çift Çıktısı (Kaynama Noktası): ..... V(0°C'de ref. junction)

- Aşağıdaki tabloyu doldurunuz:

PT100 REF (°C)	Isıl Çift (°C)

- Deneyin üçüncü kısmında elde edilen veriler kullanılarak ısı çift çıktılarına (°C) karşı PT100 değerlerini grafiğe geçirin.
- Kalibrasyon için referans noktası olarak suyun donma noktası kullanılırsa oluşabilecek hata nerelerden kaynaklanabilir? Açıklayınız.
- Kalibrasyon grafiğinden doğru sıcaklık değerinin okuyamamanızın sebebi nedir?
- Referans termometrenin gösterdiği sıcaklıkla kalibre edilmiş ısı çift termometreden elde edilen sonuçları karşılaştırınız. Kalibre edilmiş ısı çiftin doğruluğunu yorumlayınız.

#### **Deney D: Sıcaklık Ölçümleri ve Referans Eşitlikler**

Barometrik Basınç : .....

Suyun Kaynama Noktası : ..... (°C)

$W_{ref}$  : .....

$R(0.00^{\circ}\text{C})$  : ..... (Ω)

$a$  : .....

- Verileri ve hesaplanan değerleri aşağıdaki tabloya kaydediniz:

Geçen zaman (s)	PT100 Referans (°C)	PT100 Ind (=R(T)) (Ω)	W ( $= \frac{R(T)}{R(0.00^{\circ}\text{C})}$ )	T (PT100 Ind) (°C)



- PT100 referans termometrenin gösterdiği sıcaklık değerlerini ve endüstriyel PT100 okumalarından hesaplanan sıcaklık değerlerini grafiğe geçiriniz.
- Endüstriyel platin direnç termometreden elde edilen sonuçlar yorumlayınız.
- Elde edilen sonuçların doğru olarak kalibre edilmiş referans termometreden elde edilen sonuçlara ne kadar yakın olduğunu karşılaştırınız. Farklılıkların sebeplerini yorumlayınız.

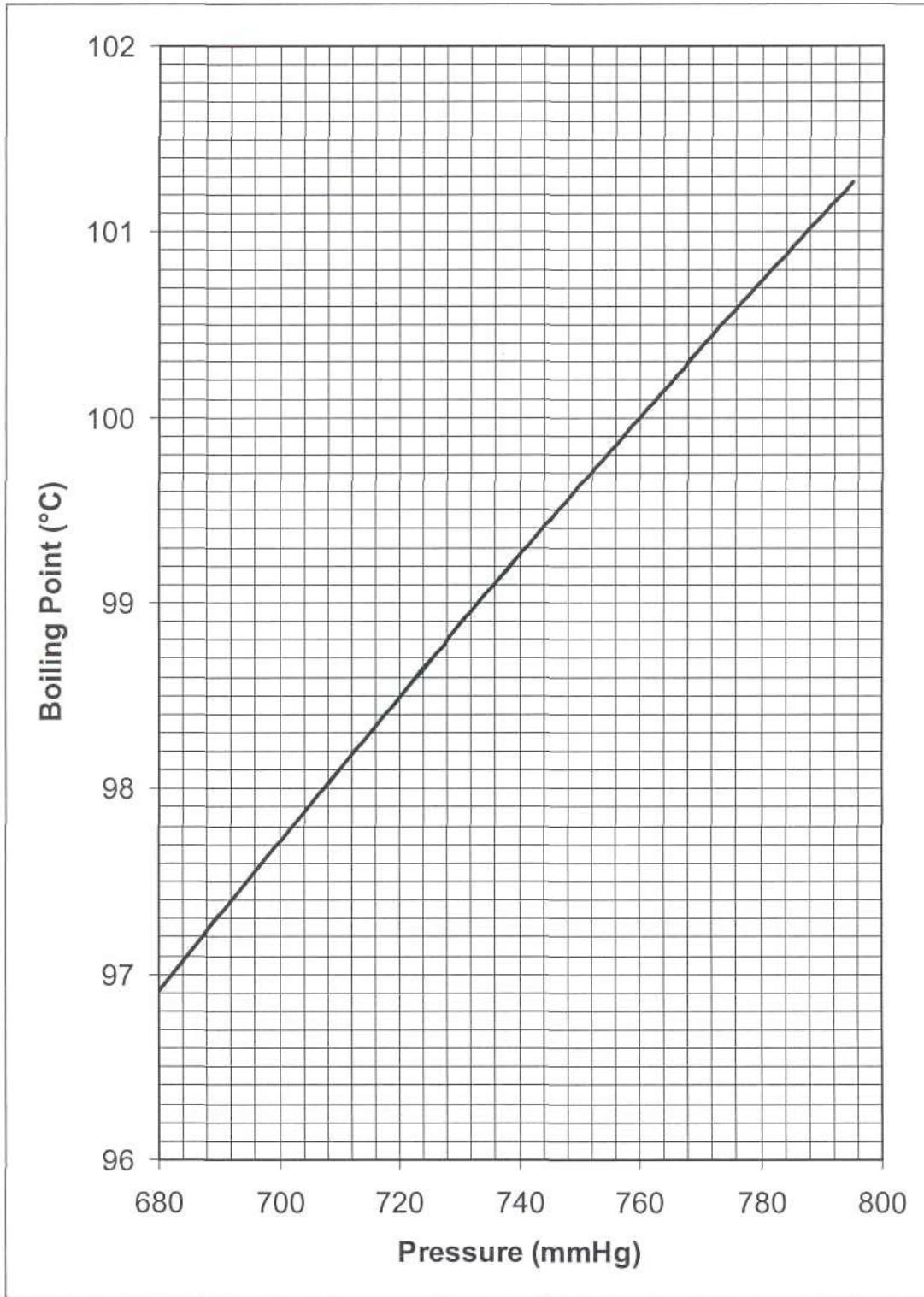
## **SORULAR**

1. Isı ve sıcaklık arasındaki farkı açıklayınız.
2. Bimetalik termometrenin çalışma prensibini açıklayınız.
3. Basınç termometrelerin çalışma prensibini ve özelliklerini araştırınız.
4. Sıcaklık ölçüm metotları ve dayandıkları prensipler nelerdir? Açıklayınız.
5. Doğruluk ve tekrarlanabilirlik nedir? Açıklayınız.
6. Kalibrasyon nasıl yapılır? Açıklayınız.
7. Isıl çift çeşitlerini ve özelliklerini araştırınız.

## **KAYNAKLAR**

- [1] KIRK, F.W.ve RIMBOİ, N.R., Instrumentation, American Technical Publishers,USA, 1975.
- [2] KOÇYİĞİT, S. ve İŞÇİ, C., Termoçift Kalibrasyonu ve Sıcaklık Ölçme, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen ve Mühendislik Dergisi, 1(2), 13-20, 2000.
- [3] Armfield, Temperature Measurement and Calibration Teaching Manuals, 1998.
- [4] Isı Elektrik Cihazları Makine Sanayi, Termoelemanlar: Isıl Çiftler, 2006.
- [5] Elektrik Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi, Pasif Devre Elemanlar
- [6] http-1: <http://www.isielektrik.com>
- [7] http-2: [www.emo.org.tr](http://www.emo.org.tr)

Çizelge 1. Farklı Basınçlarda Suyun Kaynama Noktası Değerleri



Çizelge 2. Platin Direnç Termometre Direnç Oranlar

Sıcaklık (°C)	Wref (0.01)	Sıcaklık (°C)	Wref (0.01)
96.5	1.37535	99.0	1.38890
96.6	1.37961	99.1	1.38929
96.7	1.38000	99.2	1.38968
96.8	1.38039	99.3	1.39006
96.9	1.38078	99.4	1.39045
97.0	1.38116	99.5	1.39084
97.1	1.38155	99.6	1.39123
97.2	1.38194	99.7	1.39161
97.3	1.38232	99.8	1.39200
97.4	1.38271	99.9	1.39239
97.5	1.38310	100.0	1.39277
97.6	1.38349	100.1	1.39316
97.7	1.38387	100.2	1.39355
97.8	1.38426	100.3	1.39393
97.9	1.38465	100.4	1.39432
98.0	1.38503	100.5	1.39471
98.1	1.38542	100.6	1.39509
98.2	1.38581	100.7	1.39548
98.3	1.38620	100.8	1.39587
98.4	1.38658	100.9	1.39625
98.5	1.38697	101.0	1.39664
98.6	1.38736	101.1	1.39703
98.7	1.38774	101.2	1.39741
98.8	1.38813	101.3	1.39780
98.9	1.38852	101.4	1.39819

## **DENEY NO:2 MODEL SEDİMENTASYON TANKI**

### **DENEYİN AMACI**

**Deney 1:** Ayırıcı tekniğini kullanarak sedimentasyon tankı modelinin hidrolik özelliklerinin incelenmesi.

**Deney 2:** Perdeli veya perdesiz sedimentasyon tankının sedimentasyon kapasitesinin değerlendirilmesi.

### **KURAMSAL TEMELLER**

Çökeltim (sedimentasyon), bir akışkan ortam içerisinde bulunan ve yoğunluğu akışkan yoğunluğundan fazla olan katı partiküllerin doğal koşullarda yerçekimi etkisi altında aşağıya doğru hareket ederek sıvı fazından ayrılması sürecidir. Birbiri içerisinde yayılan iki fazdan oluşan bir ortamda akışkan özelliğe sahip bir fazın içerisinde asılı halde bulunan katı partiküller boyut ve yoğunluklarına bağlı olarak belli hızlarla hareket ederek süspansiyondan ayrılırlar. Mühendislik uygulamalarında gerek kesikli ve gerekse sürekli akışlı işletimde çökeltimi gerçekleştirmek için sıvı faz (su) bir tankta belli süre bekletilerek katı ile sıvı fazın birbirlerinden ayrılması sağlanır (sakin çökeltim). Örneğin su ve atıksu arıtma tesislerinde, katı partiküllerin su fazından ayrılması en ekonomik olarak sakın çökeltim olarak bilinen yerçekimi kuvvetleri etkisi altında (gravitasyonel sedimentasyon) gerçekleştirilir.

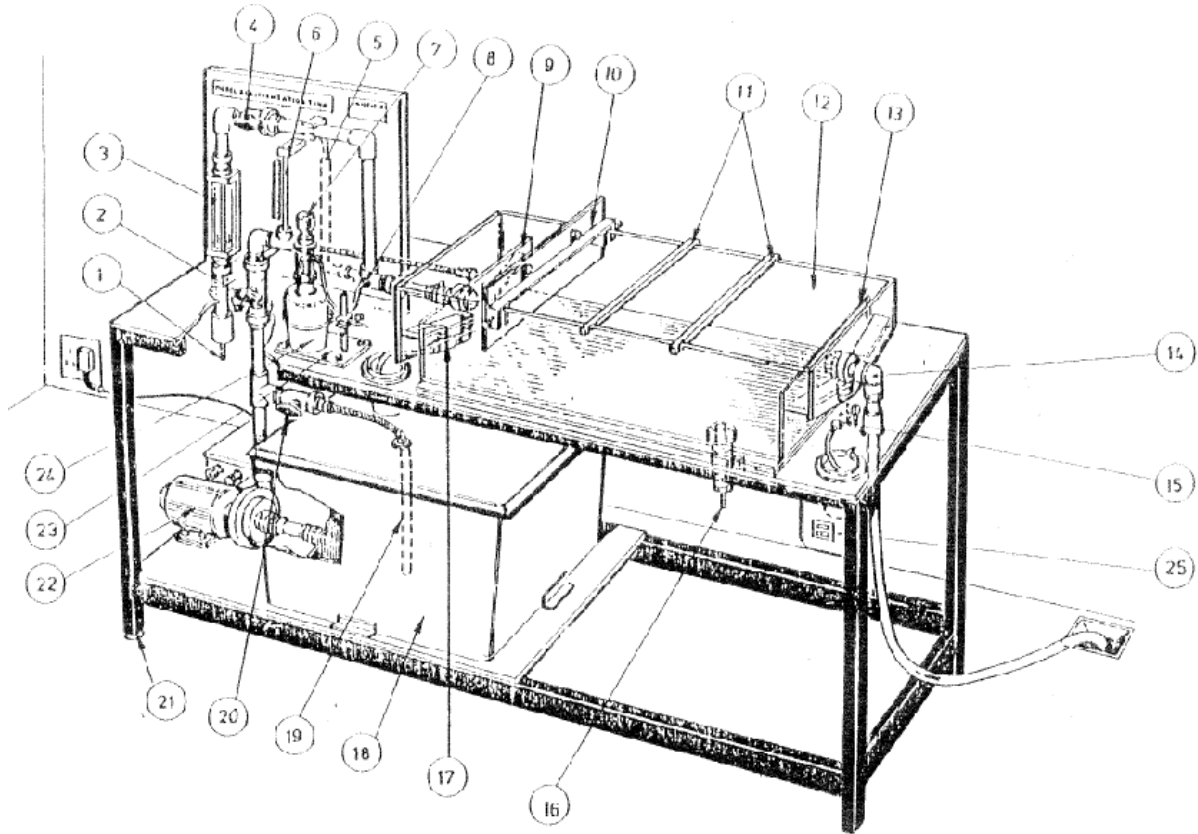
Çok farklı büyüklükte ve akış düzeneğinde sedimentasyon tankı, su arıtma tesislerinde, pis su arıtmada ve endüstri atıklarını temizlemede kullanılmaktadır. Prensip olarak dikdörtgen şekilli tanklarda akış sondan başlar ve sondan çıkar, daire şekilli radyal bir akış düzeneği vardır. Silindirik konik ve piramit şekilli tanklarda akış yönü yukarı ve aşağı doğrudur.

Sedimentasyon tanklarının modelleri ile ilgili bir çok çalışma yapılmasına karşın hala küçük modellerde hangi modelin uygulanacağı konusunda görüş birliğine varılamamıştır. Bunun ana nedeni, Reynolds veya Froude'un sayılarına dayanarak genel hidrolik oranlarının küçük tanklarda (büyüklerine kıyasla) uygulanmasının imkansız olmasıdır.

Büyük ve küçük sistemler arasındaki fark çok büyüktür, örneğin farklı sıvılar veya farklı kümelerdeki parçacıklarla uygulamak pratik bir çözüm değildir. Bütün bunlardan farklı olarak

tam boyutlardaki tankların çalıştırılmasında, akış hızı, rüzgar, sıcaklık, yoğunluk gibi farklı durumlarda etkili olmaktadır. Fakat basit tank modellerinde yinede hidrolik ve sedimentasyon performansının özelliklerini görmek mümkündür. Deneyler akışın düzenlenmesi veya katı atıkların temizlenmesi için geliştirilmiştir.

Sedimentasyon tankının çalışma prensibi şöyle açıklanır: su laboratuardaki ana kaynaktan (1) alınır ve tanka (12) akış ölççere (3) ve akış kontrol vanasına (4) dağılır. Çalışmalar için çamur şeklinde bir malzeme toplama tankında (13) hazırlanır ve akış kontrol vanasından (2) geçerek pompalanır. Özel hazırlanmış akış ölçer (6) taze su girişinin tanka girişine bağlanmıştır. Böylece iyice karıştırılıp hazırlanmış çamur şeklinde malzeme ve su tanka ayarlanabilir bir setten (10) gelmektedir. Gerekli olursa giriş setinden (9) önce ve örnek çıkışlarından (17) ve (15) örnek almak mümkündür. Tank deney sırasında çökelmelerin olmaması için ayırıcılarla (19) bölünmüştür. Bu bölmelerde akış vana (20) ile kontrol edilebilir. Hidrolik izleyici ve görsel çalışmalar için boya-enjeksiyon ekipmanı kullanılmaktadır. Hacmi bilinen bir çözelti tanka girişten hemen önce enjekte edilmektedir. Çökeltilerin özelliklerinin bulunması için Armfield sedimentasyon ekipmanı T/2 kullanılmalıdır.



Şekil 1. Sedimentasyon tankı

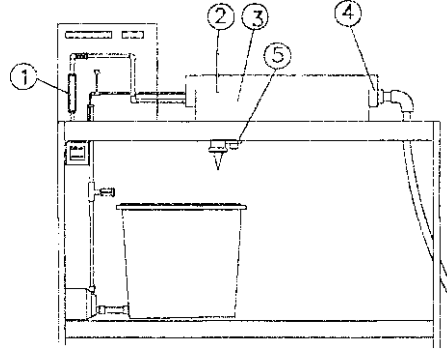
## CİHAZIN ÇALIŞTIRILMASI

Çalıştırma, ekipmanın doğru çalışıp çalışmadığını test etmek için musluk suyu ile yapılmalıdır.

- 1) Tanka (12) seviye göstericiyi yerleştirin ve yükseklik ayarını (21) yapın.
- 2) **Not:** Boşaltmanın (13) doğru çalışabilmesi için yatay olarak yerleştirilmelidir. Eğer seviye göstergesi uygulanmamışsa aşağıdaki metot uygulanabilir.
  - a) Vana (2), (4) ve (16)'yı kapatın.
  - b) Tank (12)'yi temiz su ile çıkış bentinin hizasına kadar doldurun.
  - c) Seviyeyi paralel olacak şekilde ayarlayın.
- 3) (2,4,20) vanalarını ve (15,17) boşaltma vanalarını kapatın.
- 4) Toplama tankını temiz su ile doldurun.
- 5) Enjektörü boya rezervuarından(24) çıkarın ve rezervuarı boya ile doldurun. Enjektörü yerine takıp rezervuarı yerine yerleştirin.
- 6) Boya öncelikle 1 litre deiyonize/damıtılmış su ile karıştırılmalıdır. 3mg mavi boyayı 1 litre deiyonize/damıtılmış suya boşaltın ve iyice çalkalayın.
- 7) Pompayı çalıştırmak için (25) elektrik bağlantılarını yapın.
- 8) Ayırıcı akış kontrol vanasını (20) açın suyun toplama tankının (18) ayırıcı borusundan (19) ayırıcı borusundan geçmesini kontrol edin.
- 9) Sedimentasyon akışı kontrol vanası (2)'yi açın. Suyun tanka giriş borusundan geldiğini kontrol edin. Suyun akışı akış ölçerde (6) görülecektir. Boşaltma tüpünün arka kısımda yerleştirilmiş olduğunu kontrol edin.
- 10) Soğuk su kaynağını ekipmana bağlayın. Vana (4)'ü açın. Suyun gelişini tanktan ve akış ölçerden kontrol edin.
- 11) Tankı su ile boşaltma bendinde su akıncaya kadar doldurun.
- 12) Boya enjektöründeki (24) pompa pistonunu (7) bastırın ve boyanın tanka girdiğini kontrol edin.
- 13) Boşaltma için (15) ve(17)'yi açın. Ekipman kullanıma hazır durumdadır.

## DENEYSEL YÖNTEM

### Deneysel 1

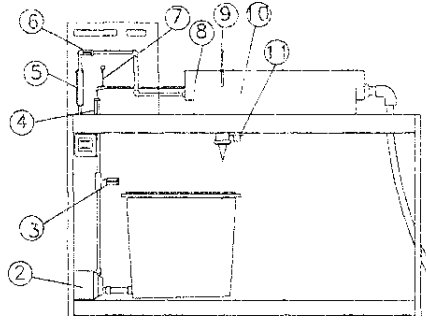


Şekil 2. 1 numaralı deney düzeneği

Bu deneyde suyun yoğunluğu değiştirilmeden tracer (izleyici) olarak boya katılır. Böylece suyun tanka akışı görsel olarak izlenebilir ve boya içeriği hakkında bilgi fluorimetre ile veya spektrofotometre ile edilebilir.

1. Sedimentasyon tankının (3) su kapasitesi boyutlarından hesaplanır ve ortalama 20 dakika kalış süresi için akış hızı bulunur. Musluk (5) kapatılır.
2. Yüksek akış hızı (1) ayarlanarak sedimentasyon tankı su ile doldurulur, sonrasında akış oranı (1) hesaplanan değere düşürülür.
3. %5 Rodamin-B boya stok çözeltisi hazırlanır. Bu çözeltinin sedimentasyon tankında su ile karıştırıldığında 2mg/litre konsantrasyonunu verecek hacmi hesaplanır. Hesaplanan hacimde stok çözeltisi alınır ve 100 ml'ye seyreltin.
4. Tankı doldurmanın ötesinde, ilk kalma süresi için dikey perde(2) olmadan suyun tanka akışını sağladıktan sonra tracer boya enjekte edilir ve süre tutulmaya başlanır.
5. Boyalı suyun tankın derinliği ve menzili boyunca ilerleyişini kaydettiğiniz sürelerde taslaklar ile not alınız.
6. Renk çıkış bentine (4) yaklaştığı zaman 10 dakika için her 2 dakikada ve 50 dakika için her 10 dakikada akıntı örnekleri alınır.
7. Suyun akışını durdurun, tanktaki suya karıştırın ve bir örnek daha alın.
8. Aynı işlemleri girişten sonra dikey perde(2) kullanarak yapın ve zaman ile akış düzenindeki farklılıklarını not alın.

## Deney 2



Şekil 3. 2 numaralı deney düzeneği

Sedimentasyon tankının verimliliği giriş kısmının geometrisine bağlıdır. Girişte su yüzeyine dik yerleştirilmiş bir perde (baffle) akıntıda devredilen akıdaki maddeleri azaltabilir.

1. 30 dakikalık kalma süresini verecek şekilde akış oranı hesaplanır.
2. Tank (1) beslemesi için %20 w/w(ağırlıkça) tebeşir tozu karışımı hazırlanır. Daha iyi bir karışım için hesaplanan kütledeki tebeşir tozu bir kovaya konur ve yeterli musluk suyu ekleyerek viskoz bir bulamaç elde etmek üzere şiddetli bir şekilde karıştırılır. Elde edilen bulamaç nihai konsantrasyonu %20 olacak şekilde seyreltilir.
3. Perde (9), tankın üst kısmından 90 mm aşağıya ve giriş bentinden (8) 50mm aşağıya dik olarak yerleştirilir. Süspansiyon vanası (4) ve boşaltma mantarının (11) kapalı olduğu kontrol edilir.
4. Pompa çalıştırılır (2), bypass vanası (3) açılır ve kireçtaşının (kalsiyum karbonat) besleme tankında iyice dağıldığı kontrol edilir.
5. Tank (10) musluk suyu ile doldurulur ve türbülansın kaybolması beklenir.
6. Musluk suyu akış hızı (5), vana (6)'dan hesaplanan değer  $\frac{3}{4}$ 'ü kadar ayarlanır. Süspansiyon akış hızı (7), vana (4) ile hesaplanan değer  $\frac{1}{4}$ 'ü kadarına ayarlanır.
7. Süspansiyon tanka girdiği zaman süre tutulmaya başlanır ve belli aralıklarla bulanıklık not edilir.
8. Örnekler tankın değişik derinliklerinden ve belirlenen konumlardan uygun şırınga ile alınabilir. Bu örnekler uygun türbidimetrik alet ya da belirlenen küçük tüplerle analiz edilebilir; çökeltinin derinliği konsantrasyon ölçümünü verir.
9. Deney bir de perde olmaksızın ya da farklı derinlikte ve farklı akış hızlarında yapılabilir.



## HESAPLAMALAR VE SONUÇLAR

**Sonuç 1:** Tanktaki akışın perde üzerindeki etkileri not edilmelidir. Örneklerdeki boya konsantrasyonu değerleri fluorimetre veya spektrofotometri ile alınır ve sonuçlar karşılaştırılır.

**Sonuç 2:** Tankın verimliliği, sıvı içinde kalan asılı maddelerin oranı ile ölçülebilir. Bir çalışmada akış oranının sedimentasyon üzerindeki etkisini görmek için yapılabilir.

## KAYNAK

Mazlum N., Arttırılmış Yüzeyle Sahip Tanklarda Çökeltim, Selçuk Üni. İnşaat Müh ABD, 2007, Isparta.

Armfield W7 Engineering Teaching and Research Equipment Instruction Manual, UK, 1995.

## DENEY NO: 3 KATI-SIVI EKSTRAKSİYON

### DENEYİN AMACI

Kapalı sirkülasyon durumunda tek kademeli katı-sıvı ekstraksiyonunda, kütle denkleğinin kurulması, ekstraksiyon veriminin belirlenmesi ve şeker emdirilmiş inert katıdan (vermiculite) şekerin ekstraksiyonuna sıcaklığın ve akış hızının etkisinin gözlenmesi.

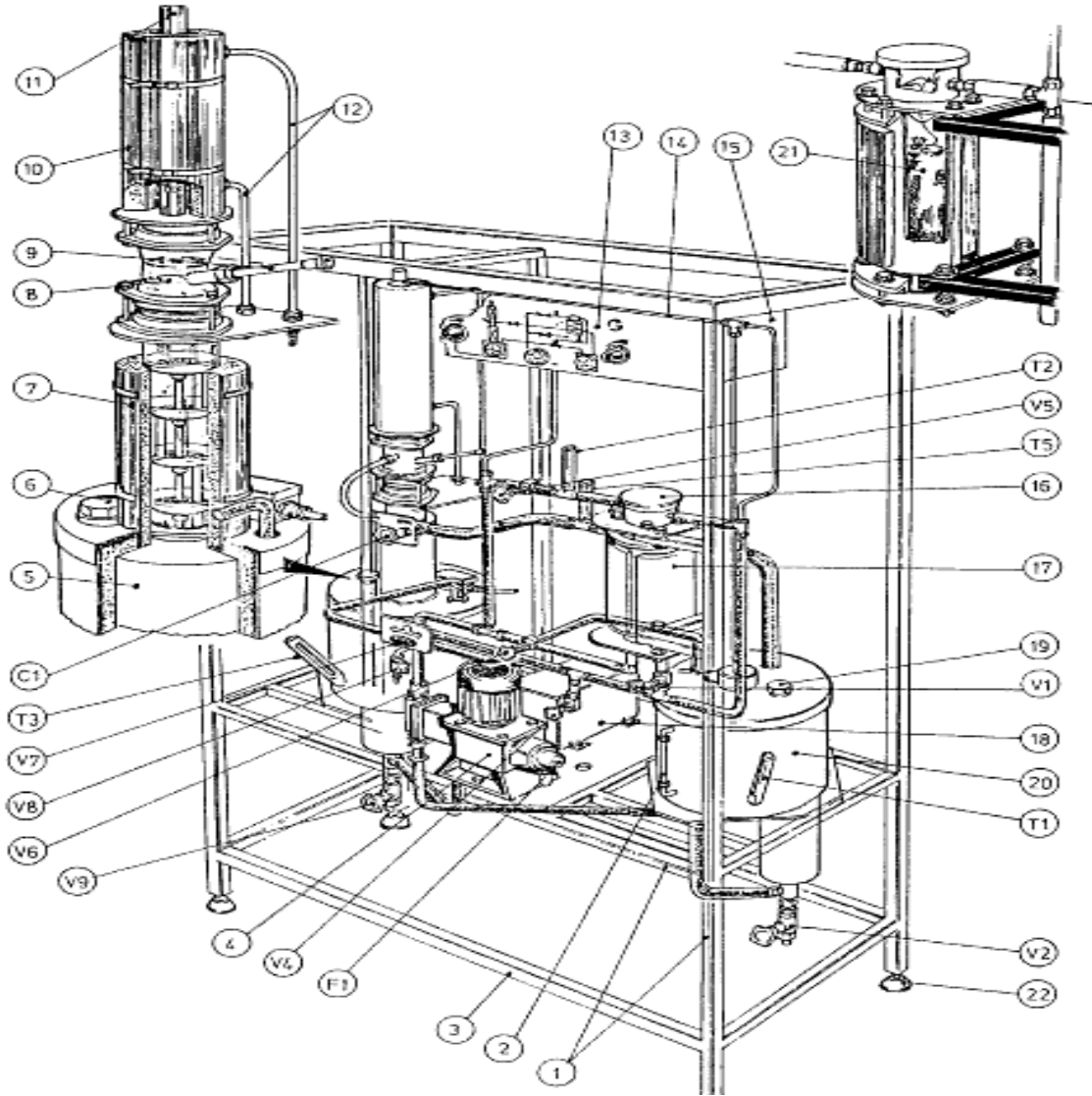
### KURAMSAL TEMELLER

Katı-sıvı özütlemesi (ekstraksiyon), çok bileşenli bir katıdan istenilen bileşenin bir çözücü ile çözümlenerek ayrılmasıdır. Bu deneyde katı-sıvı özütlemesi incelenecektir. Kimya mühendisliğinde biyolojik, anorganik ve organik maddelerin üretiminde yaygın olarak kullanılan katı-sıvı özütlemesi için günlük yaşamdan verilebilecek en güzel örnek çay veya kahve yapımıdır. Endüstriyel boyutta ise; seker pancarından seker, yağlı tohumlardan yağ elde edilmesi katı-sıvı özütlemesine verilebilecek örneklerdendir.

Katı-sıvı özütlemesine etki eden faktörler üç ana grupta toplanabilir.

- *Çözücü ile madde teması:* Katının hazırlanması, kırma, öğütme, parçalara bölme veya yeniden şekillendirme olarak gerçekleştirilebilir. Çözünmesi istenen madde katı yüzeyinde ise, çözücü ile özütlemesi kolaydır, kolayca ekstre edilebilir. Çözünmesi istenen madde katının içinde ise, katının bir ön işlemde geçirilerek parçacık boyutunun küçültülmesi ile katı-çözücü temas yüzeyi artırılarak özütleme verimi yükseltilebilir.
- *Kullanılan çözücünün seçimi:* Özütleme işlemi için seçilen çözücü istenilen maddeyi çözebilen yapıda olmalıdır. Çözücüde çözünen maddenin doygunluk noktasına bağlı olarak çözücü kapasitesi belirlenir. Ancak çözücü kapasitesi ne olursa olsun, kullanılan çözücü miktarı katının miktarına göre seçilmelidir. Çözücü, özütlenen katıdan ve ekstre çözücünden (çözünen+çözücü) kolayca ayrılabilme özelliğine sahip olmalıdır. Özütlemelerde düşük kaynama noktasına sahip çözücülerin kullanılması tercih edilir.
- *Sıcaklık:* Özütleme işleminde yüksek sıcaklıklarda çalışmak çözünen maddenin çözücüye geçişini hızlandırır. Ekstrakte edilecek katının yapısına bağlı olarak sıcaklıkla özütleme verimi artmasına rağmen, yüksek sıcaklıkta bazı bileşenlerin yapısında bozunmalar oluşabilir ve arzu edilmeyen bileşikler de çözünebilir.

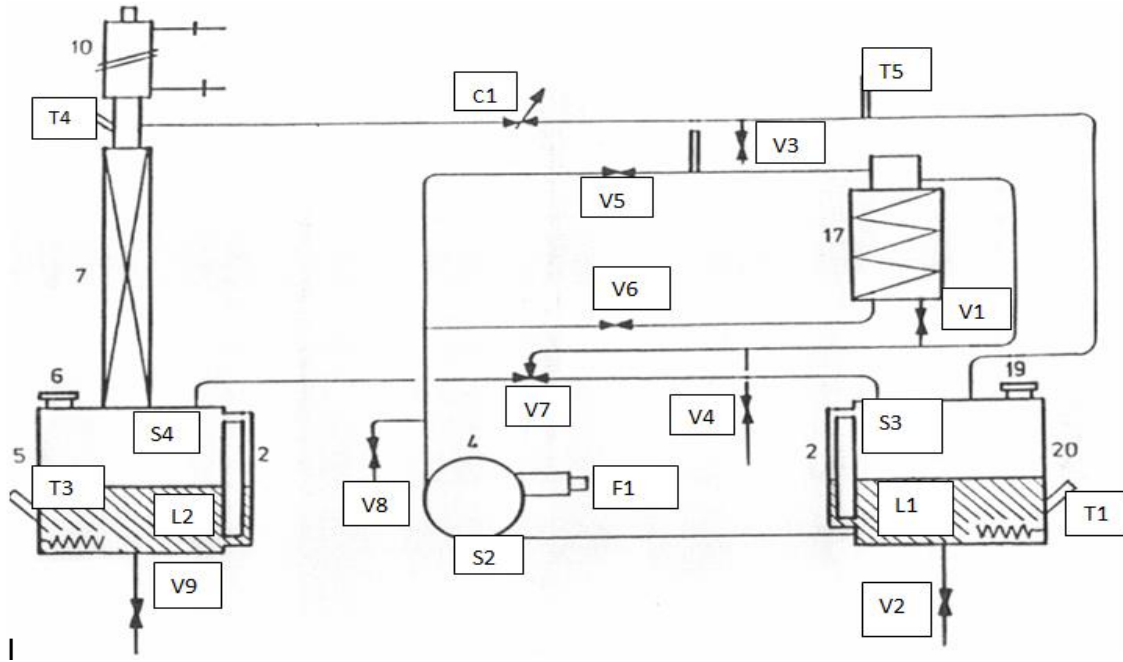
## DENEY DÜZENEGİ



Şekil 1. : Katı- sıvı ekstraksiyon ünitesi. Sistem diyagramı (Komponentler-Aletler)

- |  |                            |                                      |
|--|----------------------------|--------------------------------------|
| 1 , 3- Ekstraktör iskelesi                             | 2- Sıvı seviye göstergesi  | 4- Metrik pompa                      |
| 5, 20- Çözücü tankları(5lt)                            | 6, 19- Borusal tank kapağı | 7-Cam distilasyon kolonu             |
| 8- Refluks ayırma bölgesi                              | 9- Termometre çıkışı       | 10- Kondenser                        |
| 11, 14- Gravite esasına dayanan sıvı seviye göstergesi |                            | 12- Kondensere soğuk su giriş-çıkışı |
| 13- Kontrol paneli                                     | 15- Elektrik donanımı      | 16- Ekstraktör kapağı                |
| 17- Ekstraktör kabı                                    | 18- Transformator          | 21- Terilen örnek torbası            |
| 22- Taşıyıcı vidalar                                   |                            |                                      |

**T- Termometreler V- Vanalar C- Refluks kontrol vanası F- Pompa ayarlayıcısı**



Şekil 2. Sistem diyagramı (Komponentler-Aletler)

- |  |                                      |                          |
|--|--------------------------------------|--------------------------|
| 1, 3- Ekstraktör iskelesi                              | 2- Sıvı seviye göstergesi            | 4- Metrik pompa          |
| 5, 20- Çözücü tankları(5lt)                            | 6, 19- Borusal tank kapağı           | 7-Cam distilasyon kolonu |
| 8- Refluks ayırma bölgesi                              | 9- Termometre çıkışı                 | 10- Kondenser            |
| 11, 14- Gravite esasına dayanan sıvı seviye göstergesi | 12- Kondensere soğuk su giriş-çıkışı | 13- Kontrol paneli       |
| 15- Elektrik donanımı                                  | 16- Ekstraktör kapağı                | 17- Ekstraktör kabı      |
| 18- Tranformatör                                       | 21- Terilen örnek torbası            | 22- Taşıyıcı vidalar     |

**T- Termometreler V- Vanalar C- Refluks kontrol vanası F- Pompa ayarlayıcısı**

## DENEYİN YAPILIŞI

### Hammadde (kuru şeker emdirilmiş vermiculite )hazırlanması

Ekstrakte edilecek maddenin deneyler için hazırlanması aşağıda verilmiştir:

Ekstrakte edilebilir maddeden 350 g şeker 1.5 litre kaynar suda çözülür, 3 litre vermiculite katılır ve karıştırılır, fırında 105°C de kurutulur (Süper Fine vermiculite çok küçük tanecikli olup. Büyüklüğü 1 mm olup kg/m<sup>3</sup> ü ise 80-120 dir)

### Uygulama

1. Deney başlangıcında çözücü tankının (20) ve toplama kazanın (5) altındaki drenaj vanalarının kapalı olması sağlanır.
2. Çözücü tankı yarısına kadar (2,5 lt ) kullanılacak çözücü, saf su ile doldurulur.
3. Terilen özütleme torbasına, önceden hazırlanmış olan hammadden 220 g doldurulur ve bağlanır, ekstraktör kabına(17) yerleştirilir ve ağzı kapatılır.[Yapılacak hesaplamalar için tartılan numune miktarı ve özütleme torbası ile bağlama ipi ağırlıkları kaydedilmelidir]
4. Pompa (F1) çalışma hızı% 40 verimle olacak şekilde ayarlanır
5. Isıtıcı S3 düğmesinden açılır ve suyun sıcaklığı 55°C' ye getirilir, S2 düğmesine basılarak pompa çalıştırılır. Sıcaklık 55°C' de sabit tutulur.
6. V5 ve V1 vanaları açık, V6 vanası kapalı ve V7 saat yönünde(sola) çevrilerek akışın toplama kazanı (5) yönünde olması sağlanarak çalışma başlatılır.
7. Diğer bütün vanalar kapatılır.
8. 15 dk beklenerek sistemin yatışkın duruma gelmesi beklenir. Sonra V4 ve V8 vanalarından 2–5 dk'da bir örnek alınır, her defasında ağızdaki birkaç mL atılır (İlk birkaç dakika boşa akmasını bekleyin). Ekstraktör kabındaki çözücü sıcaklığı T2 termometresinden okunur sıcaklık kaydedilir. Alınan numunelerin 20°C de refraktometre ile çözünür kurumadde ve kırılma indisi okumaları yapıp not edilir.
9. Özütleme bitiğinde pompa düğmesine(S2) basılarak kapatılır. Tekrar kullanılmayacaksa S1 düğmesine basılarak sistemin tamamen kapatılması sağlanır.
10. V1 vanası açılarak Ekstraktör kabında (17)kalan çözücünün toplama kabı(5) aktarılması sağlanır.
11. Ekstraktör kabının tamamen drenajından sonra numuneyi içeren özütleme torbasıda çıkarılır, numune bir kaba boşaltılır ve etüvde 105°C sıcaklıkta hem numune hem de özütleme torbası kurutulur, desikatörde ortam sıcaklığına gelene kadar bekletilir ve daha sonra da tartılırlar.
12. Akış hızının (mL/dk) ölçülmesi için deneyin sonunda V9 vanası açılarak toplanan çözücü hacmi bir mezür yardımıyla belirlenir ve toplam uygulama süresi kaydedilir

## HESAPLAMALAR VE SONUÇLAR

Alınan numune miktarını, çözücü hacmini, son tartım değerlerini kaydediniz.

Sistem kararlı hale gelene kadar belli zaman aralıklarında (2-5dk) numuneler alınarak refraktometrede okumaların yapılmasına devam edilir.

Zaman (dk)	V4 vanasındaki refraktometre okuması	V8 vanasındaki refraktometre okuması	Kırılma indisi (V4)	Kırılma indisi (V8)	Çözücü sıcaklığı, °C (T2)

Şeker miktarı ve elde edilen diğer sonuçlardan deneysel ve analitik çözüm yöntemleri kullanılarak % inert maddede kalan şeker miktarı hesaplanır. V4 ve V8 vanalarından yapılan okumalar için zamana karşı kırılma indisi ve % şeker miktarı grafiğe geçirilir.

**İnert katıda kalan şeker** = son tartılan şeker miktarı – inert katı miktarı

**Ekstrakte edilen şeker** = İnert katıya emdirilen şeker miktarı – inert katıda kalan şeker miktarı

Ekstraksiyon verimi aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanır:

$$(\% \text{ ekstrakte edilen şeker}) = \frac{(\text{ekstrakte edilen şeker miktarı})}{(\text{inert maddeye emdirilen şeker miktarı})} \times 100$$

V4 ve V8 vanalarından yapılan okumalar için % şeker miktarları hesaplanır ve tablo halinde verilmedir. *Numunelerin % şeker konsantrasyonu ya aşağıda verilen formülden ya da 20°C'da okunan kırılma indisi değerine göre, Tablo 1'den bulunabilir.*

$$\% \text{ şeker miktarı} = \frac{(B_x) (V)}{M}$$

M

B<sub>x</sub> : Briks derecesi      V : hacim, mL      M : örnek kütlesi, g

## DEĞERLENDİRME VE YORUM

- Katı-sıvı ekstraksiyonunda katı/çözücü oranının etkilerini irdeleyiniz.
- Katı-sıvı ekstraksiyonunda katıya uygulanan ön işlemlerin ekstraksiyon verimine etkilerini anlatınız.
- Katı-sıvı ekstraksiyonunda uygun çözücü seçiminin önemini belirtiniz.
- Çözücü seçiminde dikkat edilmesi gereken özellikleri detaylı bir şekilde açıklayınız.
- Katı-sıvı ekstraksiyonunda çözücü sıcaklığının etkilerini irdeleyiniz.

## KAYNAKLAR

- Anadolu Üniversitesi Kimya Mühendisliği Laboratuvarı Özütleme Deney Föyü
- Armfield UOP4 Engineering Teaching and Research Equipment Instruction
- Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği Laboratuvarı Katı Sıvı Ekstraksiyonu Deney Föyü.  
Manual, UK, 1995.
- Treybal, R., "Mass-Transfer Operations", 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, N.Y., 1980, pp 747-761
- University Of Minnesota Duluth, Department Of Chemical Engineering, Che 3211–4211, Leaching <http://www.d.umn.edu/~dlong/exleach.pdf>
- Bekir Cemeroğlu, Gıda Analizleri,2007, Nobel Yayın Dağıtım

## EK-1

### Suda Çözünen Kuru Maddenin Saptanması (Refraktometrik Yöntem)

#### Abbe Refraktometresi

Gıda maddeleri su ve kuru madde olmak üzere iki kısımdan oluşur. Ortamdan su uzaklaştırıldığında kuru madde kalır. Bu kısma genellikle toplam kuru madde denir. Toplam denmesinin nedeni kuru maddenin iki ayrı öğeden oluşmasıdır. Toplam kurumaddenin;

- Bir kısmı suda çözünmeyen nitelikteki maddelerden kaynaklanır. Toplam kuru maddenin suda çözünmeyen kısmına **suda çözünmeyen kuru madde** denir.
- Bir kısmı ise suda çözünebilir nitelikteki maddelerden kaynaklanır.

Toplam kuru maddenin suda çözünen kısmına **suda çözünür kuru madde, briks** ya da **refraktometre değeri** denir.

Refraktometri, her ortamın kırılma indisinin farklı olması prensibini kullanarak, konsantrasyon ve madde miktarı tayinleri yapmaya yarayan bir yöntemdir.

Kırılma indisi her maddeye özgü fiziksel özelliktir, bu sebeple kalitatif ve kantitatif analizlerde kullanılan bir metottür. Kırılma indisi tayininde Abbe Refraktometresi kullanılacaktır.

Abbe refraktometresinde iki prizmanın arasına kırılma indisini tayin edeceğimiz maddeyi sıvı film olarak yerleştiririz. Prizmalara gönderdiğimiz ışık ile, kritik açıdan daha küçük açı ile gelen ışınların oluşturduğu aydınlık bölge ve kritik açıdan daha büyük açıyla gelen ışınların oluşturduğu karanlık bölgeyi görebiliriz.

İçerisinde çözünmüş madde içeren çözeltilerde, ışık, yoğunluğu farklı ortamlardan birinden diğerine geçerken kırılır. Işığın kırılması, suda çözünmüş maddenin karakteristik özelliğidir ve onun konsantrasyonunun ölçüsüdür. Işık az yoğun ortamdan çok yoğun ortama geçerken normaline yaklaşarak kırılır. Işığın geliş açısı  $\alpha$ , kırılma açısı  $\beta$  ise;

$$\sin \alpha / \sin \beta = n$$

oranına,  $n$ , ışığın kırılma katsayısı (= refraktif indisi) denir. Kırılma indisi aslında ışığın bir ortamdaki hızının diğer bir ortamdaki hızına oranıdır. Bunun için de refraksiyon indisleri daima 1'den büyüktür. Refraksiyon indisini etkileyen etmenler sabit tutularak her maddenin saf ve çözelti hallerinin belirli kırılma katsayıları bulunur. Önce bir çalışma eğrisi çizilir, sonra da bu eğriden yararlanılarak bileşimi bilinmeyen karışımın kırılma katsayısı ölçülmek suretiyle bileşimi belirlenir.

. Bu bakımdan belli sıcaklıklarda ölçüm yapıldığı zaman, eğer sıcaklık bir miktar saparsa, düzeltme etmeni kullanılarak gerçek kırılma katsayısı belirlenir. Ancak bu sapma miktarının



+5°C'yi aşmaması gerekir. Refraktometrenin kuru madde skalası 20 °C'daki saf sakkaroz çözeltisine göre ayarlanmıştır.

$$F=0,00035$$

$t_1$ = ölçümün yapıldığı sıcaklık derecesi

$t$ =ölçümün yapılması gerekli sıcaklık derecesi

$$t_1 > t \quad \text{ise} \quad n_t = n_{t1} + (t_1 - t) \times F$$

$$t_1 < t \quad \text{ise} \quad n_t = n_{t1} - (t - t_1) \times F \text{ olur.}$$

## Deneyin Yapılışı

Refraktometre ile sadece berrak yani süspansiyon halinde katı parçacıklar içermeyen örnekler incelenmelidir. Bulanık çözeltiler refraktometredeki aydınlık ve karanlık bölgeyi ayıran hattın belirgin ve kesin olarak oluşmasını engeller ve analiz sonucu hatalı bulunur. Bu nedenle örneğin berrak olmasını sağlayacak şekilde hazırlanmasına dikkat edilmelidir.

### Refraktometre ile ölçümde işlem basamakları

- Uygun ve yeterli ışık kaynağı ile gerekli ışıklandırma sağlanır.
- Prizma kapağı açılır ve temiz olup olmadığı kontrol edilir. Gerekirse prizma saf su ile yıkanır ve yumuşak kâğıt mendille silinerek kurulur.
- Refraktometre kullanılmadan önce, ayarlı olup olmadığı kontrol edilmelidir. Prizmaya saf su damlatıldığında kırılma indisi değeri 1,3330 ve refraktometri "0" okunuyorsa refraktometre ayarlıdır. Değilse,
- Refraktometre kalibre edilir; Refraktometrenin ayarının yapılması için ya aletle birlikte satılan ve kırılma katsayısı belli olan sıvılar kullanılır; ya da bu mümkün değilse, n değeri 1,3330 kırılma katsayısına sahip saf su kullanılır.

Daha sonra, temiz ve kuru prizma yüzeyine, homojen hale getirilen numuneden 1 damla damlatılır. Örnek konduktan sonra prizma kapağı kapatılır.

- Ayar vidaları ile aydınlık ve karanlık bölge netleştirilir.
- Karanlık ve aydınlık bölgenin kesiştiği noktadaki **kırılma indisi** ve **Suda Çözünür Kuru Madde Miktarı** okunur(Örneğin kırılma indisi 20 °C'da saptanır)

Eğer örnekte bir sulandırma/seyreltme yapılmışsa aşağıdaki formül kullanılarak hesaplama yapılır.

$$\% \text{ Suda Çözünür Kuru Madde Miktarı ( g / 100 mL )} = \frac{\mathbf{B \times V}}{\mathbf{\ddot{O}}}$$

**B:** Seyreltilmiş örnekte saptanan briks derecesi

**V:** Örneğin seyreltiildiği hacim ( ml )

**Ö:** Örnek miktarı ( g )

*Örneğin 20 °C'da okunan kırılma indisi değerine ve konsantrasyonuna göre, Tablo 1'den suda çözünen kuru madde miktarı bulunabilir.*

- Okuma yapıldıktan sonra prizma yüzeyi önce doğrudan sonra saf su ile silinir ve kurulanır. Prizma ve kapak arasına yumuşak kâğıt konur.

Tablo 1: Kırılma İndeksi - % Sakaroz Çevrim Tablosu

n 20°C	sakaroz %	n 20°C	sakaroz %	n 20°C	sakaroz %	n 20°C	sakaroz %	n 20°C	sakaroz %
1.3330	0.009	1.3365	2.436	1.3400	4.821	1.3435	7.164	1.3470	9.466
1.3331	0.078	1.3366	2.505	1.3401	4.888	1.3436	7.230	1.3471	9.531
1.3332	0.149	1.3367	2.574	1.3402	4.956	1.3437	7.296	1.3472	9.596
1.3333	0.218	1.3368	2.642	1.3403	5.023	1.3438	7.362	1.3473	9.661
1.3334	0.288	1.3369	2.711	1.3404	5.091	1.3439	7.429	1.3474	9.726
1.3335	0.358	1.3370	2.779	1.3405	5.158	1.3440	7.495	1.3475	9.791
1.3336	0.428	1.3371	2.848	1.3406	5.225	1.3441	7.561	1.3476	9.856
1.3337	0.498	1.3372	2.917	1.3407	5.293	1.3442	7.627	1.3477	9.921
1.3338	0.567	1.3373	2.985	1.3408	5.360	1.3443	7.693	1.3478	9.986
1.3339	0.637	1.3374	3.053	1.3409	5.427	1.3444	7.759	1.3479	10.051
1.3340	0.707	1.3375	3.122	1.3410	5.494	1.3445	7.825	1.3480	10.116
1.3341	0.776	1.3376	3.190	1.3411	5.562	1.3446	7.891	1.3481	10.181
1.3342	0.846	1.3377	3.259	1.3412	5.629	1.3447	7.957	1.3482	10.246
1.3343	0.915	1.3378	3.327	1.3413	5.696	1.3448	8.023	1.3483	10.311
1.3344	0.985	1.3379	3.395	1.3414	5.763	1.3449	8.089	1.3484	10.375
1.3345	1.054	1.3380	3.463	1.3415	5.830	1.3450	8.155	1.3485	10.440
1.3346	1.124	1.3381	3.532	1.3416	5.897	1.3451	8.221	1.3486	10.505
1.3347	1.193	1.3382	3.600	1.3417	5.964	1.3452	8.287	1.3487	10.570
1.3348	1.263	1.3383	3.668	1.3418	6.031	1.3453	8.352	1.3488	10.634
1.3349	1.332	1.3384	3.736	1.3419	6.098	1.3454	8.418	1.3489	10.699
1.3350	1.401	1.3385	3.804	1.3420	6.165	1.3455	8.484	1.3490	10.763
1.3351	1.470	1.3386	3.872	1.3421	6.231	1.3456	8.550	1.3490	10.828
1.3352	1.540	1.3387	3.940	1.3422	6.298	1.3457	8.615	1.3490	10.892
1.3353	1.609	1.3388	4.008	1.3423	6.365	1.3458	8.681	1.3490	10.957

1.3354	1.678	1.3389	4.076	1.3424	6.432	1.3459	8.746	1.3490	11.021
1.3355	1.747	1.3390	4.144	1.3425	6.498	1.3460	8.812	1.3490	11.086
1.3356	1.816	1.3391	4.212	1.3426	6.565	1.3461	8.878	1.3490	11.150
1.3357	1.885	1.3392	4.279	1.3427	6.632	1.3462	8.943	1.3490	11.215
1.3358	1.954	1.3393	4.347	1.3428	6.698	1.3463	9.008	1.3490	11.279
1.3359	2.023	1.3394	4.415	1.3429	6.765	1.3464	9.074	1.3490	11.343
1.3360	2.092	1.3395	4.483	1.3430	6.831	1.3465	9.139	1.3500	11.407
1.3361	2.161	1.3396	4.550	1.3431	6.898	1.3466	9.205	1.3501	11.472
1.3362	2.230	1.3397	4.618	1.3432	6.964	1.3467	9.270	1.3502	11.536
1.3363	2.299	1.3398	4.686	1.3433	7.031	1.3468	9.335	1.3503	11.600
1.3364	2.367	1.3399	4.753	1.3434	7.097	1.3469	9.400	1.3504	11.664
1.3505	11.728	1.3560	15.207	1.3615	18.595	1.3670	21.896	1.3725	25.114
1.3506	11.792	1.3561	15.269	1.3616	18.655	1.3671	21.955	1.3726	25.172
1.3507	11.856	1.3562	15.332	1.3617	18.716	1.3672	22.014	1.3727	25.230
1.3508	11.920	1.3563	15.394	1.3618	18.777	1.3673	22.073	1.3728	25.287
1.3509	11.984	1.3564	15.456	1.3619	18.837	1.3674	22.132	1.3729	25.345
1.3510	12.048	1.3565	15.518	1.3620	18.898	1.3675	22.192	1.3730	25.403
1.3511	12.112	1.3566	15.581	1.3621	18.959	1.3676	22.251	1.3731	25.460
1.3512	12.176	1.3567	15.643	1.3622	19.019	1.3677	22.310	1.3732	25.518
1.3513	12.240	1.3568	15.705	1.3623	19.080	1.3678	22.369	1.3733	25.576
1.3514	12.304	1.3569	15.767	1.3624	19.141	1.3679	22.428	1.3734	25.633
1.3515	12.368	1.3570	15.829	1.3625	19.201	1.3680	22.487	1.3735	25.691
1.3516	12.431	1.3571	15.891	1.3626	19.262	1.3681	22.546	1.3736	25.748
1.3517	12.495	1.3572	15.953	1.3627	19.322	1.3682	22.605	1.3737	25.806
1.3518	12.559	1.3573	16.016	1.3628	19.382	1.3683	22.664	1.3738	25.863
1.3519	12.623	1.3574	16.078	1.3629	19.443	1.3684	22.723	1.3739	25.921
1.3520	12.686	1.3575	16.140	1.3630	19.503	1.3685	22.781	1.3740	25.978
1.3521	12.750	1.3576	16.201	1.3631	19.564	1.3686	22.840	1.3741	26.035
1.3522	12.813	1.3577	16.263	1.3632	19.624	1.3687	22.899	1.3742	26.093
1.3523	12.877	1.3578	16.325	1.3633	19.684	1.3688	22.958	1.3743	26.150
1.3524	12.940	1.3579	16.387	1.3634	19.745	1.3689	23.017	1.3744	26.207
1.3525	13.004	1.3580	16.449	1.3635	19.805	1.3690	23.075	1.3745	26.265
1.3526	13.067	1.3581	16.511	1.3636	19.865	1.3691	23.134	1.3746	26.322
1.3527	13.131	1.3582	16.573	1.3637	19.925	1.3692	23.193	1.3747	26.379
1.3528	13.194	1.3583	16.634	1.3638	19.985	1.3693	23.251	1.3748	26.436
1.3529	13.258	1.3584	16.696	1.3639	20.045	1.3694	23.310	1.3749	26.493
1.3530	13.321	1.3585	16.758	1.3640	20.106	1.3695	23.369	1.3750	26.551
1.3531	13.384	1.3586	16.819	1.3641	20.166	1.3696	23.427	1.3751	26.608
1.3532	13.448	1.3587	16.881	1.3642	20.226	1.3697	23.486	1.3752	26.665

1.3533	13.511	1.3588	16.943	1.3643	20.286	1.3698	23.544	1.3753	26.722
1.3534	13.574	1.3589	17.004	1.3644	20.346	1.3699	23.603	1.3754	26.779
1.3535	13.637	1.3590	17.066	1.3645	20.406	1.3700	23.661	1.3755	26.836
1.3536	13.700	1.3591	17.127	1.3646	20.466	1.3701	23.720	1.3756	26.893
1.3537	13.763	1.3592	17.189	1.3647	20.525	1.3702	23.778	1.3757	26.950
1.3538	13.826	1.3593	17.250	1.3648	20.585	1.3703	23.836	1.3758	27.007
1.3539	13.890	1.3594	17.311	1.3649	20.645	1.3704	23.895	1.3759	27.064
1.3540	13.953	1.3595	17.373	1.3650	20.705	1.3705	23.953	1.3760	27.121
1.3541	14.016	1.3596	17.434	1.3651	20.765	1.3706	24.011	1.3761	27.178
1.3542	14.079	1.3597	17.496	1.3652	20.825	1.3707	24.070	1.3762	27.234
1.3543	14.141	1.3598	17.557	1.3653	20.884	1.3708	24.128	1.3763	27.291
1.3544	14.204	1.3599	17.618	1.3654	20.944	1.3709	24.186	1.3764	27.348
1.3545	14.267	1.3600	17.679	1.3655	21.004	1.3710	24.244	1.3765	27.405
1.3546	14.330	1.3601	17.741	1.3656	21.063	1.3711	24.302	1.3766	27.462
1.3547	14.393	1.3602	17.802	1.3657	21.123	1.3712	24.361	1.3767	27.518
1.3548	14.456	1.3603	17.863	1.3658	21.183	1.3713	24.419	1.3768	27.575
1.3549	14.518	1.3604	17.924	1.3659	21.242	1.3714	24.477	1.3769	27.632
1.3550	14.581	1.3605	17.985	1.3660	21.302	1.3715	24.535	1.3770	27.688
1.3551	14.644	1.3606	18.046	1.3661	21.361	1.3716	24.593	1.3771	27.745
1.3552	14.707	1.3607	18.107	1.3662	21.421	1.3717	24.651	1.3772	27.802
1.3553	14.769	1.3608	18.168	1.3663	21.480	1.3718	24.709	1.3773	27.858
1.3554	14.832	1.3609	18.229	1.3664	21.540	1.3719	24.767	1.3774	27.915
1.3555	14.894	1.3610	18.290	1.3665	21.599	1.3720	24.825	1.3775	27.971
1.3556	14.957	1.3611	18.351	1.3666	21.658	1.3721	24.883	1.3776	28.028
1.3557	15.019	1.3612	18.412	1.3667	21.718	1.3722	24.941	1.3777	28.084
1.3558	15.082	1.3613	18.473	1.3668	21.777	1.3723	24.998	1.3778	28.141
1.3559	15.144	1.3614	18.534	1.3669	21.836	1.3724	25.056	1.3779	28.197
1.3780	28.253	1.3835	31.317	1.3890	34.310	1.3945	37.233	1.4000	40.091
1.3781	28.310	1.3836	31.372	1.3891	34.363	1.3946	37.286	1.4001	40.142
1.3782	28.366	1.3837	31.428	1.3892	34.417	1.3947	37.338	1.4002	40.194
1.3783	28.422	1.3838	31.482	1.3893	34.471	1.3948	37.391	1.4003	40.245
1.3784	28.479	1.3839	31.537	1.3894	34.524	1.3949	37.443	1.4004	40.296
1.3785	28.535	1.3840	31.592	1.3895	34.578	1.3950	37.495	1.4005	40.348
1.3786	28.591	1.3841	31.647	1.3896	34.632	1.3951	37.548	1.4006	40.399
1.3787	28.648	1.3842	31.702	1.3897	34.685	1.3952	37.600	1.4007	40.450
1.3788	28.704	1.3843	31.757	1.3898	34.739	1.3953	37.653	1.4008	40.501
1.3789	28.760	1.3844	31.812	1.3899	34.793	1.3954	37.705	1.4009	40.553
1.3790	28.816	1.3845	31.867	1.3900	34.846	1.3955	37.757	1.4010	40.604
1.3791	28.872	1.3846	31.922	1.3901	34.900	1.3956	37.810	1.4011	40.655

1.3792	28.928	1.3847	31.976	1.3902	34.953	1.3957	37.862	1.4012	40.706
1.3793	28.984	1.3848	32.031	1.3903	35.007	1.3958	37.914	1.4013	40.757
1.3794	29.040	1.3849	32.086	1.3904	35.060	1.3959	37.967	1.4014	40.808
1.3795	29.096	1.3850	32.140	1.3905	35.114	1.3960	38.019	1.4015	40.860
1.3796	29.152	1.3851	32.195	1.3906	35.167	1.3961	38.071	1.4016	40.911
1.3797	29.208	1.3852	32.250	1.3907	35.220	1.3962	38.123	1.4017	40.962
1.3798	29.264	1.3853	32.304	1.3908	35.274	1.3963	38.175	1.4018	41.013
1.3799	29.320	1.3854	32.359	1.3909	35.327	1.3964	38.228	1.4019	41.064
1.3800	29.376	1.3855	32.414	1.3910	35.380	1.3965	38.280	1.4020	41.115
1.3801	29.432	1.3856	32.468	1.3911	35.434	1.3966	38.332	1.4021	41.166
1.3802	29.488	1.3857	32.523	1.3912	35.487	1.3967	38.384	1.4022	41.217
1.3803	29.544	1.3858	32.577	1.3913	35.540	1.3968	38.436	1.4023	41.268
1.3804	29.600	1.3859	32.632	1.3914	35.593	1.3969	38.488	1.4024	41.318
1.3805	29.655	1.3860	32.686	1.3915	35.647	1.3970	38.540	1.4025	41.369
1.3806	29.711	1.3861	32.741	1.3916	35.700	1.3971	38.592	1.4026	41.420
1.3807	29.767	1.3862	32.795	1.3917	35.753	1.3972	38.644	1.4027	41.471
1.3808	29.823	1.3863	32.849	1.3918	35.806	1.3973	38.696	1.4028	41.522
1.3809	29.878	1.3864	32.904	1.3919	35.859	1.3974	38.748	1.4029	41.573
1.3810	29.934	1.3865	32.958	1.3920	35.912	1.3975	38.800	1.4030	41.623
1.3811	29.989	1.3866	33.013	1.3921	35.966	1.3976	38.852	1.4031	41.674
1.3812	30.045	1.3867	33.067	1.3922	36.019	1.3977	38.904	1.4032	41.725
1.3813	30.101	1.3868	33.121	1.3923	36.072	1.3978	38.955	1.4033	41.776
1.3814	30.156	1.3869	33.175	1.3924	36.125	1.3979	39.007	1.4034	41.826
1.3815	30.212	1.3870	33.230	1.3925	36.178	1.3980	39.059	1.4035	41.877
1.3816	30.267	1.3871	33.284	1.3926	36.231	1.3981	39.111	1.4036	41.928
1.3817	30.323	1.3872	33.338	1.3927	36.284	1.3982	39.163	1.4037	41.978
1.3818	30.378	1.3873	33.392	1.3928	36.337	1.3983	39.214	1.4038	42.029
1.3819	30.434	1.3874	33.446	1.3929	36.389	1.3984	39.266	1.4039	42.080
1.3820	30.489	1.3875	33.500	1.3930	36.442	1.3985	39.318	1.4040	42.130
1.3821	30.544	1.3876	33.555	1.3931	36.495	1.3986	39.370	1.4041	42.181
1.3822	30.600	1.3877	33.609	1.3932	36.548	1.3987	39.421	1.4042	42.231
1.3823	30.655	1.3878	33.663	1.3933	36.601	1.3988	39.473	1.4043	42.282
1.3824	30.711	1.3879	33.717	1.3934	36.654	1.3989	39.525	1.4044	42.332
1.3825	30.766	1.3880	33.771	1.3935	36.706	1.3990	39.576	1.4045	42.383
1.3826	30.821	1.3881	33.825	1.3936	36.759	1.3991	39.628	1.4046	42.433
1.3827	30.876	1.3882	33.879	1.3937	36.812	1.3992	39.679	1.4047	42.484
1.3828	30.932	1.3883	33.933	1.3938	36.865	1.3993	39.731	1.4048	42.534
1.3829	30.987	1.3884	33.987	1.3939	36.917	1.3994	39.782	1.4049	42.585
1.3830	31.042	1.3885	34.040	1.3940	36.970	1.3995	39.834	1.4050	42.635

1.3831	31.097	1.3886	34.094	1.3941	37.023	1.3996	39.885	1.4051	42.685
1.3832	31.152	1.3887	34.148	1.3942	37.075	1.3997	39.937	1.4052	42.736
1.3833	31.207	1.3888	34.202	1.3943	37.128	1.3998	39.988	1.4053	42.786
1.3834	31.262	1.3889	34.256	1.3944	37.180	1.3999	40.040	1.4054	42.836
1.4055	42.887	1.4110	45.623	1.4165	48.302	1.4220	50.928	1.4275	53.501
1.4056	42.937	1.4111	45.672	1.4166	48.350	1.4221	50.975	1.4276	53.548
1.4057	42.987	1.4112	45.721	1.4167	48.399	1.4222	51.022	1.4277	53.594
1.4058	42.037	1.4113	45.770	1.4168	48.447	1.4223	51.069	1.4278	53.640
1.4059	42.088	1.4114	45.820	1.4169	48.495	1.4224	51.116	1.4279	53.686
1.4060	43.138	1.4115	45.869	1.4170	48.543	1.4225	51.164	1.4280	53.733
1.4061	43.188	1.4116	45.918	1.4171	48.591	1.4226	51.211	1.4281	53.779
1.4062	43.238	1.4117	46.967	1.4172	48.639	1.4227	51.258	1.4282	53.825
1.4063	43.288	1.4118	46.016	1.4173	48.687	1.4228	51.305	1.4283	53.871
1.4064	43.338	1.4119	46.065	1.4174	48.735	1.4229	51.352	1.4284	53.918
1.4065	43.388	1.4120	46.114	1.4175	48.784	1.4230	51.399	1.4285	53.964
1.4066	43.439	1.4121	46.163	1.4176	48.832	1.4231	51.446	1.4286	54.010
1.4067	43.489	1.4122	46.212	1.4177	48.880	1.4232	51.493	1.4287	54.056
1.4068	43.539	1.4123	46.261	1.4178	48.928	1.4233	51.540	1.4288	54.102
1.4069	43.589	1.4124	46.310	1.4179	48.976	1.4234	51.587	1.4289	54.148
1.4070	43.639	1.4125	46.359	1.4180	49.023	1.4235	51.634	1.4290	54.194
1.4071	43.689	1.4126	46.408	1.4181	49.071	1.4236	51.681	1.4291	54.241
1.4072	43.739	1.4127	46.457	1.4182	49.119	1.4237	51.728	1.4292	54.287
1.4073	43.789	1.4128	46.506	1.4183	49.167	1.4238	51.775	1.4293	54.333
1.4074	43.838	1.4129	46.555	1.4184	49.215	1.4239	51.822	1.4294	54.379
1.4075	43.888	1.41.30	46.604	1.4185	49.263	1.4240	51.869	1.4295	54.425
1.4076	43.938	1.41.31	46.652	1.4186	49.311	1.4241	51.916	1.4296	54.471
1.4077	43.988	1.41.32	46.701	1.4187	49.359	1.4242	51.963	1.4297	54.517
1.4078	44.038	1.41.33	46.750	1.4188	49.407	1.4243	52.010	1.4298	54.563
1.4079	44.088	1.41.34	46.799	1.4189	49.454	1.4244	52.057	1.4299	54.609
1.4080	44.138	1.41.35	46.848	1.4190	49.502	1.4245	52.104	1.4300	54.655
1.4081	44.187	1.41.36	46.896	1.4191	49.550	1.4246	52.150	1.4301	54.701
1.4082	44.237	1.41.37	46.945	1.4192	49.598	1.4247	52.197	1.4302	54.746
1.4083	44.287	1.41.38	46.994	1.4193	49.645	1.4248	52.244	1.4303	54.792
1.4084	44.337	1.41.39	47.043	1.4194	49.693	1.4249	52.291	1.4304	54.838
1.4085	44.386	1.4140	47.091	1.4195	49.741	1.4250	52.338	1.4305	54.884
1.4086	44.436	1.4141	47.140	1.4196	49.788	1.4251	52.384	1.4306	54.930
1.4087	44.486	1.4142	47.188	1.4197	49.836	1.4252	52.431	1.4307	54.976
1.4088	44.535	1.4143	47.237	1.4198	49.884	1.4253	52.478	1.4308	55.022
1.4089	44.585	1.4144	47.286	1.4199	49.931	1.4254	52.524	1.4309	55.067

1.4090	44.635	1.4145	47.334	1.4200	49.979	1.4255	52.571	1.4310	55.113
1.4091	44.684	1.4146	47.383	1.4201	50.027	1.4256	52.618	1.4311	55.159
1.4092	44.734	1.4147	47.431	1.4202	50.074	1.4257	52.664	1.4312	55.205
1.4093	44.783	1.4148	47.480	1.4203	50.122	1.4258	52.711	1.4313	55.250
1.4094	44.833	1.4149	47.528	1.4204	50.169	1.4259	52.758	1.4314	55.296
1.4095	44.882	1.4150	47.577	1.4205	50.217	1.4260	52.804	1.4315	55.342
1.4096	44.932	1.4151	47.625	1.4206	50.264	1.4261	52.851	1.4316	55.388
1.4097	44.981	1.4152	47.674	1.4207	50.312	1.4262	52.897	1.4317	55.433
1.4098	45.031	1.4153	47.722	1.4208	50.359	1.4263	52.944	1.4318	55.479
1.4099	45.080	1.4154	47.771	1.4209	50.407	1.4264	52.990	1.4319	55.524
1.4100	45.130	1.4155	47.819	1.4210	50.454	1.4265	53.037	1.4320	55.570
1.4101	45.179	1.4156	47.868	1.4211	50.502	1.4266	53.083	1.4321	55.616
1.4102	45.228	1.4157	47.916	1.4212	50.549	1.4267	53.130	1.4322	55.661
1.4103	45.278	1.4158	47.964	1.4213	50.596	1.4268	53.176	1.4323	55.707
1.4104	45.327	1.4159	48.013	1.4214	50.644	1.4269	53.223	1.4324	55.752
1.4105	45.376	1.4160	48.061	1.4215	50.691	1.4270	53.269	1.4325	55.798
1.4106	45.426	1.4161	48.109	1.4216	50.738	1.4271	53.316	1.4326	55.844
1.4107	45.475	1.4162	48.158	1.4217	50.786	1.4272	53.362	1.4327	55.889
1.4108	45.524	1.4163	48.206	1.4218	50.833	1.4273	53.408	1.4328	55.935
1.4109	45.574	1.4164	48.254	1.4219	50.880	1.4274	53.455	1.4329	55.980
1.4330	56.026	1.4385	58.503	1.4440	60.935	1.4495	63.324	1.4550	65.672
1.4331	56.071	1.4386	58.547	1.4441	60.979	1.4496	63.367	1.4551	65.714
1.4332	56.116	1.4387	58.592	1.4442	61.023	1.4497	63.410	1.4552	65.756
1.4333	56.162	1.4388	58.637	1.4443	61.066	1.4498	63.453	1.4553	65.798
1.4334	56.207	1.4389	58.681	1.4444	61.110	1.4499	63.496	1.4554	65.841
1.4335	56.253	1.4390	58.726	1.4445	61.154	1.4500	63.539	1.4555	65.883
1.4336	56.298	1.4391	58.770	1.4446	61.198	1.4501	63.582	1.4556	65.925
1.4337	56.343	1.4392	58.815	1.4447	61.241	1.4502	63.625	1.4557	65.967
1.4338	56.389	1.4393	58.859	1.4448	61.285	1.4503	63.668	1.4558	66.010
1.4339	56.434	1.4394	58.904	1.4449	61.329	1.4504	63.711	1.4559	66.052
1.4340	56.479	1.4395	58.948	1.4450	61.372	1.4505	63.754	1.4560	66.094
1.4341	56.525	1.4396	58.993	1.4451	61.416	1.4506	63.797	1.4561	66.136
1.4342	56.570	1.4397	59.037	1.4452	61.460	1.4507	63.840	1.4562	66.178
1.4343	56.615	1.4398	59.082	1.4453	61.503	1.4508	63.882	1.4563	66.221
1.4344	56.660	1.4399	59.126	1.4454	61.547	1.4509	63.925	1.4564	66.263
1.4345	56.706	1.4400	59.170	1.4455	61.591	1.4510	63.968	1.4565	66.305
1.4346	56.751	1.4401	59.215	1.4456	61.634	1.4511	64.011	1.4566	66.347
1.4347	56.796	1.4402	59.259	1.4457	61.678	1.4512	64.054	1.4567	66.389
1.4348	56.841	1.4403	59.304	1.4458	61.721	1.4513	64.097	1.4568	66.431
1.4349	56.887	1.4404	59.348	1.4459	61.765	1.4514	64.139	1.4569	66.473

1.4350	56.932	1.4405	59.392	1.4460	61.809	1.4515	64.182	1.4570	66.515
1.4351	56.977	1.4406	59.437	1.4461	61.852	1.4516	64.225	1.4571	66.557
1.4352	57.022	1.4407	59.481	1.4462	61.896	1.4517	64.268	1.4572	66.599
1.4353	57.067	1.4408	59.525	1.4463	61.939	1.4518	64.311	1.4573	66.641
1.4354	57.112	1.4409	59.569	1.4464	61.983	1.4519	64.353	1.4574	66.683
1.4355	57.157	1.4410	59.614	1.4465	62.026	1.4520	64.396	1.4575	66.725
1.4356	57.202	1.4411	59.658	1.4466	62.070	1.4521	64.439	1.4576	66.767
1.4357	57.247	1.4412	59.702	1.4467	62.113	1.4522	64.481	1.4577	66.809
1.4358	57.292	1.4413	59.746	1.4468	62.156	1.4523	64.524	1.4578	66.851
1.4359	57.337	1.4414	59.791	1.4469	62.200	1.4524	64.567	1.4579	66.893
1.4360	57.382	1.4415	59.835	1.4470	62.243	1.4525	64.609	1.4580	66.935
1.4361	57.427	1.4416	59.879	1.4471	62.287	1.4526	64.652	1.4581	66.977
1.4362	57.472	1.4417	59.923	1.4472	62.330	1.4527	64.695	1.4582	67.019
1.4363	57.517	1.4418	59.967	1.4473	62.373	1.4528	64.737	1.4583	67.061
1.4364	57.562	1.4419	60.011	1.4474	62.417	1.4529	64.780	1.4584	67.103
1.4365	57.607	1.4420	60.056	1.4475	62.460	1.4530	64.823	1.4585	67.145
1.4366	57.652	1.4421	60.100	1.4476	62.503	1.4531	64.865	1.4586	67.186
1.4367	57.697	1.4422	60.144	1.4477	62.547	1.4532	64.908	1.4587	67.228
1.4368	57.742	1.4423	60.188	1.4478	62.590	1.4533	64.950	1.4588	67.270
1.4369	57.787	1.4424	60.232	1.4479	62.633	1.4534	64.993	1.4589	67.312
1.4370	57.832	1.4425	60.276	1.4480	62.677	1.4535	65.035	1.4590	67.354
1.4371	57.877	1.4426	60.320	1.4481	62.720	1.4536	65.078	1.4591	67.396
1.4372	57.921	1.4427	60.364	1.4482	62.763	1.4537	65.120	1.4592	67.437
1.4373	57.966	1.4428	60.408	1.4483	62.806	1.4538	65.163	1.4593	67.479
1.4374	58.011	1.4429	60.452	1.4484	62.849	1.4539	65.205	1.4594	67.521
1.4375	58.056	1.4430	60.496	1.4485	62.893	1.4540	65.248	1.4595	67.563
1.4376	58.101	1.4431	60.540	1.4486	62.936	1.4541	65.290	1.4596	67.604
1.4377	58.145	1.4432	60.584	1.4487	62.979	1.4542	65.333	1.4597	67.646
1.4378	58.190	1.4433	60.628	1.4488	63.022	1.4543	65.375	1.4598	67.688
1.4379	58.235	1.4434	60.672	1.4489	63.065	1.4544	65.417	1.4599	67.729
1.4380	58.279	1.4435	60.716	1.4490	63.108	1.4545	65.460	1.4600	67.771
1.4381	58.324	1.4436	60.759	1.4491	63.152	1.4546	65.502	1.4601	67.813
1.4382	58.369	1.4437	60.803	1.4492	63.195	1.4547	65.544	1.4602	67.854
1.4383	58.413	1.4438	60.847	1.4493	63.238	1.4548	65.587	1.4603	67.896
1.4384	58.458	1.4439	60.891	1.4494	63.281	1.4549	65.629	1.4604	67.938
1.4605	67.979	1.4660	70.249	1.4715	72.482	1.4770	74.678	1.4825	76.841
1.4606	68.021	1.4661	70.290	1.4716	72.522	1.4771	74.718	1.4826	76.880
1.4607	68.063	1.4662	70.331	1.4717	72.562	1.4772	74.758	1.4827	76.919
1.4608	68.104	1.4663	70.372	1.4718	72.602	1.4773	74.797	1.4828	76.958



1.4609	68.146	1.4664	70.413	1.4719	72.643	1.4774	74.837	1.4829	76.997
1.4610	68.187	1.4665	70.453	1.4720	72.683	1.4775	74.876	1.4830	77.036
1.4611	68.229	1.4666	70.494	1.4721	72.723	1.4776	74.916	1.4831	77.075
1.4612	68.270	1.4667	70.535	1.4722	72.763	1.4777	74.956	1.4832	77.113
1.4613	68.312	1.4668	70.576	1.4723	72.803	1.4778	74.995	1.4833	77.152
1.4614	68.353	1.4669	70.617	1.4724	72.843	1.4779	75.035	1.4834	77.191
1.4615	68.395	1.4670	70.658	1.4725	72.884	1.4780	75.074	1.4835	77.230
1.4616	68.436	1.4671	70.698	1.4726	72.924	1.4781	75.114	1.4836	77.269
1.4617	68.478	1.4672	70.739	1.4727	72.964	1.4782	75.153	1.4837	77.308
1.4618	68.519	1.4673	70.780	1.4728	73.004	1.4783	75.193	1.4838	77.347
1.4619	68.561	1.4674	70.821	1.4729	73.044	1.4784	75.232	1.4839	77.386
1.4620	68.602	1.4675	70.861	1.4730	73.084	1.4785	75.272	1.4840	77.425
1.4621	68.643	1.4676	70.902	1.4731	73.124	1.4786	75.311	1.4841	77.463
1.4622	68.685	1.4677	70.943	1.4732	73.164	1.4787	75.350	1.4842	77.502
1.4623	68.726	1.4678	70.984	1.4733	73.204	1.4788	75.390	1.4843	77.541
1.4624	68.768	1.4679	71.024	1.4734	73.244	1.4789	75.429	1.4844	77.580
1.4625	68.809	1.4680	71.065	1.4735	73.285	1.4790	75.469	1.4845	77.619
1.4626	68.850	1.4681	71.106	1.4736	73.325	1.4791	75.508	1.4846	77.657
1.4627	68.892	1.4682	71.146	1.4737	73.365	1.4792	75.547	1.4847	77.696
1.4628	68.933	1.4683	71.187	1.4738	73.405	1.4793	75.587	1.4848	77.735
1.4629	68.974	1.4684	71.228	1.4739	73.445	1.4794	75.626	1.4849	77.774
1.4630	69.016	1.4685	71.268	1.4740	73.485	1.4795	75.666	1.4850	77.812
1.4631	69.057	1.4686	71.309	1.4741	73.524	1.4796	75.705	1.4851	77.851
1.4632	69.098	1.4687	71.349	1.4742	73.564	1.4797	75.744	1.4852	77.890
1.4633	69.139	1.4688	71.390	1.4743	73.604	1.4798	75.784	1.4853	77.928
1.4634	69.181	1.4689	71.431	1.4744	73.644	1.4799	75.823	1.4854	77.967
1.4635	69.222	1.4690	71.471	1.4745	73.684	1.4800	75.862	1.4855	78.006
1.4636	69.263	1.4691	71.512	1.4746	73.724	1.4801	75.901	1.4856	78.045
1.4637	69.304	1.4692	71.552	1.4747	73.764	1.4802	75.941	1.4857	78.083
1.4638	69.346	1.4693	71.593	1.4748	73.804	1.4803	75.980	1.4858	78.122
1.4639	69.387	1.4694	71.633	1.4749	73.844	1.4804	76.019	1.4859	78.160
1.4640	69.428	1.4695	71.674	1.4750	73.884	1.4805	76.058	1.4860	78.199
1.4641	69.469	1.4696	71.714	1.4751	73.924	1.4806	76.098	1.4861	78.238
1.4642	69.510	1.4697	71.755	1.4752	73.963	1.4807	76.137	1.4862	78.276
1.4643	69.551	1.4698	71.795	1.4753	74.003	1.4808	76.176	1.4863	78.315
1.4644	69.593	1.4699	71.836	1.4754	74.043	1.4809	76.215	1.4864	78.353
1.4645	69.634	1.4700	71.876	1.4755	74.083	1.4810	76.254	1.4865	78.392
1.4646	69.675	1.4701	71.917	1.4756	74.123	1.4811	76.294	1.4866	78.431
1.4647	69.716	1.4702	71.957	1.4757	74.162	1.4812	76.333	1.4867	78.469

1.4648	69.757	1.4703	71.998	1.4758	74.202	1.4813	76.372	1.4868	78.508
1.4649	69.798	1.4704	72.038	1.4759	74.242	1.4814	76.411	1.4869	78.546
1.4650	69.839	1.4705	72.078	1.4760	74.282	1.4815	76.450	1.4870	78.585
1.4651	69.880	1.4706	72.119	1.4761	74.321	1.4816	76.489	1.4871	78.623
1.4652	69.921	1.4707	72.159	1.4762	74.361	1.4817	76.528	1.4872	78.662
1.4653	69.962	1.4708	72.199	1.4763	74.401	1.4818	76.567	1.4873	78.700
1.4654	70.003	1.4709	72.240	1.4764	74.441	1.4819	76.607	1.4874	78.739
1.4655	70.044	1.4710	72.280	1.4765	74.480	1.4820	76.646	1.4875	78.777
1.4656	70.085	1.4711	72.320	1.4766	74.520	1.4821	76.685	1.4876	78.816
1.4657	70.126	1.4712	72.361	1.4767	74.560	1.4822	76.724	1.4877	78.854
1.4658	70.167	1.4713	72.401	1.4768	74.599	1.4823	76.763	1.4878	78.892
1.4659	70.208	1.4714	72.441	1.4769	74.639	1.4824	76.802	1.4879	78.931
1.4880	78.969	1.4920	80.497	1.4960	82.007	1.5000	83.500	1.5040	84.976
1.4881	79.008	1.4921	80.534	1.4961	82.044	1.5001	83.537	1.5041	85.013
1.4882	79.046	1.4922	80.572	1.4962	82.082	1.5002	83.574	1.5042	85.049
1.4883	79.084	1.4923	80.610	1.4963	82.119	1.5003	83.611	1.5043	85.086
1.4884	79.123	1.4924	80.648	1.4964	82.157	1.5004	83.648	1.5044	85.123
1.4885	79.161	1.4925	80.686	1.4965	82.194	1.5005	83.685	1.5045	85.159
1.4886	79.199	1.4926	80.724	1.4966	82.232	1.5006	83.722	1.5046	85.196
1.4887	79.238	1.4927	80.762	1.4967	82.269	1.5007	83.759	1.5047	85.233
1.4888	79.276	1.4928	80.800	1.4968	82.307	1.5008	83.796	1.5048	85.269
1.4889	79.314	1.4929	80.838	1.4969	82.344	1.5009	83.833	1.5049	85.306
1.4890	79.353	1.4930	80.876	1.4970	82.381	1.5010	83.870	1.5050	85.343
1.4891	79.391	1.4931	80.913	1.4971	82.419	1.5011	83.907	1.5051	85.379
1.4892	79.429	1.4932	80.951	1.4972	82.456	1.5012	83.944	1.5052	85.416
1.4893	79.468	1.4933	80.989	1.4973	82.494	1.5013	83.981	1.5053	85.452
1.4894	79.506	1.4934	81.027	1.4974	82.531	1.5014	84.018	1.5054	85.489
1.4895	79.544	1.4935	81.065	1.4975	82.569	1.5015	84.055	1.5055	85.525
1.4896	79.582	1.4936	81.103	1.4976	82.606	1.5016	84.092	1.5056	85.562
1.4897	79.620	1.4937	81.140	1.4977	82.643	1.5017	84.129	1.5057	85.598
1.4898	79.659	1.4938	81.178	1.4978	82.681	1.5018	84.166	1.5058	85.635
1.4899	79.697	1.4939	81.216	1.4979	82.718	1.5019	84.203	1.5059	85.672
1.4900	79.735	1.4940	81.254	1.4980	82.755	1.5020	84.240	1.5060	85.708
1.4901	79.773	1.4941	81.291	1.4981	82.793	1.5021	84.277	1.5061	85.744
1.4902	79.811	1.4942	81.329	1.4982	82.830	1.5022	84.314	1.5062	85.781
1.4903	79.850	1.4943	81.367	1.4983	82.867	1.5023	84.351	1.5063	85.817
1.4904	79.888	1.4944	81.405	1.4984	82.905	1.5024	84.388	1.5064	85.854
1.4905	79.926	1.4945	81.442	1.4985	82.942	1.5025	84.424	1.5065	85.890
1.4906	79.964	1.4946	81.480	1.4986	82.979	1.5026	84.461	1.5066	85.927

1.4907	80.002	1.4947	81.518	1.4987	83.016	1.5027	84.498	1.5067	85.963
1.4908	80.040	1.4948	81.555	1.4988	83.054	1.5028	84.535	1.5068	86.000
1.4909	80.078	1.4949	81.593	1.4989	83.091	1.5029	84.572	1.5069	86.036
1.4910	80.116	1.4950	81.631	1.4990	83.128	1.5030	84.609	1.5070	86.072
1.4911	80.154	1.4951	81.668	1.4991	83.165	1.5031	84.645	1.5071	86.109
1.4912	80.192	1.4952	81.706	1.4992	83.202	1.5032	84.682	1.5072	86.145
1.4913	80.231	1.4953	81.744	1.4993	83.240	1.5033	84.719	1.5073	86.182
1.4914	80.269	1.4954	81.781	1.4994	83.277	1.5034	84.756	1.5074	86.218
1.4915	80.307	1.4955	81.819	1.4995	83.314	1.5035	84.792	1.5075	86.254
1.4916	80.345	1.4956	81.856	1.4996	83.351	1.5036	84.829	1.5076	86.291
1.4917	80.383	1.4957	81.894	1.4997	83.388	1.5037	84.866	1.5077	86.327
1.4918	80.421	1.4958	81.932	1.4998	83.425	1.5038	84.903	1.5078	86.363
1.4919	80.459	1.4959	81.969	1.4999	83.463	1.5039	84.939	1.5079	86.399

## DENEY NO: 4 SABİT VE AKIŞKAN YATAK

### DENEYİN AMACI

Sabit ve akışkan yatak boyunca basınç düşüşünün belirlenmesi, Kozeny-Carman Eşitliği'nin ispatlanması ve akışkanlaşma başlangıcının gözlenmesidir.

### KURAMSAL TEMELLER

Bir kolon içinde yığılı durumda bulunan taneciklerin oluşturduğu yatak bölgesine alttan düşük bir hızla hava verilmeye başlandığında, öncelikle düşük hava hızında hava tanecikler üzerinde fazla kuvvet uygulayamaz ve tanecikler arasında kendine boşluklar bularak yukarı hareket eder. Bu durum taneciklerin hareket etmediği sabit yatak konumudur. Bu durumda basınç Ergun denklemi ile hesaplanır.

$$\frac{\Delta P}{L} \times \frac{D_p}{\rho(V_{SM})^2} \times \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)} = 150 \frac{(1-\varepsilon)}{Re} + 1.75$$

$D_p$  : Eşdeğer partikül boyutu,  $\mu\text{m}$

$L$  : Yatak yüksekliği, m

$\mu_w$  : Suyun viskozitesi,  $10^{-3} \text{Nsm}^{-2}$

$V_w$  : Suyun kinematik viskozitesi,  $10^{-6} \text{Nsm}^{-2}$

$\rho_w$  : Suyun yoğunluğu,  $\text{kgm}^{-3}$

$\rho_s$  : Taneciklerin yoğunluğu,  $\text{kgm}^{-3}$

$\varepsilon$  : Yatak boşluğu  $= 1 - \frac{\text{Taneciklerin ütleisi}}{\text{Taneciklerin yoğunluğu} \times \text{Toplam yatak hacmi}}$

$Re$  : boş kule hızına dayalı Reynolds Sayısı

$V_{SM}$  : Boş kule hızı

Düşük  $Re$  değerlerinde ( $Re/(1-\varepsilon) < 10$ ) viskoz kuvvetler daha önemli olduğundan Ergun Denklemi;

$$\frac{\Delta P}{L} \times \frac{D_p}{\rho(V_{SM})^2} \times \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)} = 150 \frac{(1-\varepsilon)}{Re}$$

Şeklinde yazılabilir. Bu denklem Kozeny-Carman denklemi olarak adlandırılır. Yüksek  $Re$  değerlerinde ( $Re/(1-\varepsilon) > 1000$ ) ise viskoz kuvvetler ihmal edilebilir ve atalet kuvvetleri baskın olduğundan Ergun Denklemi;

$$\frac{\Delta P}{L} \times \frac{D_p}{\rho(V_{SM})^2} \times \frac{\varepsilon^3}{(1-\varepsilon)} = 1.75$$

Şeklinde yazılır. Bu denklem de Blake-Plummer denklemi olarak adlandırılır. Akış hızı Q litre/saniye biriminde ve boş kule hızı  $V_{SM} \text{ ms}^{-1}$  biriminde ölçülürse,

$$V_{SM} = \frac{Q \times 10^{-3}}{A}$$

yazılabilir ve A, yatağın kesit alanıdır.

Yatak boyunca basınç düşüşü (h) mmH<sub>2</sub>O biriminde ölçülürse,

$$\frac{\Delta P}{\rho_w g} = h \times 10^{-3}$$

Şeklinde ve  $g = 9.81 \text{ Nm}^{-2}$  dir.

Böylece aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$h = \left[ \frac{150L(1-\varepsilon)^2(V_{SM})\mu_w}{D_p^2\varepsilon^3\rho_w g} + \frac{1.75L(V_{SM})^2(1-\varepsilon)}{D_p\varepsilon^3 g} \right] \times 10^{-3} \text{ mmH}_2\text{O}$$

Akışkanlaşma esnasında basınç düşüşü aşağıdaki eşitlik kullanılarak bulunabilir.

$$\Delta P = L(1-\varepsilon)(\rho_s - \rho_w)g$$

$$h = L \frac{(1-\varepsilon)}{\rho_w} (\rho_s - \rho_w) \times 10^{-3} \text{ mmH}_2\text{O}$$

Akışkan yatakta hava kullanıldığı durumda ise basınç düşüşü(h) mmH<sub>2</sub>O biriminde ölçülürse;

$$\frac{\rho_a}{\rho_w} \frac{\Delta P}{\rho_w g} = h \times 10^{-3} \text{ şeklindedir ve } g=9.81 \text{ Nm}^{-2} \text{ dir.}$$

Böylece aşağıdaki eşitlik elde edilebilir:

$$h = \left[ \frac{150L(1-\varepsilon)^2(V_{sm})\mu_w}{D_p^2\varepsilon^3\rho_w g} + \frac{1.75L(V_{sm})^2(1-\varepsilon)}{D_p\varepsilon^3 g} \right] \times 10^{-3} \text{ mmH}_2\text{O}$$

böylece;

$$h = \left[ \frac{150L(1-\varepsilon)^2(V_{sm})\mu_a}{D_p^2\varepsilon^3\rho_w g} + \frac{1.75L(V_{sm})^2(1-\varepsilon)\rho_a}{D_p\varepsilon^3\rho_w g} \right]$$

Akışkanlaşma esnasında basınç düşüşü aşağıdaki eşitlik kullanılarak elde edilebilir.

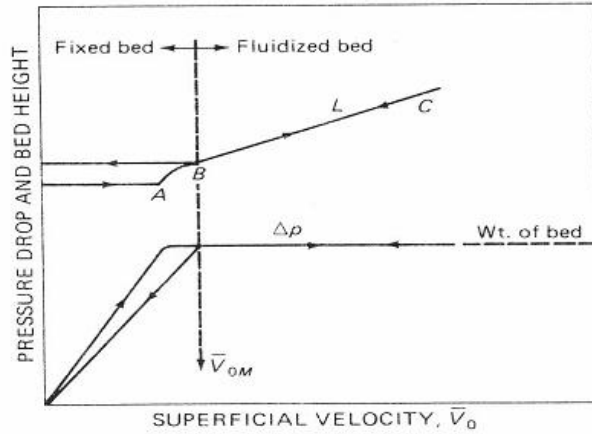
$$\Delta P = L(1-\varepsilon)(\rho_s - \rho_a)g$$

$$h = L \frac{(1-\varepsilon)}{\rho_w} (\rho_s - \rho_a) \times 10^3 \text{ mmH}_2\text{O}$$

Akışkan hızı sürekli olarak arttırılırsa basınç düşüşü ve tanecikler üzerine uygulanan sürtünme kuvveti artar. Taneciklere daha fazla kuvvet uygulanarak tanecikler arasındaki yerçekiminden kaynaklanan kuvvetler azalır. Hız arttırıldığında (daha fazla), taneciklerin üzerindeki kaldırma kuvveti yerçekimini dengeleyerek, yukarı doğru akan havanın içinde taneciklerin asılı kalmalarını sağlar. Yatağı oluşturan tanecikler akışkan özellikleri sergilemeye başlarlar. Yatak içinde basınç düşüşünün, yatağın birim yüzeye düşen ağırlığına eşit olduğu ana “ yatağın akışkan hale gelme anı”, bu andaki hava hızına da “ Minimum akışkanlaşma hızı “ denilmektedir.

Hız, bu kritik değerin üzerine çıkacak biçimde arttırılırsa, yatak daha fazla akışa olanak verecek ölçüde kabarmaktadır. Verilen fazla akışkanın büyük bir bölümü, yatak arasından kabarcıklar halinde geçmektedir. Akış hızı, kritik hızın 3-5 katı arasında bir değere ulaştığında, sistem parçacıkların hızla birbirine karıştığı yüksek bir türbülant özellik kazanmaktadır. Bu durumda yatak, şiddetli kaynayan bir sıvı görünümündedir. Akışkan yatak denilen böyle bir yatak, bir sıvının bir çok özelliğini taşımaktadır. Örneğin yatak herhangi bir yöne eğilirse, yatak yüzeyi yatay konumunu korumaktadır. Değişik derinliklerde iki yatak birleştirilirse, iki yatak boyu eşit oluncaya kadar yüksek yataktan düşük yatağa, tanecik akımı sürer. Akışkan yatağı, herhangi bir noktadan açılarak deliklerden katı parçacıklar, gaz veya sıvı ortam gibi dışarıya akıtılarak boşalmaktadır. Sonuç olarak katı parçacıklara, böyle bir yatak içerisinde akışkan özellik kazandırılmasına "*Akışkanlaştırma*" denir. Dikey ve ince granül malzeme ile doldurulmuş dikey bir tüp göz önüne alınsın. Tüpün üst kısmı açıktır ve tabanında granül malzemeyi destekleyen ve kesit alanı boyunca akışın homojen dağılmasını sağlayan poröz bir plaka vardır. Hava plakanın altından çok düşük bir hızla girmekte ve herhangi bir taneciği hareket ettirmeden yukarı doğru geçmektedir. Eğer tanecikler yeterince küçük ise, tanecikler arasındaki akış laminer olur ve yatak boyunca basınç düşüşü boş kule hızı ile doğru orantılı olur. Hız kademeli olarak arttırılırsa, basınç düşüşü de artar, ancak tanecikler hareket etmez ve yatak yüksekliği aynı kalır. En sonunda, yataktaki basınç düşüşü tanecikler üzerindeki veya yerçekimi kuvvetine veya yatağın ağırlığına eşit olur ve hızdaki herhangi bir artış taneciklerin hareket etmesine neden olur. Bu durum grafikte A ile gösterilmiştir. Bazı durumlarda yatak tanecikler hala temas halinde iken yavaşça genişler, sadece  $\varepsilon$  değerindeki küçük bir artış boş kule hızındaki artışı dengeleyebilir ve basınç düşüşünü sabit tutar. Hızın daha da artmasıyla tanecikler hareket edecek kadar birbirinden ayrılır ve gerçek akıcılaşma başlar (B noktası). Yatak akışkanlaştıktan sonra, yatak boyunca basınç düşüşü sabit kalır ancak artan hızla birlikte yatak yüksekliği de artar. Akışkan yatağın

hızı kademeli olarak düşürülürse, basınç düşüşü sabit kalır ve yatak yüksekliği düşer. BC doğrusu hızın arttırılması sonucunda gözlenmiştir.



Şekil 1. Akışkan yatakta basınç düşüşü ve yatak yüksekliği

## DENEYİN YAPILIŞI



Şekil 2: Deney Düzenegi

### Deney 1: Su Kullanılan Dolgulu Kolonda Akışkanlaşmanın Gözlenmesi

- Su test kolonunu 300 mm'ye kadar partikül çapı 0.625 m olan kum ile doldurulur.
- Su akış kontrol vanası kapatılır ve manometreden okunan değerin sıfır olduğu kontrol edilir, eğer değilse sıfır olacak şekilde ayarlanır.
- Su pompası açılır. Suyun akış hızı 0.1 L/dk artışlarla 0.1 ile 1.6 L/dk akış hızlarında aşağıdaki tablo doldurulur.

Yatak Yüksekliği, mm	Akış Hızı, L/dk	Basınç Düşüşü, mm H <sub>2</sub> O	Yatak Durumu
0.1			
0.2			
0.3			
0.4			
0.5			
0.6			
0.7			
0.8			
0.9			
1.0			
1.1			
1.2			
1.3			
1.4			
1.5			
1.6			

### **Deney 2: Hava Kullanılan Dolgulu Kolonda Akışkanlaşmanın Gözlenmesi**

- Hava test kolonunu 300 mm'ye kadar partikül çapı 0.25 m olan kum ile doldurulur.
- Hava akış kontrol vanası kapatılır ve manometreden okunan değer in sıfır olduğu kontrol edilir, eğer değilse sıfır olacak şekilde ayarlanır.
- Hava pompası açılır. Havanın akış hızı 1 L/dk artışlarla 2 ile 12 L/dk akış hızlarında aşığıdaki tablo doldurulur.



Yatak Yüksekliği, mm	Akış Hızı, L/dk	Basınç Düşüşü, mm H <sub>2</sub> O	Yatak Durumu
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			

### HESAPLAMALAR VE SONUÇLAR

Hem su hem de hava test kolonu için, akış hızlarına karşı basınç düşüşü ve yatak yüksekliği değerlerini grafiğe geçiriniz.

Her bir su akış hızı için basınç düşüşünü hesaplayınız.

Her bir hava akış hızı için basınç düşüşünü hesaplayınız.

### DEĞERLENDİRME VE YORUM

- Tahmini akışkanlaşma noktası ile grafikten okunan gerçek akışkanlaşma noktasını karşılaştırınız. İki değer arasında farklılık varsa nedenlerini açıklayınız.
- Akışkan yatakların avantajlarını açıklayınız.
- Akışkan yatakların kullanım alanlarını tercih edilme sebepleri ile birlikte açıklayınız.
- Akışkan yatakta kullanılan akışkanın türüne göre taneciklerin hareketleri nasıl değişiklik gösterir? Açıklayınız.

### KAYNAKLAR

1. Geankoplis J. C., Transport Processes and Unit Operations, Prentice-Hall Inc., New Jersey, 1993.
2. McCabe LW., Smith CJ., Harriot P., Unit Operations of Chemical Engineering, McGraw-Hill, New York, 2001.
3. Uysal BZ., Akışkanlar Mekaniği, Ankara, 2003.

## **DENEY NO:5 KONSANTRİK TÜPLÜ (ÇİFT BORULU) ISI DEĞİŞTİRİCİSİ**

### **DENEYİN AMACI**

Birbirinden duvar ile ayrılmış, içerisinde akışkan olan ve birinden diğerine dolaylı yoldan ısıtma veya soğutmanın yapıldığı sistemlerin (ısı değiştirici) incelenmesi ve sistem parametrelerinin gerçekleşen ısı transferine olan etkisinin araştırılması.

### **KURAMSAL TEMELLER**

Mühendislik uygulamalarında en önemli ve en çok karşılaşılan konulardan birisi, farklı sıcaklıklardaki iki veya daha fazla akışkan arasındaki ısı transferidir. Sözü edilen akışkanlar genellikle katı bir cidar ile birbirinden ayrılmakta böylece birbirine karışmamaktadır. Bu cihazlar, ısı değiştiricisi (eşanjör) olarak adlandırılmakta ve sıcaklığı fazla olan bir akışkandan düşük sıcaklıktaki bir akışkana ısı aktarımı prensibine göre çalışmaktadır.

### **Isı Değiştiricilerin Sınıflandırılması**

#### **Akışkanların Temas Şekline Göre Sınıflandırılması**

- Direkt Temaslı Isı Değiştiriciler
- İndirekt Temaslı Isı Değiştiriciler

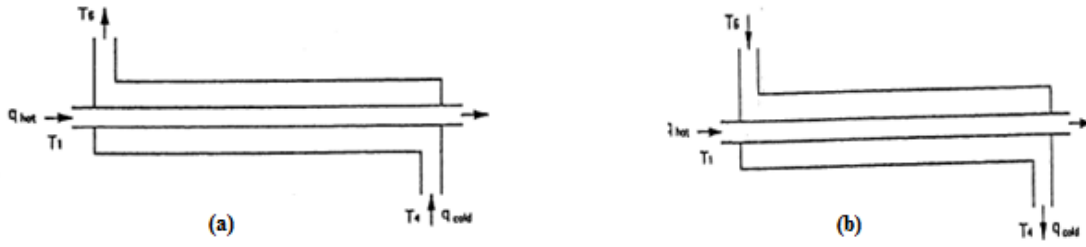
#### **Akış Şekillerine Göre Sınıflandırılması**

- Paralel Akım
- Zıt Akım
- Çapraz Akım

### **Isı Değiştiricilerinde Akış Düzenlemeleri**

İçindeki akışkanların akışlarının özellikleri sıcaklık farkına, ısı değiştiricisi etkinliğine ve ısıl gerilmelere çok etki eder. Prensip olarak bu akışkanlar paralel, ters ve çapraz olmak üzere üç şekildedir. İki akışkanın ısı değiştirici içinde birbirine göre sadece bir kere karşılaştığı tipler tek geçişli ısı değiştiricilerdir.

Şekil 1. Isı değıştircilerinde akış düzenlemeleri: (a) paralel, (b) ters, (c) çapraz



Şekil 2. a) Zıt akışlı çift borulu ısı değıştircisi, b) Paralel akışlı çift borulu ısı değıştircisi

### Paralel akımlı ısı değıştircileri

Bu düzenlemede ısı değıştirci içindeki ısıtıcı akışkan ile ısıtılacak akışkan, değıştircinin aynı ucundan girip, birbirlerine paralel olarak akarlar ve değıştircinin diğer ucundan çıkarlar. Bu tür ısı değıştircilerde küçük çaplı bir boru ile bunun dışında aynı eksenli ikinci bir boru vardır. Birinci akışkan içteki boru içinden akarken, ikinci akışkan iki boru arasındaki boşluktan akar.

### Ters akımlı ısı değıştircileri

Bu tipte akışkanlar ısı değıştirciler içinde birbirlerine göre eksensel olarak paralel, fakat zıt yönlü olarak akar. Akışkanların ısıl kapasitelerine ve faz durumlarına göre, ısı değıştirci boyunca sıcaklığındaki değışim incelendiğinde ters akımlı ısı değıştircilerde etkenlik diğerlerinden daha fazla olduğu için tercih edilir.

### Çapraz akımlı ısı değıştircileri

Isı değıştirci içindeki akışkanlar birbirlerine göre dik olarak akar. Bu ısı değıştircilerin ısı etkenliği, paralel ve ters akımlı ısı değıştircilerin arasındadır. İmalat kolaylığı bakımından kompakt ısı değıştircilerden büyük çoğunluğu çapraz akımlı olarak üretilir.

## **Borulu Isı Değiştirici eşitleri**

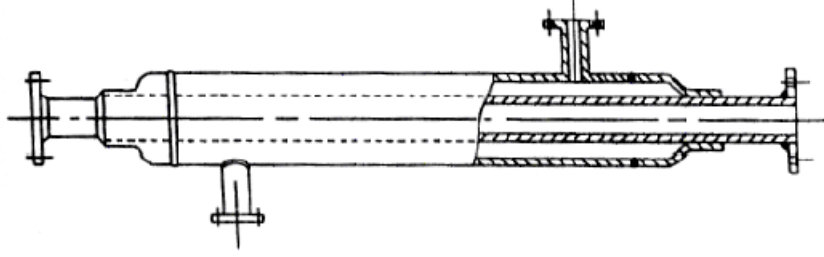
Bu tip ısı değiştiricilerinde genelde dairesel kesitli borular kullanılır. Dairesel kesitli borular diğer geometrik şekilli olanlara nazaran yüksek basınçlara dayanıklı olduklarından, bu tip ısı değiştiriciler yüksek basınçlarda kullanılır. Borulu ısı değiştiricileri, esas olarak bakır veya elik borulardan oluşan boru demetleri kullanılarak yapılır. Bir akışkan borunun içerisinden akarken, diğer akışkan borunun dışından akar. Boru apı, boru sayısı, boru uzunluğu, boru adımı ve boru düzenlemesi değiştirilebilir. Bu nedenle borulu ısı değiştiricilerin tasarımlarında oldukça esneklik vardır. Farklı ısı aktarım uygulamaları, farklı özelliklerde malzemelerin ve farklı geometrilere sahip ısı değiştiricilerin kullanımını gerektirmektedir.

- Çift borulu ısı değiştiriciler
- Kompakt ısı değiştiriciler
- Kabuk ve boru ısı değiştiriciler

### **Çift borulu ısı değiştiriciler**

Düz (ift) borulu ısı değiştiricileri en basit ısı değiştirici tipidir. Bir borunun daha büyük çaplı bir boru içerisine eş merkezli olarak yerleştirilmesi ile elde edilir. Akışkanlardan biri içteki borudan akarken, diğeri dışarıdaki borudan akar. Bu ısı değiştiriciler, istenen basınç düşümü ve sıcaklık farkı gereksinimlerini karşılamak için çeşitli seri ve paralel konfigürasyonlar şeklinde düzenlenebilir. İçteki boru tek veya çok borulu olabilir. Eğer halkadaki ısı taşımın kat sayısı düşükse eksenel kanatçıklara sahip iç boru (veya borular) kullanılabilir.

Bu tip ısı değiştiriciler, rafinerileri ve diğer büyük kimyasal prosesler içeren tesislerde en yaygın kullanılan ısı değiştiricilerdir. Bu ısı değiştirici tipi, dış tarafta büyük bir boru (kovan olarak da anılır) ve onun içinde dolasan daha küçük çapta borular içerir. Farklı sıcaklıklardaki iki akışkan ısı değiştiricisi boyunca akar, birisi içteki borular boyunca, diğeri ise dış taraftaki büyük boru (kovan) boyunca akar. Isı, bir akışkandan diğerine transfer olur. Akışkanlar arasında ısı transferinde kullanılan bu yöntem, birçok uygulamada, atık ısıdan yararlanılmasını sağlar. Bu, enerjinin geri kazanımı için çok iyi bir yoldur. Örneğin buhar kullanan bir tesisin kullanımdan çıkan buharı, ısı değiştiricileri vasıtası ile tesis ısıtması, kullanım suyunun ısıtılması gibi yerlerde kullanması gibi.



Şekil 3: Düz (çift) borulu ısı değiştirici prensip şeması

Isı değiştiricisi tasarımındaki genel düşünce, soğuk veya sıcak bir sıvıdan birinden diğerine ısı transferini sağlamak için borular veya geniş yüzeyler kullanılmasıdır. Genelde, ısı değiştirici bir sıvının diğeri içinde dolaşmasını sağlayan bobin seklinde borular ve diğeri sıvıyı içeren boruların içinde dolaştığı kapalı bölmeden oluşur. Boru duvarları genelde metalden yapılıdır veya düşük özgül ısı kapasitesi olan başka bir maddeden (malzemenin ısı kapasitesi azaldıkça sıcaklık artış hızı yükselir), dış taraftaki kapalı bölme ise ısıyı ısı değiştiriciden dışarı ısı vermeyen plastik veya yüksek ısı kapasiteli başka bir malzemedan yapılıdır.

*Avantajları:*

- Isıl kapasiteyi ve ısı geçiş yüzey alanını artırmak için seri hâlde montajları yapılabilir.
- Karşıt akış elde etmek kolaydır.
- Yüksek basınçlara dayanabilir.
- Standart modüler konstrüksiyona sahiptir.
- Bakımı ve tamiri kolaydır.
- Temizlenmesi kolay olduğundan, özellikle kirletici akışkanlar için uygundur.
- Piyasadan kolay şekilde bulunabilir.
- Birçok metal ile imal edilebildiğinden akışkan sınırlaması çok azdır.

*Dezavantajı:*

- Yüksek ısı kapasiteler (1 MW'dan daha fazla) için pahalıdır.

### Isı Değiştiricilerin Analizi

En uygun ısı değiştirici seçimi; belirli bir kütleli akış hızına sahip akışkan için talep edilen sıcaklık değişiminin sağlanması.

Çıkış sıcaklıklarının tahmin edilmesi; belirli bir ısı değiştirici için sıcak ve soğuk akışkanların çıkış sıcaklıklarının belirlenmesi.

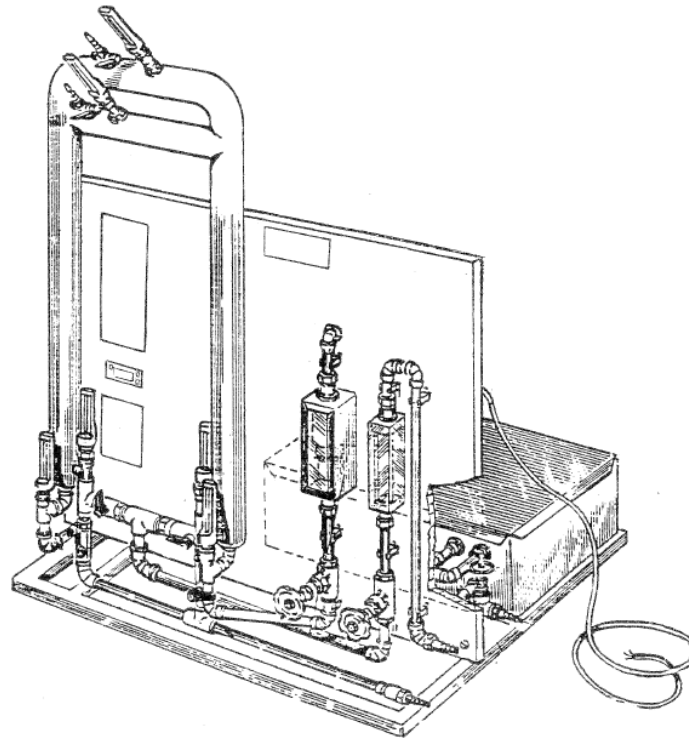
Isı değiştirici analizleri için iki yöntem vardır:

- a) Logaritmik ortalama sıcaklık farkı (Log mean temperature difference method, LMTD): Isı değiştirici seçiminde çok iyi sonuç verir.
- b)  $\epsilon$ -NTU metodu, Isı transfer ünite sayısı (Effectiveness-Number of transfer unit): Çıkış sıcaklıklarının tahmininde çok iyi sonuç verir.

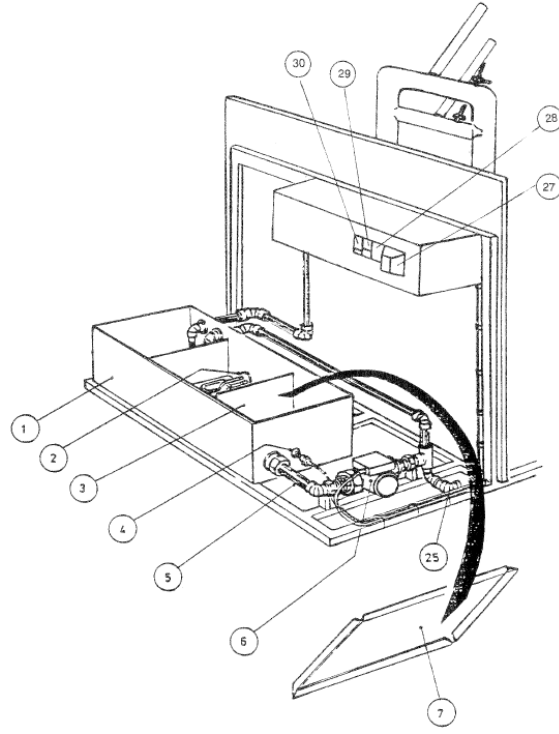
Bu metotlar kullanılırken yapılması gereken kabuller:

- Sistem yatışkın durumdadır.
- Her bir akışkanın kütleel akış hızı sabittir.
- Akışkan özellikleri giriş ve çıkış için değişmez.
- Her bir akışkanın  $C_p$  değeri sabittir (belirli bir sıcaklık aralığı için).
- Kinetik ve potansiyel enerji değişimleri ihmal edilir.
- Boru boyunca aksenal yönde ısı iletimi ihmal edilir.
- Isı değiştiricinin dış yüzeyi mükemmel izolasyona sahiptir (ortama ısı kaybı yok).
- Tüm ısı transferi yalnızca iki sıvı arasında gerçekleşmektedir.

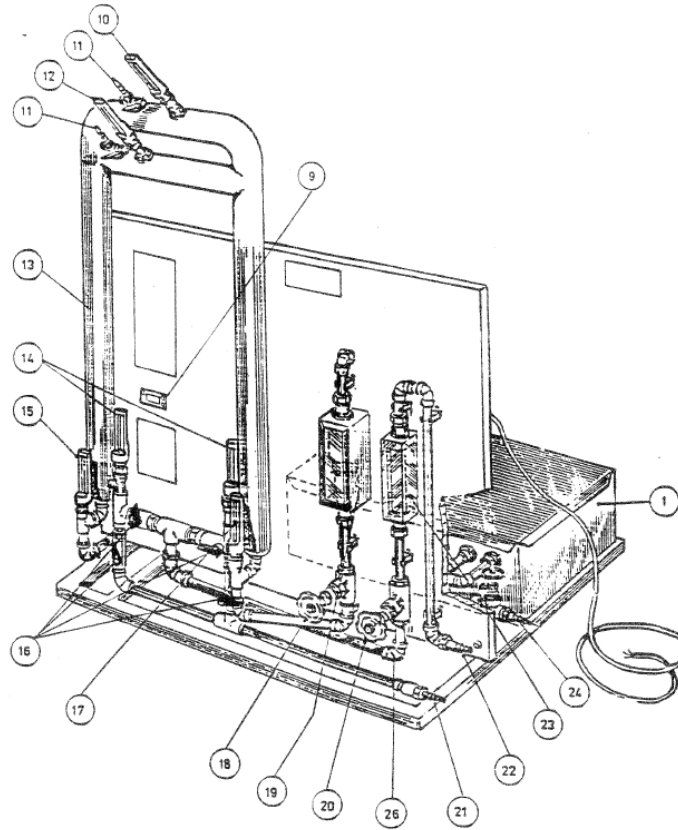
### DENEY DÜZENEGİ:



Şekil 4. HT4 konsantrik tüp ısı değiştirici



Şekil 5. HT4 arkadan görünüm



Şekil 6. HT4 önden görünüm

## **DENEYİN YAPILIŞI:**

Çalıştırmaya başlamadan önce, paketleme için sökülen iki cam termometre aşağıda belirtildiği gibi takılmalıdır.

Termometreyi ısıtıcının üst kısmında bulunan boş kısma yerleştirin, vidaları sıkıştırın. Termometre düzgünce takıldığında ön taraftaki aralıktan görülebilmelidir.

### Soğuk su kaynağı:

Soğuk su girişini (21) cihazla gelen esnek hortumu kullanarak soğuk su kaynağına bağlayın.

### Boşaltma:

Soğuk su çıkışını (22) cihazla gelen esnek hortumu kullanarak uygun bir boşaltma borusuna bağlayın.

### Çalıştırma:

Çalıştırmadan önce su pompasının iki tarafında bulunan servis vanalarının açık olduğundan emin olun (yuvalar boru ile paralel olur).

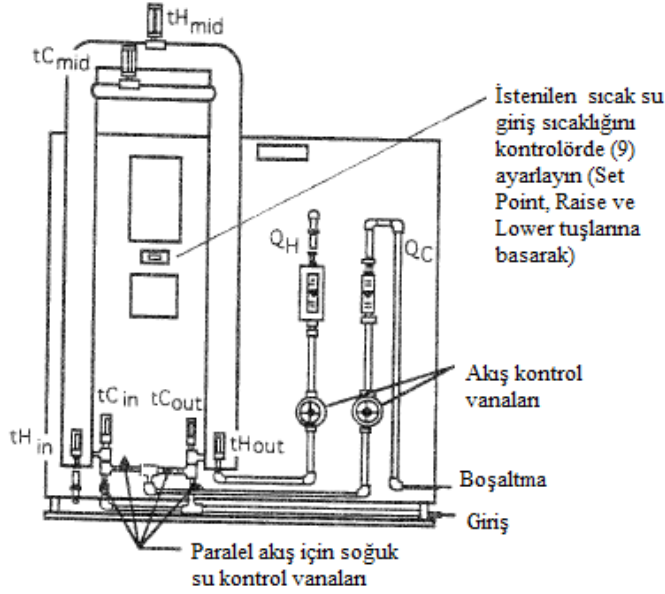
- Su tankındaki boşaltma vanasının (24) tamamen kapalı olduğu kontrol edilir (saat yönünde çevirin).
- Pompa boşaltmanın üstündeki boşaltma musluğunun (25) tamamen kapalı olduğu kontrol edilir.
- Soğuk su akış kontrol vanasının altındaki boşaltma musluğunun (26) tamamen kapalı olduğu kontrol edilir.
- Isı değiştiricinin üstündeki hava boşaltma vanası (11) kapatılır.
- Su depolama tankının kapağı (7) açılır ve üstten 7,5 cm kalacak şekilde temiz su doldurulur.
- Sıcak su kontrol vanası (18) kapatılır.
- Soğuk su girişinin (21) soğuk su kaynağına (cihazla gelen esnek hortum kullanılarak) bağlı olduğu kontrol edilir.
- Su pompası motorunun üstündeki seçici anahtarın (6) maksimuma ayarlandığı kontrol edilir.



- Güç kablosunun uygun güç kaynağına bağlı olduğu ve kaynağın açık olduğu kontrol edilir.
- HT4'ün arkasındaki RCCD (Residual Current Circuit Breaker) (28) çalıştırılır. TEST düğmesine basılır ve anahtarın devreden çıktığından emin olunur. Böylece RCDD'nin kapanması gerekir. Eğer RCCD devreden çıkmıyorsa, cihaz kullanılmadan önce yetkili elektrik teknisyeni tarafından kontrol edilir. RCCD çalıştırılır.
- Ana yalıtıcı (27) ve HT4'ün arkasındaki iki devre kesicisi (29-30) çalıştırılır. Sıcaklık kontrolörü ışıklandırılır ve su pompası çalışır. Su pompasının suyu by-pass üzerinden geçirmeye başlamasına kadar ana yalıtıcı birkaç kez açılıp kapatılmalıdır.
- Çalışma noktasını (set point) görmek için kontrolörün solundaki "set point membrane" tuşuna basılır. "Set point" tuşuna basılırken "LOWER" tuşuna basılarak sıcaklık ortam sıcaklığının altına düşürülür (ısıtıcılar kapanır).
- Sıcak su akış kontrol vanası (18) ve sıcak su devresi üstündeki boşaltım vanası (11) açılır. Sıcak su akış kontrol vanasını (18) sürekli açıp kapayarak borulardan su geçmesi sağlanır. Boşaltım vanasından (11) su geçer geçmez vana kapatılır.
- Eğer yukarıdaki teknikle su pompası işlemezse, pompadaki boşaltma çeşmesine (25) bir hortum bağlayıp ucu tanka uzatılır ve su boşaltılır. Pompadan su geçene kadar, boşaltım vanası açık tutulur (pompa çalışırken). Pompa işlemeye başlayınca boşaltım vanası kapatılır ve hortum çıkarılır.
- Su tankında yeterli su olduğu kontrol edilir ve kapağı kapatılır.
- Sıcak su akış kontrol vanası, akış ölçerde (19) orta değer okuyacak şekilde ayarlanır.
- Seçme vanaları (16) Co-current durumuna getirilir. Akış yatışkın olana kadar suyun ısı değiştiriciden akması sağlanır. Ardından, soğuk su akış kontrol vanası (20) akış ölçerde (23) orta değer okunacak şekilde ayarlanır.
- Sıcaklık kontrolörünün çalışma sıcaklığı (set point) uygun membran tuşlara (set point tuşuna basılırken, Raise/Lower tuşlarına istenilen sıcaklığa gelene kadar basılır) basılarak yükseltilir (ör: 50 °C). Su sıcaklığı artarak bir süre sonra istenilen dereceye ulaşır  $\pm 1$  °C toleransla sabit kalacaktır.
- Çalıştırma işlemi böylece sona erer.

**Deney A:**

Çift borulu ısı değiştiricisinin paralel akım durumundaki çalışma prensiplerinin gösterilmesi amaçlanmaktadır, deney düzeneği Şekil 7’de gösterilmektedir.



Şekil 7. Paralel akış deney düzeneği

**Değişkenlerin başlangıç değerleri:**

Kontrollü sıcak su sıcaklığı = 60 °C

Sıcak su akış hızı =  $Q_H = 2000 \text{ cc/min}$

Soğuk su akış hızı =  $Q_C = 1000 \text{ cc/min}$

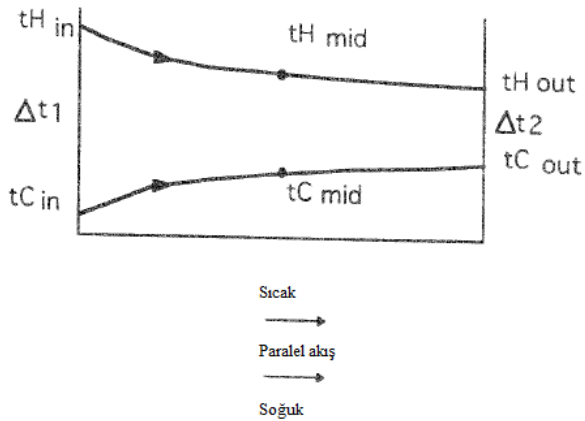
**Alınacak ölçümler:**

Sistemin giriş, çıkış ve orta noktalarındaki sıcak ve soğuk su sıcaklıkları stabilize olduğunda ölçümler alınacaktır.

**Sonuçlar:**

Ölçümler	$t_{H,in}$ (°C)	$t_{H,mid}$ (°C)	$t_{H,out}$ (°C)	$t_{C,in}$ (°C)	$t_{C,mid}$ (°C)	$t_{C,out}$ (°C)
1						
2						
3						
4						
5						

### Hesaplamalar ve Sonuçlar:



- Yoğunluk ( $\rho$ ) ve özgül ısı ( $C_p$ ) değerleri için standart tablolara başvurulması gerekmektedir.
- Hesaplama yaparken birimlerin tutarlılığını sağlamak amacıyla uygun birim çevirme faktörlerinden yararlanılmalıdır.

Şekil 8. Paralel akış için sıcaklık değişim grafiği

$$\text{Sıcak akışkanın kaybettiği ısı} = q_H = Q_H \rho_H C_{pH} (t_{H,in} - t_{H,out})$$

$$\text{Soğuk akışkanın kazandığı ısı} = q_C = Q_C \rho_C C_{pC} (t_{C,in} - t_{C,out})$$

$$\text{Isı kaybı} = q_H - q_C$$

$$\text{Verimlilik} = \eta = \frac{q_C}{q_H} * 100$$

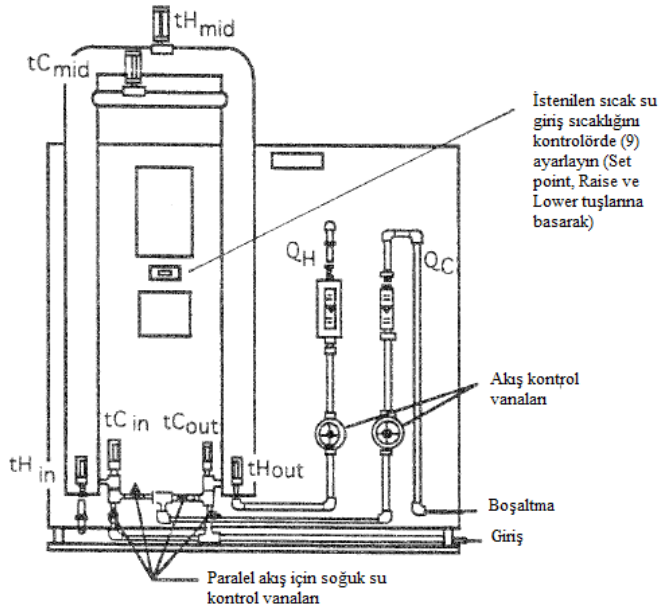
$$\text{Log ortalama sıcaklık farkı} = \Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\log_e \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\text{Isı transfer katsayısı} = U = \frac{q_C}{\text{Isı iletim alanı} * \Delta t_m}$$

Hesaplamalar	$q_H$ (W)	$q_C$ (W)	Güç kaybı (W)	Verimlilik %	$\Delta t_m$ (°C)	U (W/m <sup>2</sup> *°C)
1						
2						
3						
4						
5						

**Deney B:**

Çift borulu ısı değiştiricisinin zıt akım durumundaki çalışma prensiplerinin gösterilmesi amaçlanmaktadır, deney düzeneği Şekil 9’da gösterilmektedir.



Şekil 9. Zıt akış deney düzeneği

**Değişkenlerin başlangıç değerleri:**

Kontrollü su sıcaklığı = 60 C

Sıcak su akış hızı =  $Q_H = 2000$  cc/min

Soğuk su akış hızı =  $Q_C = 1000$  cc/min

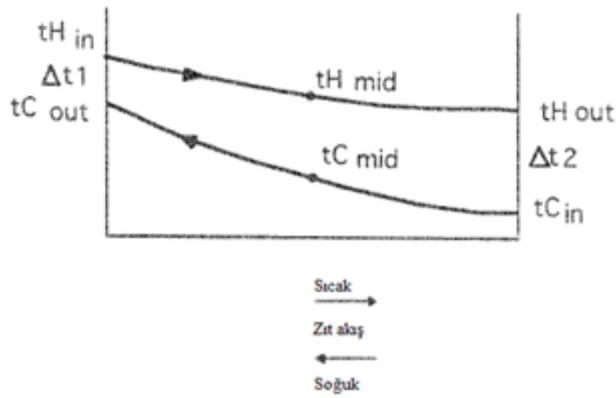
**Alınacak lmler:**

Sistemin giriş, çıkış ve orta noktalarındaki sıcak ve soğuk su sıcaklığları stabilize olduğunda ölümler alınacaktır.

**Sonuçlar:**

lmler	$t_{H,in}$ (C)	$t_{H,mid}$ (C)	$t_{H,out}$ (C)	$t_{C,in}$ (C)	$t_{C,mid}$ (C)	$t_{C,out}$ (C)
1						
2						
3						
4						
5						

### Hesaplamalar ve Sonuçlar:



- Yoğunluk ( $\rho$ ) ve özgül ısı ( $C_p$ ) değerleri için standart tablolara başvurulması gerekmektedir.
- Hesaplama yaparken birimlerin tutarlılığını sağlamak amacıyla uygun birim çevirme faktörlerinden yararlanılmalıdır.

Şekil 10. Zıt akış için sıcaklık değişim grafiği

$$\text{Sıcak akışkanın kaybettiği ısı} = q_H = Q_H \rho_H C_{pH} (t_{H,in} - t_{H,out})$$

$$\text{Soğuk akışkanın kazandığı ısı} = q_C = Q_C \rho_C C_{pC} (t_{C,in} - t_{C,out})$$

$$\text{Isı kaybı} = q_H - q_C$$

$$\text{Verimlilik} = \eta = \frac{q_C}{q_H} * 100$$

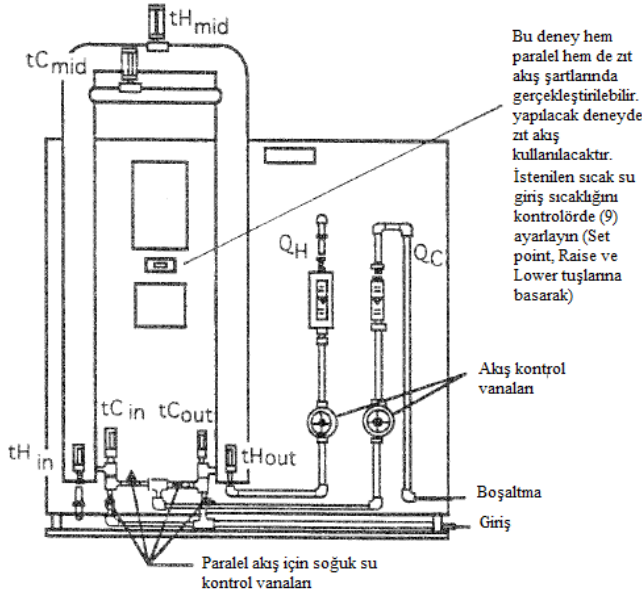
$$\text{Log Ortalama Sıcaklık Farkı } \Delta t_m = \frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\log_e \frac{\Delta t_1}{\Delta t_2}}$$

$$\text{Isı transfer katsayısı (U)} = \frac{q_C}{\text{Isı iletim alanı} * \Delta t_m}$$

Hesaplamalar	$q_H$ (W)	$q_C$ (W)	Güç kaybı (W)	Verimlilik %	$\Delta t_m$ (°C)	U(W/m <sup>2</sup> *°C)
1						
2						
3						
4						
5						

**DENEY C:**

Zıt akım ile çalışan çift borulu ısı değiştiricisinde, sıcak su sıcaklığının ( $t_{H,in}$ ) değiştirilmesinin performans özelliklerine etkisinin belirlenmesi amaçlanmaktadır, deney düzeneği Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11. Zıt akışta sıcaklık değişiminin ısı değiştiriciye etkisinin incelenmesi deney düzeneği

**Değişkenlerin başlangıç değerleri:**

Sıcak su akış hızı =  $Q_H = 2000 \text{ cc/min}$

Soğuk su akış hızı =  $Q_C = 2000 \text{ cc/min}$

**Alınacak ölçümler:**

Sıcak su giriş sıcaklığı kontrolörde ayarlandığı değer için stabilize olduğunda, bütün su sıcaklıklarının ölçümleri alınacaktır.

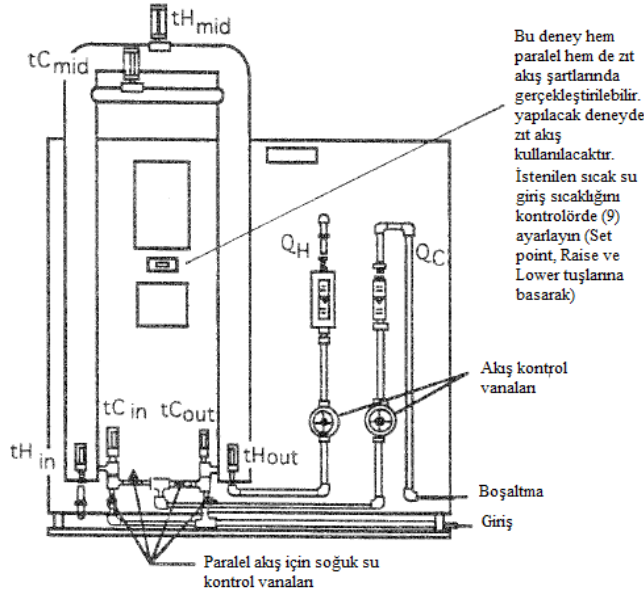
**Sonuçlar:**

Ölçümler	Ayarlanan sıcaklık ( $^{\circ}\text{C}$ )	$t_{H,in}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$t_{H,mid}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$t_{H,out}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$t_{C,in}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$t_{C,mid}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$t_{C,out}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
1	50						
2	55						
3	60						
4	65						



**DENEY D:**

Zıt akım ile çalışan çift borulu ısı değıştiricisinde, akış hızı değışiminin performans özelliklerine etkisinin belirlenmesi amaçlanmaktadır, deney düzeneği Şekil 13’de gösterilmektedir.



Şekil 13. Zıt akışta akış hızı değışiminin ısı değıştiriciye etkisinin incelenmesi deney düzeneği

**Değışkenlerin başlangıç değeri:**

Kontrol edilen sıcak su sıcaklığı = 60 °C

Soğuk su akış hızı =  $Q_C = 2000 \text{ cc/min}$

**Alınacak ölçümler:**

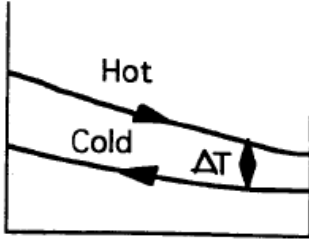
Sabit soğuk su akış hızına karşı sıcak su akış hızı değıştirildiğinde sistem stabilize olduğu anda, bütün su sıcaklıklarının ölçümleri alınacaktır.

**Sonuçlar:**

Ölçümler	$Q_H$ (cc/min)	$t_{H,in}$ (°C)	$t_{H,mid}$ (°C)	$t_{H,out}$ (°C)	$t_{C,in}$ (°C)	$t_{C,mid}$ (°C)	$t_{C,out}$ (°C)
1	1000						
2	2000						
3	3000						
4	4000						



## Hesaplamalar ve Sonuçlar:



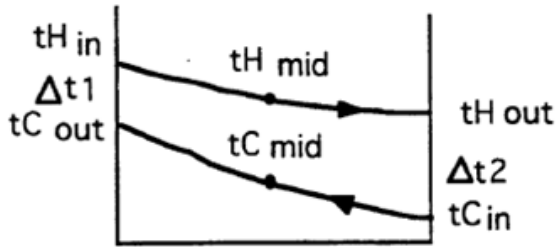
- Yoğunluk ( $\rho$ ) ve özgül ısı ( $C_p$ ) değerleri için standart tablolara başvurulması gerekmektedir.
- Hesaplama yaparken birimlerin tutarlılığını sağlamak amacıyla uygun birim çevirme faktörlerinden yararlanılmalıdır.

Şekil 12. Zıt akışta sıcaklık değişim grafiği

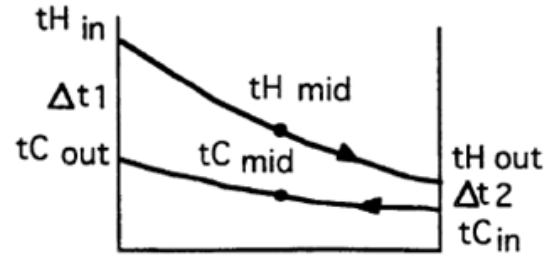
Performans özelliklerinin (sıcak akışkanın kaybettiği ısı, soğuk akışkanın kazandığı ısı, ısı kaybı, verimlilik, log ortalama sıcaklık farkı ve ısı transfer katsayısı) hesaplanması için zıt akım prensibi ile çalışan ısı değiştirici deneyinde kullanılan eşitliklerden yararlanılmalıdır.

Ayrıca,  $Q_H \rho_H C_{pH} > Q_C \rho_C C_{pC}$  olduğunda ( $T_{\text{sıcak}} - T_{\text{soğuk}} = \Delta T$ ) sıcak giriş tarafına yaklaşacaktır.

Eğer  $Q_C \rho_C C_{pC} > Q_H \rho_H C_{pH}$  olursa,  $\Delta T$  soğuk giriş tarafına yaklaşacaktır.



$$Q_H \rho_H C_{pH} > Q_C \rho_C C_{pC}$$



$$Q_C \rho_C C_{pC} > Q_H \rho_H C_{pH}$$

Hesaplar	$Q_H$ (cc/min)	$q_H$ (W)	$q_C$ (W)	Güç kaybı (W)	Verimlilik %	$\Delta t_m$ (°C)	$U(W/m^2 \cdot ^\circ C)$
1	1000						
2	2000						
3	3000						
4	4000						

## DEĞERLENDİRME VE YORUM

Öğrenci yapmış olduğu deney ve bulduğu sonuçlar ışığında bir değerlendirme ve yorum yapar.

1. Isı değiştirici nedir? Hangi prensipte çalışır? Kaç tiptir?
2. Endüstride ısı değiştiricisi hangi alanlarda kullanılmakta ve en çok hangi tip ısı değiştiricisi tercih edilmektedir?
3. Isı değiştiricisi tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar nelerdir?
4. Isı değiştiricisi hesaplamalarında kullanılan katsayılar nelerdir?
5. Bir silindir için ısı transfer katsayısı hangi eşitliklerden hesaplanabilir? Bulduğunuz eşitliği Donohue eşitliği ile karşılaştırınız.
6. Bir ısı değiştiricisinde toplam ısı transfer katsayısı nelere bağımlı olarak değişir?
7. Kirlenme, ısı değiştiricilerde ısı transferini nasıl etkiler? Hangi yöntemlerle önlem alınabilir?
8. Bir boru içindeki ısı transferi hangi metotla hesaplanır? Açıklayınız.

## KAYNAKLAR

- [1] Armfield HT4 Engineering Teaching and Research Equipment Instruction Manual, UK, 1995.
- [2] Anadolu Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Kimya Mühendisliği Laboratuvarı, Çift Borulu ve Plakalı Isı Değiştiriciler Deney Föyü.
- [3] Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Paralel-Zıt Akışlı Isı Değiştiricisi Deney Föyü.
- [4] Selçuk Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Isı Değiştirici Deney Föyü.
- [5]T.C. Milli Eğitim Bakanlığı, MEGEP, Kimya Teknolojisi, Borulu Isı Değiştiriciler, Ankara, 2008.

Çizelge 1. Su için özgül ısı değerleri ( $C_p = \text{kJ/kg}\cdot\text{K}$ )

°C	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	4.1274	4.2138	4.2104	4.2074	4.2045	4.2019	4.1996	4.1974	4.1954	4.1936
10	4.1919	4.1904	4.1890	4.1877	4.1866	4.1855	4.1846	4.1837	4.1829	4.1822
20	4.1816	4.1810	4.1805	4.1801	4.1797	4.1793	4.1790	4.1787	4.1785	4.1783
30	4.1782	4.1781	4.1780	4.1780	4.1779	4.1779	4.1780	4.1780	4.1781	4.1782
40	4.1783	4.1784	4.1786	4.1788	4.1789	4.1792	4.1794	4.1796	4.1799	4.1801
50	4.1804	4.1807	4.1811	4.1814	4.1817	4.1821	4.1825	4.1829	4.1833	4.1837
60	4.1841	4.1846	4.1850	4.1855	4.1860	4.1865	4.1871	4.1876	4.1882	4.1887
70	4.1893	4.1899	4.1905	4.1912	4.1918	4.1925	4.1932	4.1939	4.1946	4.1954

Çizelge 2. Su için yoğunluk değerleri ( $\rho = \text{kg/m}^3$ )

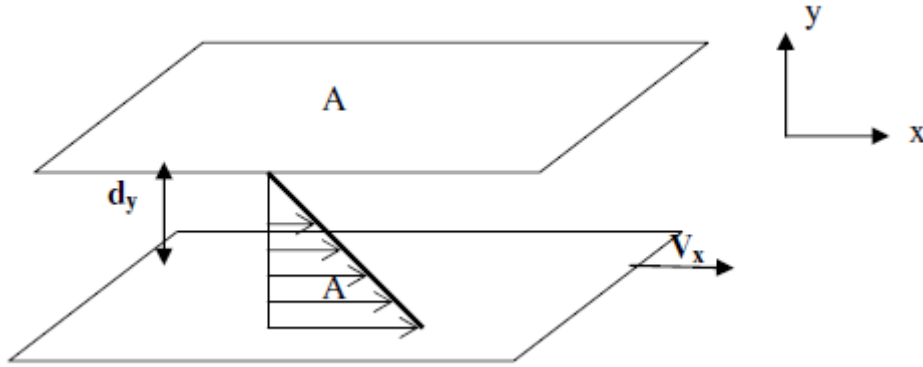
°C	0	2	4	6	8
0	999.8	999.9	999.9	999.9	999.9
10	999.7	999.5	999.2	998.9	998.6
20	998.2	997.8	997.3	996.8	996.2
30	995.7	995.0	994.4	993.7	993.0
40	992.2	991.4	990.6	989.8	988.9
50	988.0	987.1	986.2	985.2	984.2
60	983.2	982.2	981.1	980.0	978.9
70	977.8	976.6	975.4	974.2	973.0

## DENEY NO: 6 VİSKOZİTE ÖLÇÜMÜ

### DENEYİN AMACI

Vizkozimetre kullanarak kullanılan hammaddeye, sıcaklığa ve konsantrasyona bağlı olarak viskozite değişimini gözlemlemek ve karışımların viskozitesini ölçmek amaçlanır.

### KURAMSAL TEMELLER



Şekil 1. İki plaka arasındaki akışkanın hız profili

Şekil 1'de gösterildiği gibi iki plaka arasında bir akışkan akmaktadır. Üstteki plaka sabit tutulurken, alttaki plaka  $t=0$  anında  $x$ -yönünde sabit  $V$  hızında çekilmektedir. İlk anlarda, alttaki plakanın  $x$ -yönündeki momentumunun bir kısmı plakanın hemen üstündeki akışkan tabakasına  $y$ -yönünde aktarılacaktır. Bu akışkan tabakası da  $x$ -yönünde harekete başlayacaktır ve sahip olduğu momentumun bir kısmını  $y$ -yönünde daha üstteki akışkan katmanına aktaracaktır. Dolayısıyla, akışkan içerisinde hız profili zamanla değişecektir. Momentum aktarımı üst plakaya ulaştığında, hız profili iki plaka arasında tam gelişecek ve zamandan bağımsız olarak artık sabit kalacaktır. Bu noktada alttaki plakanın sabit  $V$  hızı ile hareketini devam ettirebilmek için alt plakaya uygulanması gereken kuvvet  $F$  ile gösterilir. Plakanın birim alanına uygulanan bu kuvvet akışkanın hız profilinin eğimi ile doğru orantılıdır.

$$\frac{F}{A} \propto \text{hız profili eğimi,}$$

kararlı halde hız profili lineer ise,

$$\frac{F}{A} \propto \frac{0-V}{Y-0} \Rightarrow \frac{F}{A} \propto -\frac{V}{Y}$$

veya bir orantı katsayısı kullanarak;

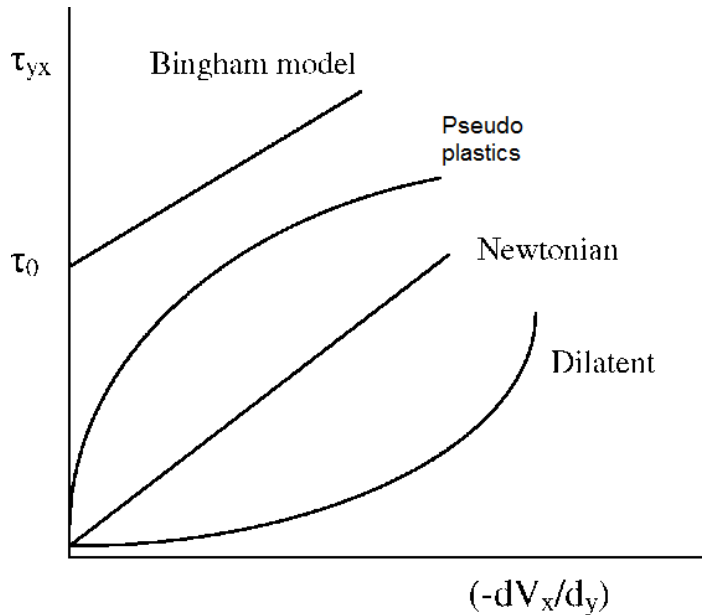
$$\frac{F}{A} = -\mu \frac{V}{Y} \quad (1)$$

olarak yazılabilir.

Burada orantı katsayısı  $\mu$  akışkanın dinamik viskozitesi olarak adlandırılır. Belirli bir y konumundaki akışkan yüzeyine x-yönünde uygulanan kayma gerilimi  $T_{yx}$  ile gösterilirse, denklem (1) şu şekilde de yazılabilir;

$$\tau_{yx} = -\mu \frac{dV_x}{dy} \quad (2)$$

Denklem (2) Newton'un viskozite yasası olarak bilinir. Bu ifadeye uygun davranan akışkanlar Newtonian akışkanlar olarak adlandırılır. Denklem (2) ile verilen Newton yasasına göre kayma gerilimi  $\tau_{yx}$  ile kayma hızı  $(-dV_x/dy)$  arasında lineer bir ilişki vardır. Buna göre kayma gerilimi  $\tau_{yx}$  kayma hızına  $(-dV_x/dy)$  karşı grafiğe geçirildiğinde orijinden geçen ve eğimi viskoziteye ( $\mu$ ) eşit olan bir doğru elde edilir (Şekil 2). Ancak Non-Newtonian akışkanlar bu yasaya uymazlar ve Şekil 2 'de gösterildiği gibi bir davranış gösterirler.



Şekil 2. Newton yasasına uyan ve uymayan akışkanların davranışı

Viskozite, akışkanın akmaya karşı direncinin bir ölçüsü olarak tanımlanabilir. SI birim sisteminde viskozitenin birimi pascal-saniyedir (Pa.s). Pa.s birimi;  $kg\ m^{-1}s^{-1}$  veya  $N\ s\ m^{-2}$  ile eşdeğerdir. CGS birim sistemindeki viskozite birimi poise ( $g\ cm^{-1}\ s^{-1}$ ) dir.

1 poise=0,1 Pa.s veya 1cP =1mPa s dır.

Sıvıların viskoziteleri basınçtan pek etkilenmemesine rağmen, genellikle sıcaklığın kuvvetli bir fonksiyonudur. Bir çok sıvı için, viskozitenin sıcaklığa bağımlılığı

$$\mu = Ae^{B/T} \quad (3)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada A ve B sıvıya özgü sabitlerdir ve T Kelvin cinsinden ifade edilen mutlak sıcaklıktır. Denklem (3) ile hesaplanan viskozitenin birimi cp'dur.

Sıvıların akış hızlarını belirlemek amacıyla birkaç farklı deneysel yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler aşağıda sıralanmıştır:

1. Düşen küre yöntemi
2. Kapiler akış yöntemi
3. Döner silindir yöntemi

## DENEYSEL YÖNTEM



Şekil 3.Brookfield Tipi Viskozimetre

- Deney kapsamında hammadde olarak kullanılacak maddelerin pH değerlerinin konsantrasyona etkisinin tespit edilebilmesi için her maddeden numune tartılarak suda

çözünür ve karışımların oda sıcaklığındaki pH değerleri ölçülür ve not alınır. Karışımların viskozitesi, viskozimetre cihazına uygun mil (spindle) takılarak ve cihaz üzerinde takılan mil numarası ve milin dönme hızı girilerek not edilir.

- Sıcaklığın etkisini gözlemlemek için 20°C sıcaklık artışıyla 30-70°C aralığında viskozite değerleri ölçülür. Her sıcaklık değerinde pH değeri de ölçülü kaydedilir.
- Viskozimetre ile ölçüm yapılırken ekrandan okunan tork değerinin %10-100 arasında bir değer göstermesi gerekmektedir. % 10'un altındaki tork değerlerinde ölçülen viskozite değerleri doğru olmayabilir. Bu durumda takılan mil veya milin dönme hızı değiştirilmelidir.

## TARTIŞMA

- Farklı sıcaklık değerlerinde elde edilen viskozite değerlerini karşılaştırmız.
- Farklı konsantrasyonlardaki viskozite değerlerini karşılaştırmız.
- pH konsantrasyonu nasıl etkilemiştir?
- Hangi milin hangi konsantrasyonlar için uygun olduğu bulunmuştur?
- Milin dönme hızı viskoziteyi ve viskozite ölçümünü nasıl etkilemektedir?
- Viskoziteyi etkileyen diğer etkenleri tartışmız.

## KAYNAKLAR

1. Bird R. B., Stewart W. E., Lightfoot E. N., *Transport Phenomena*, John Wiley and Sons, USA (1960).
2. Geankoplis C. J., *Transport Processes and Unit Operations*, Prentice-Hall International, Inc., New Jersey (1993).
3. McCabe W. L. , Smith J. C., Harriott P., *Unit Operations of Chemical Engineering*, Mc Graw Hill Book Co., Singapore (1993).
4. Uysal B. Z., *Akışkanlar Mekaniği*, Alp Yayıncılık, Ankara (2006).

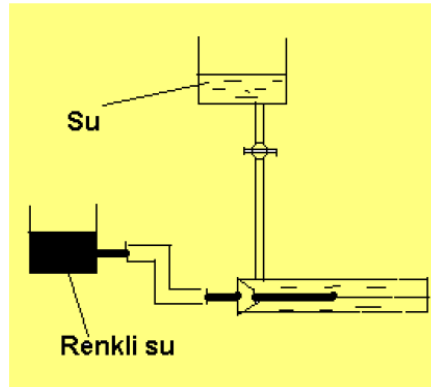
## DENEY NO:7 OSBORNE-REYNOLDS DENEYİ

### DENEYİN AMACI

- 1- Akışkan akışında katmansal, geçiş ve kargaşalı akış rejimlerinin gözlemlenmesi
- 2- Akışkan hız dağılımlarının gözlemlenmesi.
- 3- Reynolds sayısının hesaplanması.

### KURAMSAL TEMELLER

1883’de ilk defa Osborne Reynolds tarafından yapılan deneyde, cam bir boru içi su dolu bir depoya bağlanmış olup, boru içindeki suyun akma hızı arzu edilen değere ayarlanabilmektedir. Borunun giriş ucuna bir nozul konularak boru içerisine renklendirilmiş su verilebilmektedir. Bu deneye ait düzenek basitçe aşağıdaki şekilde görülmektedir:



Şekil1: Osborne-Reynolds Deney Düzeneginin şematik gösterimi

Reynolds bu deneyi borunun değişik noktalarındaki kesitlere uygulamış ve bu kısımlarda renkli suya ait akım iplikçığının bozulmadığını akışkanın birbirine paralel ve düz doğrular boyunca aktığını görmüştür. Akışkanın akım hızı arttırıldığında, hızın belirli bir değerinden sonra renkli suya ait akım iplikçığının ortadan kalktığı ve bütün su kütlelerinin renklendiği görülmüştür. Diğer bir ifadeyle yüksek akış hızlarında, suyu meydana getiren parçacıklar borunun uzun eksenini boyunca birbirine paralel hareket etmeyip, borunun kısa eksenini boyunca da hareket etmeye başlar ve böylece tam bir karışma meydana gelir. Akımın bu şekilde bir tipten diğerine değiştiği andaki sıvı akım hızı “kritik hız” olarak adlandırılır.



Reynolds daha sonra yaptığı deneylerde bu iki tip akış şeklini meydana geliş şartlarını incelemiş ve kritik hızın ; boru çapına, akışkanın akışkan hızına yoğunluğuna ve viskozitesine bağlı olduğunu bulmuş ve bu 4 faktörün sadece bir şekilde gruplandırılabilceğini göstermiştir. Reynolds'un ileri sürdüğü ve Reynolds sayısı olarak bilinen ifade aşağıdaki eşitlikle verilmektedir. Reynolds sayısı hidrodinamik incelemelerde büyük bir önem taşır ve kimya mühendisliğinde yaygın şekilde kullanılır.

$$R = \frac{V_c D}{\nu}$$

Burada;

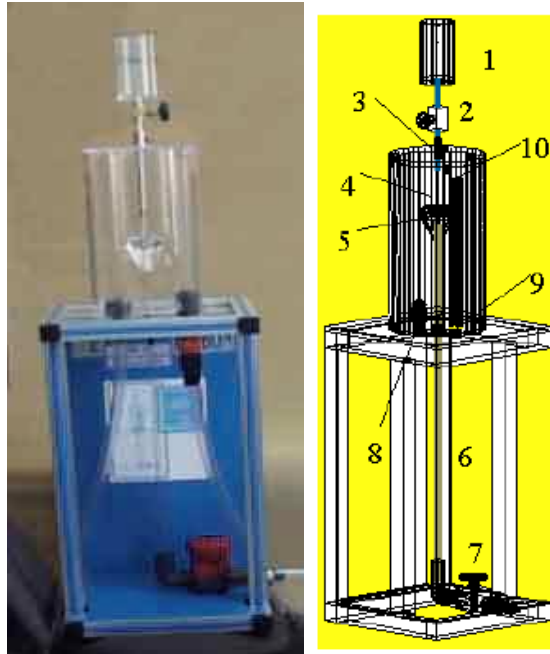
$V_c$ : Ortalama hız (m/s),

$D$ : Boru çapı (m),

$\nu$  : Kinematik viskozite ( $m/s^2$ )

## DENEY DÜZENEĞİ

Deney düzeneği cam nozul veya metakrilat tüp içeren silindirik bir tanktan oluşmaktadır. Bu tüp bizim akışkanı gözlemlememize yardımcı olmaktadır. Taşma borusu ise akıştaki homojenliği sağlar.



Şekil2: Osborne-Reynolds Deney Düzeneği

Burada;

1. Mürekkep tankı
2. Mürekkep enjeksiyon vanası
3. Vida
4. Enjektör
5. Nozul, su girişi düzenleyici
6. Akış gözlem tüpü
7. Akış kontrol vanası
8. Giriş borusu
9. Taşma çıkış borusu
10. Taşma



Şekil3:Hidrolik tezgah ve hidrolik grup akış kontrol vanaları

#### **Cihazın Teknik Özellikleri:**

- Tüpün iç çapı: 10mm.
- Tüpün dış çapı: 13mm.
- Boru uzunluğu: 700mm.
- Mürekkep tankı kapasitesi: 0.3 litre

#### **Cihazın Genişlik Ve Uzunluğu**

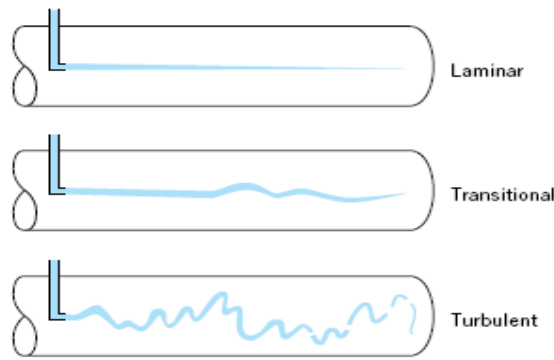
- Genişlik: 1250x450x450
- Hacim: 0.25m<sup>3</sup>
- Ağırlık: 20kg.

## DENEYİN YAPILIŞI

Katmansal akış: 1. durumda, mürekkebin su içindeki hareketine göre vana çevrilerek suyun çıkış hızı ayarlanır(azaltılır) ve suyun katmansal bir akış izlemesi sağlanır. Bu durum mürekkebin su içinde çizgisel bir yol izlemesiyle görülür. Bu durumda  $Re < 2100$  şartı sağlanır.

Kargaşalı akış: 2. durumda, mürekkebin su içindeki hareketine göre vana çevrilerek suyun çıkış hızı ayarlanır(arttırılır) ve suyun kargaşalı bir akış izlemesi sağlanır. Bu durum mürekkebin su içinde dalgalı, çalkantılı bir yol izlemesiyle görülür. Bu durumda  $Re > 4000$  şartı sağlanır.

Geçiş akışı: 3. durumda, mürekkebin su içindeki hareketine göre vana çevrilerek suyun çıkış hızı ayarlanır ve suyun katmansal ve kargaşalı akış arasında bir yol izlemesi sağlanır. Bu durum mürekkebin su içinde çizgisel ve dalgalı arası bir yol izlemesiyle görülür. Bu durumda  $2100 < Re < 4000$  şartı sağlanır.



Şekil4: Boru içindeki hız dağılımları

- 1- Osborne-Reynolds deney düzeneği hidrolik düzenek üzerine yerleştirilir.
- 2- Besleme borusu (8) hidrolik ünite arasındaki hortum bağlantısı yapılır.
- 3- Mürekkep tankı (1) yaklaşık olarak 100 ml su doldurulur ve 1 ml mürekkep ilave edilir.
- 4- Enjektör(4) akış görüntüleme tüpünden (6), giriş memesine (5) yerleşene kadar vida(3) yardımı ile alçaltılır.
- 5- Akış kontrol vanasını (7) kapatılır. Taşma borusu (9) taşma oluğuna veya hidrolik tezgah veya hidrolik grubun içerisine yerleştirilir.
- 6- Pompa çalıştırılır ve tank yavaşça taşma seviyesine ulaşana kadar doldurulur; daha sonra hidrolik düzeneğin kontrol vanası, suyun geri akmasını önleyecek şekilde tamamen kapatılır ve pompa durdurulur.

- 7- Akış kontrol vanası (7), gözlem tüpünü boşaltmak için, birkaç kez açılır ve kapatılır.
- 8- Deneye devam etmeden önce, cihazın içerisindeki sıvının sabitlenmesi için on dakika beklenir. Bu arada su sıcaklığı ölçülür.
- 9- Pompa çalıştırılır ve akan su taşınmaya kadar hidrolik düzeneğin kontrol vanası dikkatli bir şekilde açılır. Akış kontrol vanası (7) istenilen akış modeline göre ayarlanarak kısmen açılır ve silindirin içerisinde (meme ve enjektör üstünden geçen) sabit bir seviye sağlandığında da mürekkep enjeksiyonu vanası (2) renklendirilmiş akım elde edene kadar yavaş yavaş açılır.
- 10- Su akışı yavaşladığında, mürekkep izleri görüntüleme tüpü içerisinde paralel çizgiler oluşturur (katmansal akış). Kontrol vanası (7) kademeli olarak açılarak akış artırılır ve aynı zamanda hidrolik düzeneğin akış kontrol vanası açılır. Akış arttığında mürekkepteki değişiklikler gözlemlenebilir. Mürekkep akışı dalgalanmaya başlayacaktır (geçiş bölgesi), son olarak mürekkep su içerisinde tamamen dağılacaktır (kargaşalı akış).
- 11- Akışkanın hız dağılım profilinin gözlenebilmesi için ise; mürekkep tankı (1), mürekkepin akış gözlem tüpüne damla damla akabileceği şekilde ayarlanır. Kontrol vanası açıldığında damlalar laminer rejime uygun olarak parabolik bir profil sergileyecektir.
- 12- Kontrol vanasının pozisyonu değiştirilerek, hacimsel akış hızları, su düzeneğinin çıkış borusundan ölçekli bir kaba dolan su hacminin süreye bölünmesiyle bulunur.

## HESAPLAMALAR VE SONUÇ

Deneysel çalışma sonucunda:

- 1- Her bir akış kontrol vanası pozisyonu için, suyun hacimsel akış hızının ve ortalama çizgisel akış hızını hesaplayınız,
- 2- Deney sırasında ölçülen her akış hızı değeri için Reynolds sayısını hesaplayınız,
- 3- Ortalama Hız-Re grafiğini çiziniz.

Gözlenen Akış	Su hacmi	Zaman	Akış hızı	Re

- Reynolds Sayısının hesaplanması:

$$R = \frac{V_c D}{\nu}$$

Burada;

$V_c$ : Ortalama hız (m/s),

$D$ : Boru çapı (m),

$\nu$  : Kinematik viskozite (m<sup>2</sup>/s)

- Ortalama çizgisel akış hızının hesaplanması:

$$V_c = \frac{\phi}{\pi D^2/4}$$

Burada;

$\phi$  : Hacimsel akış hızı (m<sup>3</sup>/s),

$D$ : Boru çapı (m)

Aşağıdaki tabloda farklı sıcaklıklardaki su için kinematik viskozite değerleri görülmektedir:

Temperature °C	Cinematic viscosity (m <sup>2</sup> /seg) .10 <sup>-6</sup>
5	1.52
10	1.308
15	1.142
20	1.007
25	0.897
30	0.804
35	0.727
40	0.661
50	0.556

Tablo1: Suyun farklı sıcaklıklardaki kinematik viskozite değerleri

Bu tabloyu kullanarak, tabloda olmayan sıcaklık değerlerindeki suyun kinematik viskozitesini interpolasyon yaparak bulmak mümkündür. Örneğin 18<sup>0</sup>C'daki suyun kinematik viskozitesini bulmak için 15 ve 20<sup>0</sup>C'deki değerleri kullanabilirsiniz.

## TARTIŞMA VE YORUM

- 1-  $Re < 2100$  (Katmansal) ve  $Re > 4000$  (Kargaşalı) gözlemlerinizi uygun mudur? Tartışınız.
- 2- Boya damlalarının hareketi akışkandaki hız dağılımında neyi ifade etmektedir?

## KAYNAKLAR

- 1- MCCABE W.L, SMITH, J. ve HARRIOT P., *Unit Operations of Chemical Engineering*, McGraw Hill International Editions, Fifth Edition, Singapore (1993).
- 2- PEKER, S., HELVACI, S., “*Akiskanlar Mekanigi: Kavramlar, Problemler, Uygulamalar*” Literatür Yayıncılık, İzmir (2003).
- 3- SHAMES, I.H., “*Mechanics of Fluids*“ 4th ed., Mc Graw Hill, (2003).
- 4- UYSAL, B. Z., “*Akiskanlar Mekanigi*”, Alp yayınları, Ankara (2003).

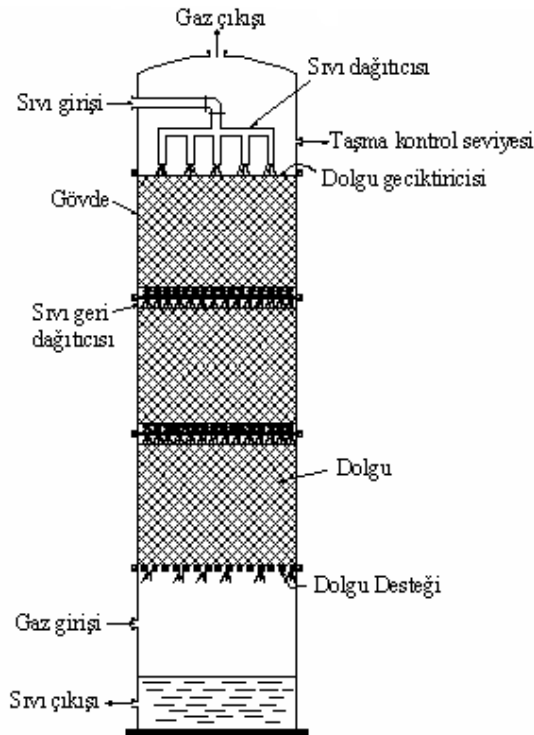
## DENEY NO: 8 GAZ ABSORPSİYON KOLONU

### DENEYİN AMACI

Dolgulu kolonda basınç düşüşlerinin belirlenmesi, sıvı çözeltilerin analizi ve gaz analizi ile absorpsiyon kolonu boyunca sıvı çözeltiden karbondioksit absorpsiyonu oranının hesaplanması.

### KURAMSAL TEMELLER

Gaz absorpsiyonu inert bir bileşen ile gaz karışımı halinde bulunan çözünen bir maddenin, inert bir sıvı ile absorbe edildiği işlemdir. Bu işlemler için hem sürekli temas sağlayan dolgulu kolon (Şekil 2.1), hem de çok kademede temas sağlayan raflı kolonlar kullanılabilir ancak pratikte daha çok dolgulu kolonlar kullanılır.

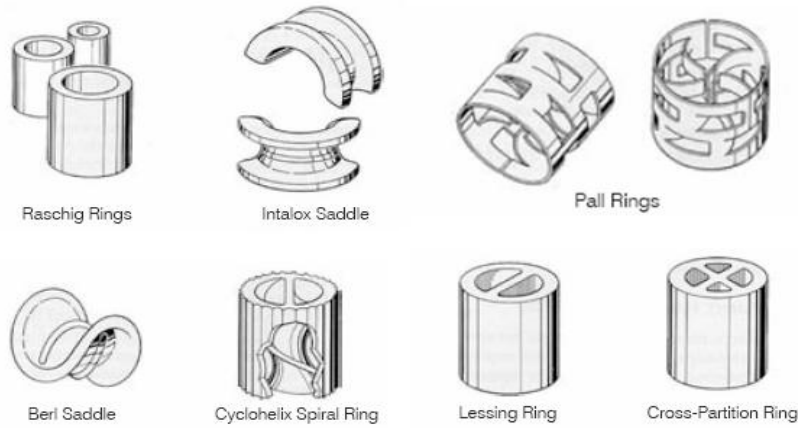


Şekil 2.1: Dolgulu kolon

Dolgulu kolon iki ızgara arasına değişik geometrilerde olabilen partiküllerin koyulduğu bir kolondur. Sabit yatak olarak da bilinir. Dolgulu kolonlar, distilasyon, gaz absorpsiyonu ve sıvı-sıvı ekstraksiyonu işlemlerinde kullanılırlar. Dolgulu kolonlardaki gaz-sıvı teması sürekli dir. Genelde, sıvı, dolgu yüzeyi üzerinden kolondan aşağıya doğru akar; gaz (veya

buhar) ise, ters yönlü akımla yukarı doğru çıkar. Ancak, bazı gaz absorpsiyonu kolonlarında eş yönlü akışlar kullanılır. Tepede; sıvı girişi, sıvı dağıtma boşluğu ve gaz çıkışı, dipte ise; gaz girişi, gaz dağıtma boşluğu ve sıvı çıkışı bulunmaktadır.

Dolgulu kulenin işlevini yapmasındaki en etkin hususlardan birisi dolgu malzemesidir. Önceleri dolgu malzemesi olarak taş ve kok kullanılırken, kimya endüstrisindeki gelişmeler sonucunda içerisindeki amaca uygun malzemelerden üretilmiş dolgu malzemeleri üretilmiştir. Dolgu malzemesinin seçimi kulenin verimi ekonomisini ve ömrünü doğrudan etkiler. Dolgulu kulelerde kullanılan çeşitli dolgu maddelerine bazı örnekler Şekil 2.2’de verilmektedir. Dolgulu kulelerde kullanılan çeşitli dolgu maddelerinin değişik olmasının nedeni, sıvı ile gaz arasındaki yüzey miktarını artırma çabasıdır.



Şekil 2.2: Kolon Dolgu Maddeleri

Bir dolgulu kolonda tek bir faz aktığında kolondaki basınç düşmesi Ergun denkleminde hesaplanabilir. Bunun için önce uygun bir eşdeğer dolgu maddesi çapının tanımlanması gerekir. Bir partikülün veya dolgu maddesinin eşdeğer çapı aynı hacimli kürenin çapı olarak tanımlanabilir. Ayrıca partikülün şekillerindeki farklılık da şekil faktörü ile sınıflandırılabilir. Aşağıda verilen Ergun denkleminde dolgulu yatak için gazdaki basınç düşmesi hesaplanabilir. Dolgulu kolondan tek fazlı bir akışkan geçirildiğinde, akışkan dolgu maddelerinin arasındaki boşlukta akar. Bu boşlukların hacminin toplam kolon hacmine oranı boşluk kesri ( $\varepsilon$ ) olarak tanımlanır.

$$\frac{\Delta p}{L} = 150 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{\mu u_0}{d_p^2} + 1.75 \frac{(1 - \varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{\rho_g u_0^2}{d_p}$$

Gaz fazı toplam kütle transfer katsayısının ( $K_{OG}$ ) belirlenmesi için, dolgulu absorpsiyon kolonları için verilen eşitlikten yararlanılabilir.



$y^*$  ve  $y$ : Kolonun herhangi bir noktasında sıvı ile dengede olan gazın mol kesri ve yığın fazın mol kesri

A: Kolonun kesit alanı

H: Dolgu maddesinin yüksekliği

a: dolgu maddesinin birim hacimdeki yüzey alanı

Seyreltik gaz karışımı için eşitlik aşağıdaki şekilde yazılabilir:

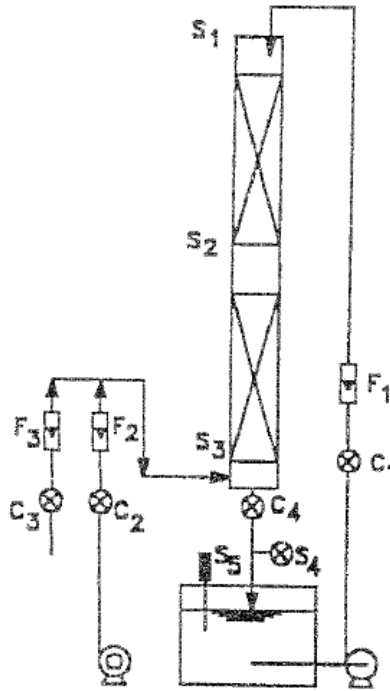
$$H = \frac{d[G_y]}{K_{OG} a A (y' - y)}$$

$$K_{OG} = \frac{G dy}{H a A (y' - y)}$$

Eşitliğin sağ tarafındaki terimimn integralini almak zordur.  $K_{OG}$  daha basit fakat daha az hassasiyetle aşağıdaki eşitlikten belirlenebilir.

$$N = K_{OG} a A H \frac{(P_i - P_o)}{\ln \left( \frac{P_i}{P_o} \right)}$$

## DENEY DÜZENEĞİ



## DENEYİN YAPILIŞI

### Terimlendirme:

a: Her kolonun iç alanı,  $\text{cm}^{-1}$

A: Kulenin kesit alanı,  $\text{m}^{-1}$

$C_d$ : Karbondioksit çözeltisi konsantrasyonu,  $\text{gmol/L}$

$C_N$ : Sodyum karbonat iyonları konsantrasyonu,  $\text{gmol/L}$

F: Akış,  $\text{L/s}$

G: Gaz akış oranı,  $\text{mol/s}$

$K_{OG}$ : Gaz olarak kütle transfer katsayısı,  $\text{mol/s.cm}^2.\text{atm}$

L: Sıvı akışı,  $\text{L/s}$

M: Molekül ağırlığı

P: Basınç,  $\text{atm}$

R: Kütle transfer oranı,  $\text{mol/cm}^2.\text{s}$

T: Standart asit titrasyon hacmi,  $\text{mL}$

$V_B$ : Sıvı analizine eklenen alkali çözeltisi hacmi,  $\text{mL}$

X: Sıvıda bileşenlerin mol oranı

Y: Gazda bileşenlerin mol oranı

### Kısaltmalar:

T: Toplam

i: Kolon girişi koşulları

o: Kolon çıkışı koşulları

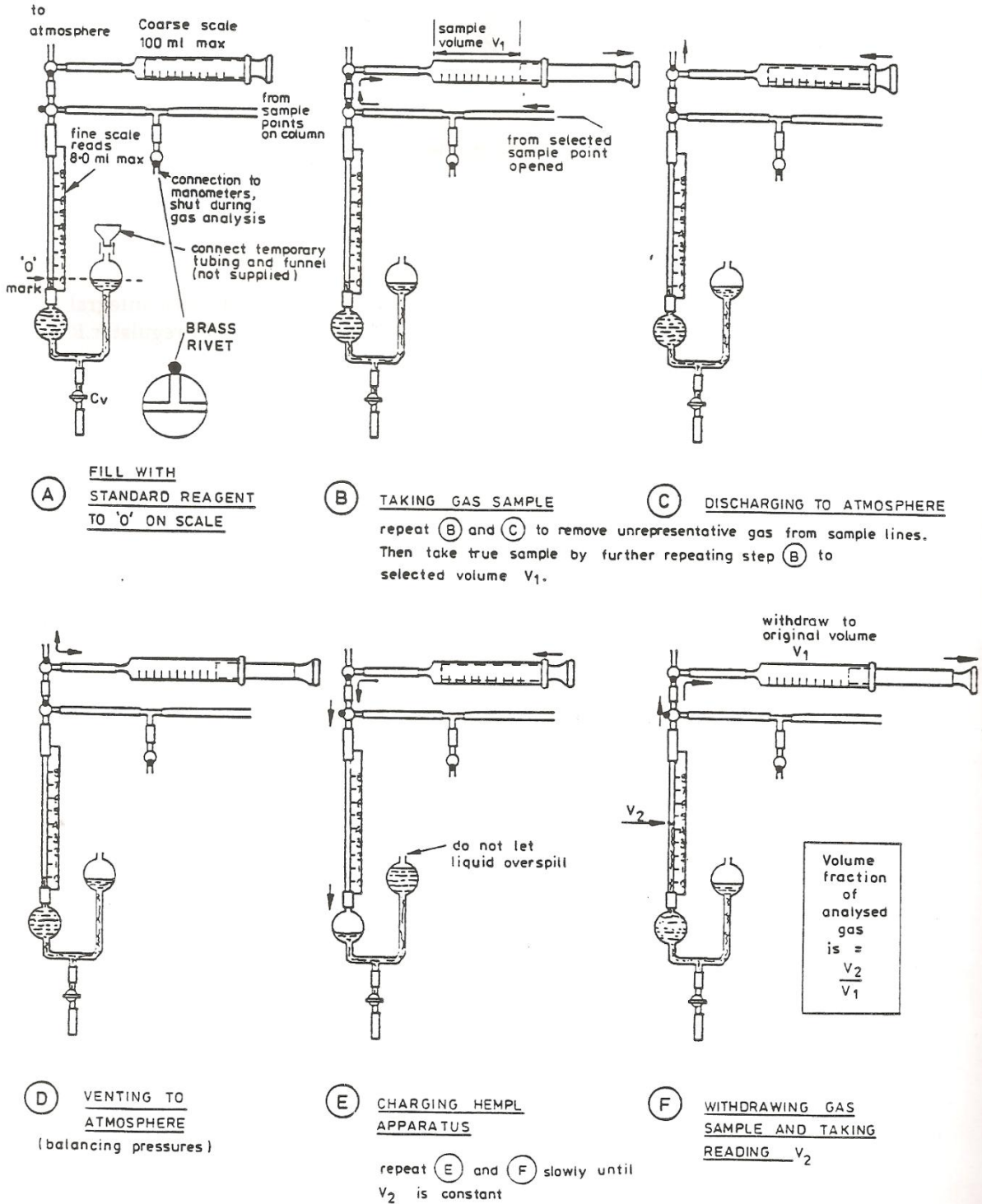
N: Absorpsiyon oranı,  $\text{mol/s}$

## Deney 1: Gaz Analiz Ekipmanlarını Kullanarak Kolondan Aşağı Akan Sudaki Karbondioksit Absorpsiyonunun Ölçülmesi

- Deney sırasında 1M, 300 mL yakıcı soda çözeltisi (NaOH) kullanılacaktır.
- İlk olarak panelin sol tarafındaki cam ekipman 1M yakıcı soda çözeltisi ile ekipmandaki seviye sıfır noktasına gelene kadar doldurulur.
- Sıvı rezervuar tankının  $\frac{3}{4}$ 'ü su ile doldurulur.
- Gaz akış kontrol vanaları C2 ve C3 kapatılır ve sıvı pompası çalıştırılır. Kolondan akan su miktarı 6 L/dk olacak şekilde F1 akış ölçeri kontrol edilerek C1 kontrol vanasından ayarlanır.

- Kompresör çalıştırılarak, hava akışı 30 L/dk olacak şekilde F2 akış ölçeri kontrol edilerek C2 kontrol vanasından ayarlanır.
- CO<sub>2</sub> silindirindeki basınç ayarlama vanası dikkatlice açılır. Karbondioksit akış hızı hava akış hızının yaklaşık yarısı kadar olmalıdır. Bu akış hızı, F3 akış ölçeri kontrol edilerek C3 vanasından ayarlanır.
- S1 ve S2 noktalarından gaz örnekler alınacak ve gaz analiz ekipmanı ile incelenecektir.

***S2 ve S2'den örnek alınması ve gaz analiz ekipmanı ile incelenmesi:***



- Şırıngaya bir miktar örnek alınıp, atmosfere verilir. Bu işlem birkaç kez tekrarlanır (B ve C).
- Şırınga geri doğru çekilerek doldurulur ve  $V_1$  olarak not edilir. Bu deney için bu değer yaklaşık 20 mL olmalıdır. Gazın şırınganın sıcaklığını algılaması için birkaç dakika beklenir.
- Şırınganın kolon ile bağlantısı kesilir ve hava çekilip bırakılarak atmosfer basıncına açılır ve 10 s sonra kapatılır (D).

- Şırınga kolona bağlanır. Bağlandıktan sonra sıvı seviyesinin değişmemesi gerekir eğer değişiyorsa bir üstteki basamak tekrarlanır.
- Gösterge seviyesi sıfır olana kadar beklenir. Şırınga yavaşça kapatılarak sıvı emme kabına doldurulur (E ve F). E ve F seviyede önemli bir değişiklik gözlemlenmeyene kadar tekrarlanır. Göstergedeki değer okunur, bu değer gaz örneğinin hacmini gösterir.

Giriş Koşulları				Hesaplamalar	
F1 CO <sub>2</sub> L/s	F2 Hava L/s	V1 Başlangıçtaki Şırınga Hacmi, mL	V2 Göstergede Okunan Hacim, mL	$\frac{F3}{F2 + F3}$	$Y_i = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)_i$

## Deney 2: Sıvı Analizi ile Kolondan Aşağı Akan Sudaki Karbondioksit Absorpsiyonunun Ölçülmesi

- CO<sub>2</sub>'nin saf suya absorblanmasının incelenmesi için sıvı rezervuar tankının yaklaşık ¾'ü deiyonize su ile doldurulur ve hacmi not edilir.
- Gaz akış kontrol vanaları C2 ve C3'ü kapatılır, sıvı pompası çalıştırılır. Kolondan akan su miktarı C1 kontrol vanasından, 6 L/dk olacak şekilde F1 akışölçerinden bakılarak ayarlanır.
- Kompresör çalıştırılır ve F2 akışölçeri %10 olacak şekilde hava akışı C2 vanasından ayarlanır.
- Karbondioksit silindirindeki basınç ayarlama vanasını açılır ve vana C3'den akışölçer F3, F2'nin yarısı olacak şekilde ayarlanır.
- 15 dk sonra S4 ve S5'den 150 mL'lik örnekler alınır. Bu örnekler aşağıdaki gibi incelenir. CO<sub>2</sub>'in sudaki absorpsiyonunda  $\text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HCO}_3^-_{(\text{aq})} + \text{H}_3\text{O}^+$  tepkimesi oluşur. Bu karışımdaki CO<sub>2</sub> miktarını belirlemek için titrasyon yöntemi uygulanacaktır.

**Not:** Absorpsiyon işleminde kullanılan su deiyonize değilse içinde tuzlar bulunur, bu da deneyi ekleyebilir. Eğer musluk suyu kullanılıyorsa metal iyonları 1.0 mg/L'den fazla olmamalı ve pH alkali 7.1 ile 7.8 aralığında olmalıdır.

### **Gerekli kimyasal çözeltiler:**

Fenolftaleyn indikatör çözeltisi

Standart 0.0277 M NaOH çözeltisi

Standart 0.01 M NaHCO<sub>3</sub> çözeltisi

**Analiz Metodu:**

S4 ve S5'den çekilen çözeltilerin 100 mL'sine 5-10 damla fenolftaleyn indikatörü damlatın. Eğer hemen kırmızıya dönüyorsa çözeltide serbest CO<sub>2</sub> yok demektir. Eğer örnek renksiz kalırsa standart alkali çözeltisi (NaOH) ile titrasyon yapın. Bu işleme pembe renk elde edilene kadar devam edilir ve eklenmiş olan çözelti V<sub>B</sub> not edilir.

F1: ..... L/s

V<sub>T</sub>: ..... Sistemdeki suyun hacmi, L

Zaman, dk	Toplama Tankı S5		Örnek noktasından çıkış S4	
	V <sub>B</sub> , mL	Tanktaki C <sub>d</sub> [C <sub>di</sub> ], mol/L	V <sub>B</sub> , mL	Çıkıştaki C <sub>d</sub> [C <sub>do</sub> ], mol/L
10				
20				
30				
40				
50				
60				

## HESAPLAMALAR VE SONUÇLAR

### Deney 1: Gaz Analiz Ekipmanlarını Kullanarak Kolondan Aşağı Akan Sudaki Karbondioksit Absorpsiyonunun Ölçülmesi

Giriş ve Çıkışların Analizinden:

$$\text{Giriş: } Y_i = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)_i$$

$$\text{Çıkış: } Y_0 = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)_0$$

F<sub>a</sub>: kolonun üstü ile altı arasında absorplanan CO<sub>2</sub> olmak üzere, [=] L/s

$$\underbrace{[F_2+F_3]Y_i}_{\text{CO}_2 \text{ giriş}} - \underbrace{[F_2 + (F_3-F_a)]Y_0}_{\text{CO}_2 \text{ çıkış}} = \underbrace{F_a}_{\text{CO}_2 \text{ absorplanan}}$$

CO<sub>2</sub> giriş      CO<sub>2</sub> çıkış      CO<sub>2</sub> absorplanan

$$F_a = \frac{(Y_i - Y_0)(F_2 + F_3)}{1 - Y_0} = \frac{(Y_i - Y_0)}{(1 - Y_0)} \times \text{Toplam gaz akısı}$$

L/s biriminde olan absorplanan CO<sub>2</sub> miktarı, aşağıdaki denklem ile g/mol/s birimine çevrilebilir:

$$G_a = \frac{F_a}{22.42} \times \left( \frac{\text{Ortalama kolon basıncı, mmHg}}{760} \right) \times \left( \frac{273}{\text{ortalama kolon sıcaklığı } ^\circ\text{C} + 273} \right)$$

## **Deney 2: Sıvı Analizi ile Kolondan Aşağı Akan Sudaki Karbondioksit Absorpsiyonunun Ölçülmesi**

*Belli bir periyotta CO<sub>2</sub> absorpsiyonu: (Örneğin 30.saniyede)*

$$\text{ortalamaoran} = \frac{C_{di}(t = 40) - C_{di}(t = 10) \times V_T}{30 \times 60} \text{ mol/s}$$

*Herhangi bir parça zamanında kolonda CO<sub>2</sub> absorpsiyonu:*

Çözünmüş CO<sub>2</sub>'nin girişi: F1C<sub>di</sub>, mol/s

Çözünmüş CO<sub>2</sub>'nin çıkışı: F1C<sub>do</sub>, mol/s

Absorpsiyon hızı: F1[C<sub>di</sub>-C<sub>do</sub>], mol/s

## **DEĞERLENDİRME VE YORUM**

- Gaz akış hızlarına karşı çizilen basınç düşüşleri grafiği doğrusal bir grafik midir? Bu grafikten elde edilen eğim değeri nedir?
- Elde ettiğiniz absorpsiyon hızını göz önüne alarak, bu absorpsiyon kulesi havadaki CO<sub>2</sub>'yi uzaklaştırmak için yeterli midir yoksa absorpsiyon hızını arttırmak için hangi parametreler neden değiştirmeniz gerekir açıklayınız.
- Absorpsiyonun gerçekleşme süresi uzatılırsa elde edeceğiniz son veriler nasıl olurdu açıklayınız.
- Toplam transfer katsayısı nedir ve neyin göstergesidir? Elde ettiğiniz toplam kütle transfer katsayısını literatürdeki değeri ile karşılaştırınız.

## **KAYNAKLAR**

1. Uysal, B.Z., Kütle Transferi Esasları ve Uygulamaları, Gazi Üniversitesi İletişim Fakültesi Basımevi, Ankara, 1996.