

**T.C.
MANİSA CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
TERMODİNAMİK VE ISI BİLİM DALI**

**SU SOĞUTMA KULESİ KAPASİTE ARTTIRIMI İÇİN SAYISAL VE
DENEYSEL ÇALIŞMA**

Basri Efe ŞENGİL

**Danışman
Doç. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL**



MANİSA-2019

TEZ ONAYI

Basri Efe ŞENGİL tarafından hazırlanan " **Su Soğutma Kulesi Kapasite Arttırımı İçin Sayısal Ve Deneysel Çalışma**" adlı tez çalışması 29/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak savunulmuş ve **oyçokluğu / oybirliği** ile başarılı olarak kabul edilmiştir.


Danışman

Doç. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL
Celal Bayar Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet OKUR
Dokuz Eylül Üniversitesi



Jüri Üyesi

Dr. Öğr. Üyesi Mesut ABUŐKA
Celal Bayar Üniversitesi



TAAHHÜTNAME

Bu tezin Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Basri Efe ŞENGİL



İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	I
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	III
ŞEKİLLER DİZİNİ	V
TABLO DİZİNİ	VII
TEŞEKKÜR.....	VIII
ÖZET	IX
ABSTRACT.....	X
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ.....	5
3. SOĞUTMA KULELERİNİN TANITIMI.....	8
4.1. Soğutma Kulelerinin Sınıflandırılması.....	8
4.1.1. Su İle Havanın Birbirine Bağlı Hareketine Göre Sınıflandırılması..	9
4.1.1.1. Ters Akışlı Su Soğutma Kuleleri.....	9
4.1.1.2. Çapraz Akışlı Su Soğutma Kuleleri	10
4.1.1.3. Paralel Akışlı Su Soğutma Kuleleri.....	11
4.1.2. Hava Akımına Göre Sınıflandırılması.....	11
4.1.2.1. Doğal Akımlı Su Soğutma Kuleleri	11
4.1.2.2. Rüzgârlı Tip Su Soğutma Kuleleri	12
4.1.2.3. Zorlanmış Akımlı Su Soğutma Kuleleri.....	12
4.1.3. Soğutma Suyu Dolaşımına Göre Sınıflandırılması	13
4.1.3.1. Açık Tip Su Soğutma Kuleleri	13
4.1.3.2. Kapalı Tip Su Soğutma Kuleleri	14
4.1.4. Dolgu Tipine Göre Sınıflandırılması.....	15
4.1.4.1. PVC Film Dolgulu Su Soğutma Kuleleri.....	15
4.1.4.2. PP Bigudi Tipi Dolgulu Su Soğutma Kuleleri	16
4.2. Su Soğutma Kulesi Elemanları	17
4.2.1. Su Dağıtım Elemanları	17
4.2.2. Fan	18
4.2.3. Damla Tutucu	20
4.2.4. Dolgu Malzemesi	20
4.2.5. Hava Giriş Panjurları.....	21
4.2.6. Sirkülasyon Pompası	22
4.2.7. Taşıyıcı Yapı	23
4.2.8. Servis Penceresi.....	24
4.2.9. Su Yönlendiricileri	25
4.3. Su Soğutma Kulesi Bakımı	25
4. TERS AKIŞLI BİR SU SOĞUTMA KULESİNİN İNCELENMESİ	27
5.1. Termodinamik Analiz	27
5.2. Psikrometrik Analiz.....	30
5.3. Entalpi Farkı Metodu	32
5.4. Psikrometrik Temel Kavramlar	33
5.4.1. Kuru Termometre Sıcaklığı.....	34
5.4.2. Yaş termometre sıcaklığı.....	35
5.4.3. Çiy Noktası Sıcaklığı.....	35
5.4.4. Özgül Nem	36
5.4.5. Bağlı Nem.....	36

5.5. Kapalı Tip Bir Soğutma Kulesinde Isı Eşanjörü İçin Isı Transfer Hesabı	37
5.5.1. Enerji Analizi	48
5.5.2. Verim	49
5. BİR KAPALI TİP SOĞUTMA KULESİNDE DENEYSEL ÇALIŞMA	50
6.1. Sistemin tanıtımı	50
6.1.1. Deneyin yapılışı	51
6.1.2. Test Cihazlarının Tanıtımı ve Ölçümdeki Belirsizlikler	52
6. SONUÇLAR	58
6.1 Dolgu ve Eşanjör Sıra Sayısı Etkisi	58
6.2 Eşanjör Su Debisinin Etkisi	60
6.3. Kule Hava Ve Su Debileri Değişiminin Etkisi	63
7. ÖNERİLER VE TARTIŞMA	65
8. KAYNAKÇA	66
9. ÖZGEÇMİŞ	68



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

a = hava

v = buhar

w = suyu

h = entalpi

m = kütle

G = kuru havanın debisi

t_a = havanın giriş sıcaklığı

t_{wi} = suyun giriş sıcaklığı

$h_{ai,i}$ = havanın giriş entalpisi

ω = buharın hava içerisindeki oranı

p = basınç

Δ = arasındaki farkı belli eden ifade

h_1 = iç yüzey taşınım katsayısı

m = boru içerisindeki su debisi

r_1 = Kule eşanjör borusunun iç çapı

r_2 = Kule eşanjör borusunun dış çapı

μ = kinematik viskozite

$D_1 = 2 r_1$

U_m = akışkan hızı

Q = transfer edilen toplam ısı

h_{fg} = havanın içindeki su buharı potansiyeli

Δx = diferansiyel boru parçası

L = boru boyu

N = boru parça sayısı

k: Isı iletim katsayısı

c = özgül ısı

r_1 = boru iç çapı

r_2 = boru dış çapı

ω_B = Gerçek özgül hacim

ω_{aB} = kuleden çıkan hava kütlelerinin özgül hacmi

KISALTMALAR

Aksk = Aksiyel Kapalı Soğutma Kulesi

Ask = Aksiyel Soğutma Kulesi

Rksk = Radyal Kapalı Soğutma Kulesi

Rsk = Radyal Soğutma Kulesi

PVC = Poli Vinil Klorür

HAD = Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği



ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Soğutma kuleleri	2
Şekil 3.1. Aksiyel havalı yaş kapalı, radyal kapalı ve aksiyel kapalı soğutma kuleleri	8
Şekil 3.2. Ters ve çapraz akışlı soğutma kuleleri	9
Şekil 3.3. Ters akışlı bir su soğutma kulesi	10
Şekil 3.4. Çapraz akışlı bir su soğutma kulesi	11
Şekil 3.5. Doğal akımlı su soğutma kuleleri	12
Şekil 3.6. Zorlanmış akımlı su soğutma kulesi	13
Şekil 3.7. Açık Tip Su Soğutma Kulesi	14
Şekil 3.8. Kapalı tip su soğutma kulesi	15
Şekil 3.9. PVC film dolgu	16
Şekil 3.10. Bigudi tipi dolgu	16
Şekil 3.11. Su dağıtım elemanı	18
Şekil 3.12. Radyal ve aksiyel fan	19
Şekil 3.13 Hava Akışı ve Statik Basınç Grafiği	18
Şekil 3.14. Damla tutucu	20
Şekil 3.15. Film tipi ve bigudi dolgu	21
Şekil 3.16. Soğutma kulesi panjurları	22
Şekil 3.17. Kapalı tip bir kulede sirkülasyon pompası	23
Şekil 3.18. Soğutma kulesinde taşıyıcı yapı	24
Şekil 3.19. Soğutma kulesinde servis penceresi	24
Şekil 3.20. Soğutma kulesinde su yönlendiriciler	25
Şekil 3.21. Bakım öncesi soğutma kuleleri	26
Şekil 4.1. Psikrometrik diyagram	34
Şekil 4.2. Kuru termometre sıcaklığının psikrometrik diyagramda kullanımı	35
Şekil 4.3. Yaş termometre sıcaklığının psikrometrik diyagramdaki gösterimi	35
Şekil 4.4. Özgül nemin psikrometrik diyagramdaki gösterimi	36
Şekil 4.5. Bağıl nemin psikrometrik diyagramdaki gösterimi	37
Şekil 4.6. Psikrometrik diyagramda havanın ısınmasının gösterimi	30
Şekil 4.7. Karşı akışlı soğutma Kulesinde su ve havanın sıcaklıkla ilişkisi	31
Şekil 4.8. Eşanjör hava – su akımı	38

Şekil 4.9. Boru kesiti	39
Şekil 4.10. Borunun hayali açılmış hali	39
Şekil 4.11. Diferansiyel parçacıklar arası geçiş	41
Şekil 4.12. Isı transferi direnç metodu	41
Şekil 4.13. N sayısı gösterimi	43
Şekil 4.14. Boru girişi	44
Şekil 5.1. Test cihazı ve harici ısıtma tankı, 6 ve 8 sıralı eşanjörler	52
Şekil 5.2. Anemometre	53
Şekil 5.3. Termokupl	54
Şekil 5.4. Manometre	55
Şekil 5.5. Debimetre	56
Şekil 5.6. Ampermetre	57
Şekil 6.1. a) 4 sıra bakır boru dolgu yok b) 4 sıra bakır boru tek dolgu c) 4 sıra bakır boru iki dolgu d) 6 sıra bakır boru tek dolgu e) 6 sıra bakır boru dört dolgu f) 8 sıra bakır boru dört dolgu	57
Şekil 6.2 Eşanjör Çıkış Sıcaklığı	59
Şekil 6.3 Havuz Suyu Sıcaklığı	60
Şekil 6.4 Kule Verimi	61

TABLO DİZİNİ

	Sayfa
Tablo 5.1. Anemometre cihazının teknik özellikleri.....	51
Tablo 5.2. Manometrenin Teknik Özellikleri.....	53
Tablo 5.3. Debimetrenin Teknik Özellikleri.....	54
Tablo 5.4. Ampermetrenin Teknik Özellikleri.....	55
Tablo 6.1. Dolgu ve Eşanjör Sıra Sayısının Verime Etkisi.....	58
Tablo 6.2. Eşanjör Giriş Sıcaklığı Sabit Su Debisi Arttığı Durumun Verime Etkisi..	59
Tablo 6.3. 35°C’de Eşanjör giriş sıcaklığı ve debi sabit iken frekansın arttırılmasının verime etkisi.....	62
Tablo 6.4. 80°C’de Eşanjör giriş sıcaklığı ve debi sabit iken frekansın arttırılmasının verime etkisi.....	62

TEŞEKKÜR

Çalıőmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren danışman hocam Sayın Doç. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL'e, bilgi ve tecrübesi ile lisansüstü öğrenim hayatımın tüm zorlu aőamalarında maddi manevi her yönden yardımcı olan, tecrübeleri ile beni aydınlatan ve desteğini hiç eksik etmeyen, kendilerini tanımaktan büyük onur duyduğum sevgili Yusuf TÜRKOğLU ve Doç. Dr. Turhan ÇOBAN hocama ve öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Basri Efe ŞENGİL
Manisa, 2019



ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

Su Soğutma Kulesi Kapasite Arttırımı İçin Sayısal Ve Deneysel Çalışma

Basri Efe ŞENGİL

Manisa Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL

Bu çalışmada, su soğutma kuleleri üzerinde belirli değişiklikler yapılarak kulenin veriminin artırımı amaçlanmaktadır. Bu konuda değişiklik yapılabilecek kule parçaları; fan, dolgu, soğutma suyu pompası işletme suyu pompası olarak ön görülmüştür. Bunun yanı sıra ortam şartlarının ve sistem şartlarının da kulenin verimini arttırabileceği konusunda çalışma yapılmıştır. Ortam şartları olarak; yaş termometre sıcaklığı sistem şartı olarak ise işletme suyu giriş sıcaklığı devir-daim pompası, fan motoru frekanslarında değişiklikler yapılarak verim incelenmiştir. Bir frekans konvertörü yardımı ile fan motor devri ve kule devir daim pompası devri ayarlanmıştır. Bunun sonucunda verime olan etkiler incelenmiştir. Konvertör yardımıyla devir artırımı yapıldığında yüksek sıcaklıklarda verimliliğin daha çok arttığı görülmüştür. Aynı zamanda dolgu ve eşanjör sıra sayısı ile oynanarak verimliliğe olan etkilerine bakılmıştır. Dolgu ve eşanjör sıra sayısı arttırıldığı zaman verimdeki artış göz önüne konulmuştur. Kule içerisinde fandan soğutma suyunun olduğu yere kadar olan kontrol hacminde kullanılabilir olan maksimum alan verimi olumlu yönde etkilemektedir. Bu nedenle sıra ve boru sayılarını arttırmak verime olumlu etkide bulunmuştur. Çalışma esnasında bir prototip yapılarak deneysel olan verilere göre verimdeki artış gösterilmiştir. Eşanjör sıra sayısının artımı sonucu % 10 verim artışı gözlenmiştir. Çalışmada 4 sıra bakır boru için yapılan testte dolgu sıra sayısının artmasıyla kule veriminde % 3 lük bir verim artışı gözlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: kapalı tip soğutma kulesi, verim artımı, dolgu sıra sayısı, eşanjör boru sıra sayısı

2019, 81 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

Numerical And Experimental Study For Water Cooling Tower Capacity Increase

Basri Efe ŞENGİL

**Manisa Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Fatih SELİMEFENDİGİL

In this study, it is aimed to increase the efficiency of the tower by making certain changes on the water cooling towers. The tower parts that may be modified in this regard; fan, filler, cooling water pump is intended as operating water pump. In addition to this, it has been studied that environmental conditions and system conditions can also increase the efficiency of the tower. As environmental conditions; Wet thermometer temperature system condition as the operating water inlet temperature circulating pump, fan motor frequencies were studied by making changes in efficiency. With the help of a frequency converter, the fan motor speed and the tower recirculation pump speed are set. As a result, the effects on yield were investigated. It is seen that the efficiency is increased at high temperatures when the speed increase is made with the help of converter. At the same time, the effect of the filling and heat exchanger on the efficiency of the row was investigated. When the number of filler and heat exchanger rows is increased, the increase in efficiency is considered. The maximum area that can be used in the control volume from the fan to the location of cooling water in the tower positively affects the efficiency. Therefore, increasing the number of rows and pipes had a positive effect on efficiency. A prototype was made during the study and the increase in yield was shown according to experimental data. As a result of increasing the number of heat exchanger rows, a 10% increase in efficiency was observed. 4 row copper tube exchanger, with the increase in the number of filling rows, a 3% increase in the efficiency of the tower was observed.

Keywords: water cooling tower, efficiency increase, filling effect, heat exchanger row effect

2019, 81 Pages

1. GİRİŞ

Günümüzde tükenen doğal kaynaklar ve insanların doğaya verdikleri zarar göz önünde bulundurulunca, ısıtma soğutma uygulamalarında her alanda daha çevre dostu bir sistem kullanılması gerektiği gerçeği her geçen gün netleşmektedir [1-4]. Örneğin sanayide soğutma uygulaması eski dönemlerde doğal bir kaynaktan çekilen su ile sağlanıp, sonrasında kirlenmiş suyun ya o kaynağa verilmesi ya da lağımaya boşaltılması ile yapılıyordu. Bu olay hem ekosistemi etkiliyor hem de su sarfiyatına yol açıyordu.

Bir diğer taraftan ısıtma alanındaki uygulamalarda kullanılan yakıtlar doğaya her yönüyle zarar vermektedir. Günümüzde her ne kadar doğalgaz kullanımına önem verilse de sağlık ve güvenlik alanlarında doğalgazın tehlikesi de göz ardı edilemez. Ayrıca ısıtmanın yanı sıra soğutmayı da tüketebilir bir kaynak kullanmayan bir sistemin yapması çağımızın en büyük ihtiyaçlarından biri olmuştur. Soğutma ve ısıtma alanlarında bu ihtiyaçların tamamı ısı pompaları ve türevleri ile karşılanabilir. Isı pompaları yalnızca elektrik enerjisi kullanılarak çalışırlar ve bu elektrik ihtiyacı ise doğa dostu yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak karşılanabilir [5-6]. Konumuz olan soğutma kuleleri ise ısı pompalarının ısı yükünü atmosfere atmadaki en ideal uygulamalardandır.

Soğutma kuleleri sanayi ve eğlence alanında makine ve termal konfor uygulamalarında büyük önem arz eden cihazlardır [7-9]. Sanayide makinelerin ısınan yağlarını soğutmada ve cihazın verimli çalışmasında, termal konfor olarak iklimlendirmede kullanılır. Büyük hacimli yerlerin soğutulmasında kullanılan chiller gruplarının performansının yüksek olması için en ideal yöntemlerden biri soğutma kuleleridir. Özellikle döküm fabrikaları gibi yüksek sıcaklıkları belli miktar düşürmede en ideal yöntem soğutma kuleleridir.

Su soğutma kuleleri ısınan suyun buharındaki atık ısıyı atmosfere vermek üzere tasarlanmış su soğutma cihazlarıdır. Kuleler genel itibari ile endüstriyel tesislerde kullanıldığı gibi havalandırma ve soğutma amaçlıda kullanılabilir. Termik santraller gibi güç üreten sektörler için çok büyük kapasiteli olarak üretilebildikleri gibi küçük ve orta büyüklükteki sanayi sektörlerinde ise daha az kapasiteli olanları da

kullanılmaktadır. Atık ısının bir doğal su kaynağına verilmesinin sakıncalı olduğu veya mümkün olmadığı konumlarda diğer yöntemlere göre daha hesaplı bir metot olduğuna karar verilirse bu sistemler kullanılabilir. Soğutma kulelerinin maliyeti kullanılan fan, açık veya kapalı kule olması ve de kapasitesine göre değişim göstermektedir. İşletme durumu ve ihtiyacına göre bunlar belirlenerek seçim yapılır. Şekil 1.1’ de kulelerin bazı seçenekleri verilmiştir.



Şekil 1.1. Soğutma kuleleri

Öncelikle bu sistemin işletme için ekonomik olup olmadığı konusu ele alınmalıdır. Ekonomiklik açısından maliyet hesapları yapıldıktan sonra çevreye diğer alternatif ısı atım tekniklerinden çok daha duyarlı olan bu sistem kurulabilir.

Su soğutma kuleleri sürekli bir hava, su akışı ile ısı ve kütle transferi yaparak suyu soğutmayı amaçlayan cihazlardır. Bu tanımlı dikkate alarak bir su soğutma

kulesinin performansını etkileyen asıl faktörlerin havanın yaş termometre sıcaklığı ile soğutulacak suyun arasındaki sıcaklık farkı, suyun hava ile temas yüzeyi ve hava ile suyun birbiri arasındaki geçiş hızı olarak söyleyebiliriz.

Kapalı tip soğutma kulelerinde bir bakır eşanjörün içerisinden geçen suyun bakır borunun üzerine dolguların yardımı ile soğutulan suyun homojen şekilde serpilmesi neticesinde soğutma yapılır. Bu soğutma sırasında boruların üzerine gelen su fan yardımı ile borularda yaş termometre sıcaklığında olacağı düşünülerek bu suyun buharlaşması ile faz değişimi sırasında kule dışına faz değişimi ile atacağı enerji büyük ölçüde önem arz eder. Bu atılan enerjinin fazla olması soğutma veriminin artmasını sağlar.

Bu tez kapsamında kapalı tip bir su soğutma kulesinin verimini arttırmak için deneysel çalışmalar yapılacaktır. Soğutma kulelerinin veriminin artırılması, işletmelerin kurulum maliyetlerinin düşük olması ve soğutma kulelerinin kullanımı esnasındaki enerji sarfiyatı sebebiyle önem arz etmektedir. İşletmenin tam ihtiyacı olan soğutma kapasitesinin optimize edilmiş bir sistem ile sağlanması eşanjörün boyutlarının doğru hesaplanması, hava ve su debilerinin uygun bir şekilde seçilmesi ile mümkündür.

Su soğutma kulesinin hangi sektörde ne amaçla kullanılacağı kulenin seçiminde büyük rol oynamaktadır. Örneğin hizmet sektöründe su soğutma kulesinin sessiz çalışması, kuleden sağlanacak enerji tasarrufundan daha önemlidir. Bu nedenle radyal fanlı su soğutma kuleleri tercih edilir. Aynı durum hastanelerde de geçerlidir. Radyal fanlı su soğutma kulelerinin ilk yatırım maliyeti ve bakımı aksiyel fanlı su soğutma kulelerinden daha fazladır. Ancak sessiz çalışması bu sektörler için tercih sebebidir.

Bu tez kapsamında aksiyel ve radyal kulelerin ikisinin de verimini arttırabilecek eşanjör boyutları, dolgu sıralaması, dolgu boyutları ve kule devir daim suyu ile kule hava debisi değiştirilerek kulenin verimi gözlenmiştir. Amaç eşanjör boyutlarını, bakır boru yüzey alanını sabit tutmak koşuluyla bakır boru sayısı ve uzunluğu ile oynayarak aynı zamanda dolgu sıralamasını değiştirerek verimi arttırmaktır. Değiştirilen boyutların yanı sıra kulenin hava ve sirkülasyon suyu debilerini değiştirerek verimin artırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda öncelikle 2. bölümde literatür taranıp benzer şekilde verimi arttırmak için yapılan çalışmalar incelenmiştir. Çalışmaların geneli baz alınarak

hibrid bir sistem ile verimdeki değişiklikler incelenmiştir. 3. Bölümde su soğutma kulesinin çeşitleri, kullanım alanları, su soğutma kulesini meydana getiren elemanlar ve su soğutma kulelerinin bakımlarından bahsedilmiştir. 4. Bölümde ise ters akışlı bir su soğutma kulesinin tanıtımı, termodinamik hesapları, psikrometrik tablo ile ilişkisi ve verim analizi anlatılmıştır. 5. Bölümde ise test kulesinin tanıtımı, yapılan testlerin açıklanması ve sonuçların değerlendirilmesi ve test cihazlarının tanıtımı yapılmıştır. 6. Bölümde ise elde sonuçlar yorumlanmıştır.



2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde su soğutma kulelerinin performansını artırma üzerine çok sayıda yapılan çalışma vardır.

Kaiser [1] yeni bir soğutma kulesi tipinde buharlaşma soğutma süreçlerini incelemek için sayısal bir model geliştirilmiştir. Bu çalışmanın temel sonuçları, ortalama su damlası boyutunun verimlilik üzerindeki güçlü etkisini göstermektedir ve ıslak hazne sıcaklığı, su kütlesi akışı, hava kütle akış oranı ve su giriş sıcaklığı ile yaş termometre sıcaklığı arasındaki sıcaklık farkı gibi diğer değişkenlerin etkisini ortaya koymaktadır. Yine benzer bir çalışmada Abdullah Alkhedhair [2] kulelerde su damlacıklarının buharlaşmasının kuledeki hava debisine bağlı olduğunu ve soğutmanın veriminin güçlü bir damlacık boyutu ve hava hızına bağlı olduğunu ortaya koymuştur.

Heidarinejada [3] ise ıslak soğutma kulelerinde performans tahminini Bosnjakovic denklemini kullanarak Lewis faktörünün etkisini gözlemlemiştir. Bunun sonucunda kulenin performansı için gereken kule hacmini ve yaş termometre sıcaklıklarını ortaya koymuştur. Bu çalışma sonucunda kulenin performansının bu değişkenlere bağlı olduğunu formüllerle göstermişlerdir. Zhang [4] ise Merkel yaklaşımlarını kullanarak hava ve su sıcaklığını havanın içerisinde sıcaklığa göre absorbe edebileceği nem miktarını incelemiştir. Yaş termometre sıcaklığı ve kule içerisindeki su debisinin optimize edilmesi ile soğutmadaki verimin artacağını söylemiş ve bunu grafiksel olarak göstermişlerdir. Asvapoositkul'un [5] çalışmasında NTU denklemi, Merkel denklemi, kuru ve ıslak soğutma kulelerinde ısı transferi temel denklemi kullanılarak çapraz akışlı hava ve su debileri bilgisayarda analiz edilmiştir. Bu analizler sonucunda debilerin değiştirilmesi ile maksimum verim yakalanmıştır. Mohiuddin vd. [6] makalesinde soğutma kulesi verim artışını su debisi hava debisi ve dolgulama gibi faktörlere bağlı olmasına yönelik bir tasarım çalışması yapmışlardır. Dolgu tiplerini değiştirerek verimde artış amaçlamışlardır. Üçgen tipte ve yaprak tipte dolgular kullanarak bunların verimlerini tasarımlarına bağlı olarak incelemiştir. Bunun yanı sıra su debisinde kule verimine ilişkin etkilerine bakmışlardır.

Su ve ark. [7] kuleleri bir hava ısı difüzyon tekniği olarak incelemiştir. Bunu modelleyerek belli miktarlardaki çevre hava debilerinin kule verimine etkilerini

incelemişlerdir. Sonuç olarak belli miktarın üzerine çıkan çevre hava debisinin hava ısı difüzyonunu bir örtü görevi görerek engellediğini savunmuşlardır. Rüzgar hızının 4 m/s 'den fazla olduğu noktalarda verimin düştüğünü ortaya koymuşlardır. Bedekar ve ark. [8] ise çalışmalarında soğutma kulesinin veriminin yaş termometre sıcaklığına bağlı olduğunu göstermişlerdir. Ayrıca su/hava oranının verimdeki asıl faktör olduğunu belirtmişlerdir. En iyi verimi almak için giren havanın yaş termometre sıcaklığına çekilmesi gerektiğini söylemişlerdir. Gan ve ark. [9] yaptıkları çalışmada optimize edilmiş bir kulenin fan ve pompa açısından büyük enerji kayıplarını engelleyebileceğinden bahsetmiştir. Yalnızca gereken debilerle istenen verimin elde edilmesi adına bir prototip yapmışlardır. Isı eşanjöründeki basınç kaybının sadece boru düzenlemesine, hava ve su akış hızlarına değil aynı zamanda akış modellerine de bağlı olduğunu söylemişlerdir.

Al-Waked [10] çalışmasında doğal çekişli ıslak soğutma kulesi içerisindeki ısı ve kütle transferini, çalışma koşulları ve rüzgâr koşulları altında sayısal olarak incelenmiştir. Kulenin nozul sayısı ve su debisiyle oynayarak verime olan etkilerini incelemiştir. Su akış hızında 4500 kg/s'lik bir artış, yaklaşımda 1 K'lik bir ısı artışına neden olmuştur. Diğer bir inceleme ile de damlacık çapının 3 mm'den 10 mm'ye çıkartılması yaklaşımda yaklaşık 5 K'lik bir ısı artışına neden olmuştur. Rüzgâr türbin hızının da büyük derecede verime etkisi olduğunu göstermişlerdir. Sadafi ve Jahn [11] yaptıkları çalışmada, ANSYS FLUENT'teki çok bileşenli ayrık faz modeli, çözünmüş NaCl içeren ortamla püskürtme soğutma benzetimini yapmak üzere modifiye etmişlerdir. Doğru bir değişiklik seti yapmak için, NaCl kristallerinin taramalı elektron mikroskopu kullanılarak gözlemlenmesiyle elde edilen verilerin mikro analizi gerçekleştirilmiştir. Modelin tek bir damlacık için onaylandıktan sonra, soğutma kulesi temsili senaryosunda tek bir meme göz önüne alınarak pratik bir problem araştırılmıştır. Tuzlu suyun saf su püskürtme ile karşılaştırıldığında, nozul çıkışı ve tam kuru hava akımı arasındaki mesafe, tuzlu su kullanıldığında %29,8 kısalmaktadır. Tam buharlaştırmadan sonra, ağızdan 6 m uzaklıkta, daha düşük nem, daha düşük ortalama sıcaklığı ve daha yüksek bir soğutma verimi sergilemiştir. Bunların hepsi sprey soğutma uygulamalarında tuzlu suyun üstün performansını teyit etmekte olduğunu belirtmişlerdir.

Asvapoositkul ve ark. [12] hibrid bir soğutma kulesini inceleyerek, kuru bir soğutma ünitesinin çalışma performansını, açık havalı soğutma ünitesinin performansıyla birleştirmişlerdir. Her kule hava kütle akış oranını ayarlayarak seçilen orana bağlı olarak performansı ikisi arasında değiştiğini görmüşlerdir. Kuledeki hava debisini optimize edilerek verimi incelenmiştir. Jian-Feng Zhou ve ark. [13] eşanjör boru tasarımını üçgen sıralama ile yaparak farklı tip bir boru sıralamasını denemişlerdir. Isı transferi analizi, Bell-Delaware yöntemine dayanan analitik hesaplama sonucuna kıyasla, ısı aktarım alanının sadece % 57'sini kullanan görev uyguladığından, yeni tüp demeti tipinin oldukça verimli olduğunu ortaya koymuştur.

Peyman Imani ve ark. [14] yaptıkları çalışmada 6 çeşit dolgu tipi üzerinde çinko oksitli su kullanarak soğutmaya olan verimini araştırmışlardır. ZnO/H₂O oranıyla oynayarak bunun termal verime etkisine bakmışlardır. Her dolgu tipi içinde deneyler yaparak verimi ve kirliliğe gösterdikleri direnç incelenmiştir. En uygun dolgu tipi olarak metal retiküler yatak bulunmuştur. Çinko oksit oranıyla oynayarak verimi saf suya göre % 10 civarı arttırmayı başarmışlardır. Gharahheizi ve ark. [15] kule karakteristik özellikleri (KaV/L), su ve hava oranı (L/G) ve dolgu malzemesinin kuleye olan verimliliğini incelemişlerdir. Dolgu malzemesinin tipi ve sıralanmasının kule verimliliğine olan etkisini incelemişlerdir. Dolgu malzemesinin dikey kesitli doğu malzemesinin düşey kesitliye göre daha verimli olduğunu ortaya koymuşlardır. Ayrıca belirli bir oranın üzerindeki L/G kulenin performansını olumsuz yönde etkilemiştir.

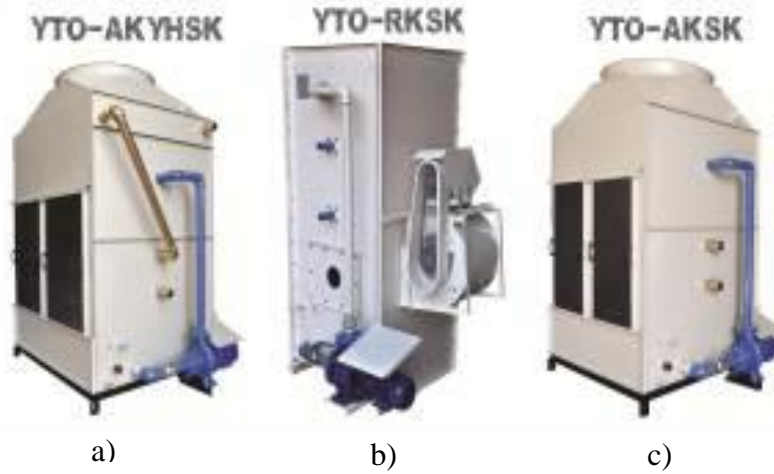
Bu tezin deneysel çalışmasının hedeflediği sonuç kapalı tip soğutma kulesinde dolgu sıra ve boyutlarını değiştirerek kule verimini arttırmak ve yine soğutma kulesinin fan ve pompa frekanslarını değiştirerek hava ve su debisinin artırılması ile kule verimindeki değişime etkisini incelemektir.

3. SOĞUTMA KULELERİNİN TANITIMI

Su soğutma kuleleri içinden geçen hava ile suyun dolaşımının birbirine göre hareketi temel alınarak, havanın sağlandığı fanın biçimine göre ve içerisinde eşanjör olup olmamasına göre sınıflandırılır. Bu tez kapsamında her ne kadar çapraz akışlı kapalı tip aksiyel bir kule kullanılmış olsa da su soğutma kulelerinin çeşitleri anlatılmıştır. Sınıflandırmanın haricinde amaca yönelik hibrid tip su soğutma kuleleri de pratikte mevcuttur. Örneğin adyabatik kulelerde kulenin üst tarafına havalı tip bir eşanjör eklenerek kulenin dışarı attığı nemden faydalanılmıştır. Ancak tezin bu aşamasında yalnızca literatürde tanıtılan kulelere değinilecektir.

3.1. Soğutma Kulelerinin Sınıflandırılması

Su soğutma kuleleri kendi aralarında birçok konuda farklılık gösterebilir. Su ile havanın birbirlerine bağlı hareketi temel alınarak incelenebilir ve hava akımına bağlı olacak şekilde de incelenip gruplanabilir.



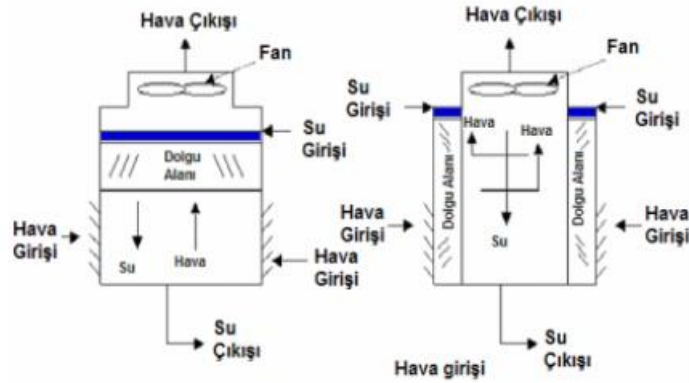
Şekil 3. 1. a) Aksiyel havalı yağ kapalı, b) Radyal kapalı c) Aksiyel kapalı soğutma kuleleri [16]

Su soğutma kulelerinin sınıflandırılmasında kule parçalarının da önemi vardır. Diğer bir sınıflandırma metodu zorlanmış akımlı kulelerde fan ve pompa için şu şekilde söylenebilir. Aksiyel fan kullanan kuleler, radyal fan kullanan kuleler ve eğer devir daim pompası var ise kapalı tip bir su soğutma kulesi olduğundan buna göre

isimlendirilir. Şekil 3.1’de görüldüğü üzere kapalı tip bir su soğutma kulesinin üzerine havalı bir eşanjör konularak evaporatif bir kule elde edilir. Aksiyel fanın öncesine konulan havalı eşanjör kuleden aldığı nem ile yaş termometre sıcaklığına soğutma suyunu daha da yaklaştıracığından kulenin kapasitesini arttırmak için mantıklı bir yoldur. Aynı kule radyal bir biçimde tasarlansaydı bu sefer ona göre isimlendirilecekti. Su soğutma kuleleri akış şemasına göre isimlendirildikleri gibi kendisini oluşturan kule elemanları çerçevesinde de sınıflandırılabilirler.

3.1.1. Su İle Havanın Birbirine Bağlı Hareketine Göre Sınıflandırılması

Su ile havanın birbirine bağlı hareketine göre su soğutma kuleleri ters, çapraz ve paralel akışlı olarak üçe ayrılır. Ters akımlı su soğutma kuleleri genel itibariyle pratikte daha çok tercih edilen kulelerdir. Çapraz akışlı kuleler ise panjurlarının dolgu veya eşanjör bölümüne kadar uzatılması ile kulenin bakımının daha sık yapılma zorunluluğu ve yatırım maliyetlerinin, bakım maliyetlerinin ters akışlı tip su soğutma kulelerinden daha fazla olması sebebiyle daha az tercih edilir. Ters ve çapraz akışlı su soğutma kuleleri şematik olarak Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Ters ve çapraz akışlı soğutma kuleleri [17]

3.1.1.1. Ters Akışlı Su Soğutma Kuleleri

Ters akışlı su soğutma kulelerinde hava aşağıya doğru nozullardan püskürtülen soğutulacak suyun arasından ters yönde yukarıya doğru çıkar. Bu hareket sonucu suyun içerisindeki atık ısı havanın yardımı ile atmosfere atılmaktadır. Bu

hareket su ile havanın birbirine tam olarak ters yönde seyri ile olur. Bunun için kule panjurları aşağıdan ve yönlendiricilerin açısı ile suya ters akımlı olacak şekilde ayarlanması gerekmektedir. Ters akışlı su soğutma kulelerinde kapalı ve açık tip kuleler bulunmaktadır. Kapalı tip kulelerde malzemesi önceden seçilmiş bir eşanjör bulunur bu malzeme kulenin çalışacağı ortama göre seçilir. Bu kulenin fanı radyal veya aksiyel olabilir. Açık kule için de aynı şey geçerlidir. Önemli olan hava ile suyun birbirine göre olan hareketidir. Bu radyal bir fan ile direkt olarak veya aksiyel bir fan ile yönlendiriciler yardımı ile sağlanır. Ters akışlı su soğutma kulesi örneği Şekil 3.3'de görülmektedir. Bu aksiyel kapalı tip bir su soğutma kulesidir.



Şekil 3.3. Ters akışlı bir su soğutma kulesi [16]

3.1.1.2. Çapraz Akışlı Su Soğutma Kuleleri

Çapraz akışlı kulelerde ise hava ve su birbiri içerisinden çapraz olacak şekilde geçerek soğutma işlemi gerçekleşir. Çapraz akışlı kuleler diğerlerine göre daha çok tercih edilir. Bunun sebebi genel itibari ile verimlerinin daha yüksek olmasıdır. Bunun sebebi hava giriş panjurlarının yüzey alanının fazla olması ve temiz havanın kırılmadan dolgulara gitmesi olarak düşünülebilir. Çapraz akışlı su soğutma kuleleri Şekil 3.4'de görülmektedir.



Şekil 3.4. Çapraz akışlı bir su soğutma kulesi [16]

3.1.1.3. Paralel Akışlı Su Soğutma Kuleleri

Paralel akışlı su soğutma kulelerinde ise su ve hava yukarıdan aynı yönde aşağıya doğru gider. Bu yöntemde su sarfiyatı diğerlerine oranla daha çok olduğu gibi homojenliği sağlamakta oldukça zordur. Bu pek tercih edilen bir yöntem değildir.

3.1.2. Hava Akımına Göre Sınıflandırılması

Su soğutma kuleleri hava akımına göre doğal akımlı, rüzgârlı tip ve zorlanmış akımlı su soğutma kuleleri olmak üzere üçe ayrılır. Bu soğutma kuleleri arasında en çok tercih edilen yatırım maliyetinin az olması ve en küçük sektörden en büyük sektöre kadar tüm işletmelere hitap etmesi, tüm koşullarda çalışabilmesi sebebiyle zorlanmış akımlı su soğutma kuleleridir.

3.1.2.1. Doğal Akımlı Su Soğutma Kuleleri

Doğal akımlı su soğutma kulelerinde soğutma suyu havuzun hemen üzerinden yukarı doğru püskürtülürken hava ise yandaki panjurlardan giriş yapabildiği gibi ters akımlı olması istenirse su kuleye yukarıdan da püskürtülebilir. Her iki durumda da hava kule içerisinde kendiliğinden (yoğunluk farkından) yükselir. Bu tip kuleleri diğerlerinden ayıran özellik ise budur. Doğal akımlı su soğutma kuleleri Şekil 3.5’de görünmektedir.



Şekil 3.5. Doğal akımlı su soğutma kuleleri [18]

3.1.2.2. Rüzgârlı Tip Su Soğutma Kuleleri

Rüzgâr hızının 10 Km/h'den fazla olduğu yerlerde tercih edilir. Ancak pratikte pek kullanılan bir kule tipi değildir. Eğimli birbirine paralel ahşap bloklardan süzülen su ile buna çarpan rüzgârın ısıyı atmosfere atması prensibine bağlı çalışır. Bu kulelerin verimli çalışabilmesi için en iyi rüzgâr alan yere konması ve kulenin ebatlarının olabildiğince dar ve boyunun ise yüksek olması gerekmektedir.

3.1.2.3. Zorlanmış Akımlı Su Soğutma Kuleleri

Su soğutma kulesine monte edilecek bir fan yardımı ile kulenin kapasitesi arttırılabilir. Ancak kulenin performansını arttırmak için yapılan bu eklenti ilk yatırım maliyetini ve sonrasında da işletme maliyetini artırır. Ancak doğal akımlı kulelere oranla kule boyutları küçüldüğü gibi performansta ciddi oranda artar. Bu tip kulelerde fan kulenin tepesine aksiyel fan olarak konulduğu gibi kulenin yanına radyal fan olarak da konulabilir. Genel itibarı ile işletme maliyetini düşürmek anlamında fan boyutları arttırılıp motor devri düşürülebilir. Bu tip kuleler genelde ters akımlı kuleler olarak tasarlanır. Bu kuleler dezavantaj olarak bakım maliyeti olan kulelerdir. Fan motoru, fan göbeği alüminyumdan yapıldığı için zamanla kulenin dışarıya attığı nemli hava ile korozyona uğrayacaktır. Bakımı yapılmadığı takdirde belli bir süre içerisinde fanın değişimi gerekmektedir. Ancak farklı malzemedan yapılmış fanlar kullanılarak bunun önüne geçilebilir. Her ne kadar kulenin imal edildiği malzeme de zamanla korozyona uğrayacak olsa da ilk yatırım maliyeti yüksek kulelerde bu malzemeler de işletmeye

göre seçilip uzun dönemli kullanım sağlanabilir. Zorlanmış akımlı su soğutma kuleleri Şekil 3.6’da görünmektedir.



Şekil 3.6. Zorlanmış akımlı su soğutma kulesi [16]

3.1.3. Soğutma Suyu Dolaşımına Göre Sınıflandırılması

Su soğutma kuleleri soğutma suyunun dolaşımına göre açık tip ve kapalı tip su soğutma kuleleri olmak üzere ikiye ayrılır. Açık tip su soğutma kuleleri boyutlarının ve ilk yatırım maliyetlerinin kapalı tip su soğutma kulelerine göre daha az olması sebebiyle tercih edilirken kapalı tip su soğutma kuleleri işletme suyunun temiz kalması için tercih edilir. Açık tip su soğutma kulesi öncesinde kullanılan bir ısı değiştiricisi ile kapalı tip bir su soğutma kulesinin veriminin alınması amaçlanabilir. Ancak bu da ekstra bir maliyet ve pompa için harcanacak enerji demektir. Bu sebepten dolayı kapalı tip su soğutma kulesinin kullanımı açık bir sistem istemeyen işlemlerin tercih etmesi daha muhtemel bir soğutma elemanıdır. Kulenin açık veya kapalı olması bakım maliyetini düşüreceği anlamına gelmez ancak kapalı tip bir su soğutma kulesinde aksayan bakım çok daha büyük bir maliyete sebep olacaktır. Kapalı tip su soğutma kulelerinin kontrol hacimleri aynı kapasitedeki açık tip su soğutma kulelerinden daha fazladır. Maliyetleri de bir hayli yüksektir. Ancak ihtiyaca göre seçilmesi mantıklıdır.

3.1.3.1. Açık Tip Su Soğutma Kuleleri

Açık tip su soğutma kulelerinde spreylili kuleler ve dolgulu kuleler yer almaktadır. Her iki kule tipinin de ortak özelliği işletme suyunun direkt olarak kulede

soğutulması ve işletmeye tekrar geri yollanmasıdır. Açık tip su soğutma kuleleri soğutma suyunu doğrudan dolgulardan geçirerek kule fanı yardımı ile soğuturken kuleye hava panjurlarından girecek herhangi bir toz veya kirlilik faktörünün engelleyemez. İşletmenin bunun için ayrı bir tedbir alması gerekmektedir. Ayrıca su soğutma kulesinden atmosfere atılacak olan ısı ile bir kütle transferinin de düşünülmesi olursak buharlaşan suyun yerine konulması gerekecektir. Bunun için bir şamandıra yardımı ile eksilen su tamamlanır. Enerji tüketimi olarak işletmenin soğutma yükünü karşılaması için kullandığı pompalar hariç yalnızca fan elektrik sarfıyatı mevcuttur. Açık tip su soğutma kulesi örneği Şekil 3.7’de görünmektedir.



Şekil 3.7. Açık Tip Su Soğutma Kulesi [16]

3.1.3.2. Kapalı Tip Su Soğutma Kuleleri

Bu su soğutma kulesini diğerlerinden ayıran özellik içerisinde işletme suyunu kule soğutma suyundan ayıran bir eşanjörün bulunmasıdır. Eşanjörün yüzeyine kule havuzundan püskürtülen su eşanjörün dış yüzeyinde bir su filmi tabakası oluşturur. Bu tabakaya fan yardımı ile çarpan hava yüzey sıcaklığını yaşı termometre sıcaklığına yaklaştırmaya çalışır. Böylelikle eşanjörün içerisinden geçen işletme suyunun ısı yükü atmosfere atılır. Eşanjörün malzemesine kullanılacağı sektöre göre karar verilir. Örneğin deniz suyu veya kuyu suyu gibi yüksek korozyona sebep olabilecek soğutma suyunun kullanılacağı alanlarda kule içi eşanjörü Cu-Ni (bafon) boru gibi malzemelerden yapılırken, şehir suyu ile besleme yapılacak bir kulenin eşanjörü bakır

veya duruma göre demir gibi malzemelerden yapılabilir. Fakat şekil verilebilirlik ve ısı iletiminin iyi olması sebebi ile genellikle kule eşanjörünün boruları bakırdan imal edilir. Bu kule tipinin en iyi özelliklerinden biri işletme suyunun uzun dönem kirlenmemesidir. Kapalı tip su soğutma kuleleri Şekil 3.8’de görünmektedir.



Şekil 3.8. Kapalı tip su soğutma kulesi [16]

3.1.4. Dolgu Tipine Göre Sınıflandırılması

Dolgu tipine göre su soğutma kuleleri PVC Film ve PP Bigudi tipi olmak üzere ikiye ayrılır. Su soğutma kulelerinde dolgunun işlevi suyun kulenin içerisinde yavaşlatılması ve homojen bir dağılımın elde edilmesidir. Dolgu yüzeyine yayılan su kulenin içerisinden geçen hava ile yaş termometre sıcaklığının üst sınırlarına kadar soğutulabilir. Dolgulama kulede soğutma veriminin artırılması için çok önemli bir faktördür.

3.1.4.1. PVC Film Dolgulu Su Soğutma Kuleleri

Bu tip su soğutma kulelerinde suyun kule içerisinde kalma süresini uzatmak ve hava ile temas eden yüzeyini arttırmak için PVC film tipi dolgular kullanılır. Dolgunun yol yapısına göre suyun ve havanın teması farklılık gösterir. Genelde suyun ve havanın içeride kalma süresini uzatmak için Z tipi kanallı film dolgular tercih edilir. PVC film dolgulu su soğutma kuleleri Şekil 3.9’da görünmektedir.



Şekil 3.9. PVC film dolgu

3.1.4.2. PP Bigudi Tipi Dolgulu Su Soğutma Kuleleri

Bu tip su soğutma kulelerinde ise dolgu olarak bigudiler kullanılır. Film tipi dolgular kadar kullanışlı değildir. Ancak üretim esnasında pratik bir metod olması açısından kullanılmaktadır. Bu dolgu tipinde olan kulelerin bakımları oldukça zor olarak yapılmaktadır. Bigudi dolguların kireçten arındırılmak üzere çıkarılıp temizlenmesi veya yenisinin kullanılması bile uzun ve zorlu bir süreçtir. PP bigudi tipi dolgulu su soğutma kuleleri Şekil 3.10'da görünmektedir.



Şekil 3.10. Bigudi tipi dolgu

3.2. Su Soğutma Kulesi Elemanları

Su soğutma kulesi aşağıdaki elemanlardan oluşmaktadır;

- Su dağıtım elemanları
- Fan
- Damla tutucular
- Dolgu malzemesi
- Hava giriş panjurları
- Sirkülasyon pompası
- Taşıyıcı yapı
- Servis penceresi
- Su Yönlendiricileri

3.2.1. Su Dağıtım Elemanları

PVC veya metal borulardan yapılan kule içerisinde damla tutucuya olabileceği en yakın noktada konumlandırılan hemen altında ise dolgulamanın yapıldığı sistemlerdir. Dolguların üzerine soğutma suyunu uniform şekilde dağıtmayı sağlar. Bunu yaparken nozullardan faydalanır.

Su dağıtım sistemi açık tip kulelerde işletme suyunu soğutmak üzere kule içerisine yayma görevi yaparken kapalı tip kulelerde ise işletme suyunun içerisinden geçtiği eşanjörün üzerine su püskürtür. Bunun sebebi eşanjörün dış yüzeyindeki sıcaklığı buharlaşmadan dolayı yaş termometre sıcaklığına yaklaştırabilmektir.

Açık tip kulelerde eğer soğutulacak olan suyun sıcaklığı yüksek ise PVC borular yerine paslanmaz boru veya polipropilen malzemedendir yapılır. Su dağıtım sisteminin en önemli elemanlarından biri nozullardır. Dağıtım sistemindeki suyun dolgular üzerine püskürtülmesi için kullanılır. Su bu sayede dolgulara homojen şekilde dağılır ve suyun miktarı basıncı gibi faktörleri de bu sayede belirlenir. Su dağıtım elemanı Şekil 3.11’de görülmektedir.



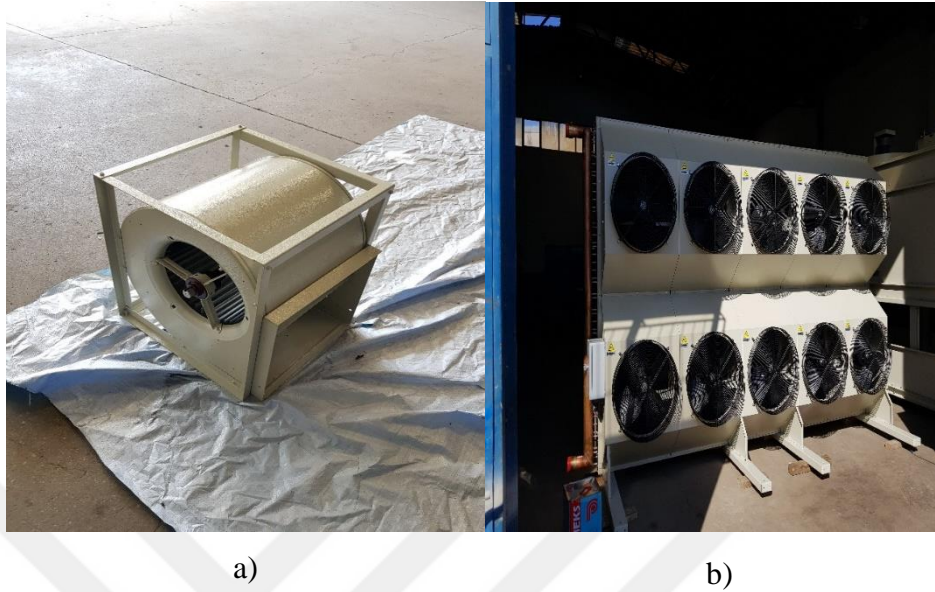
Şekil 3.11. Su dağıtım elemanı [19]

3.2.2. Fan

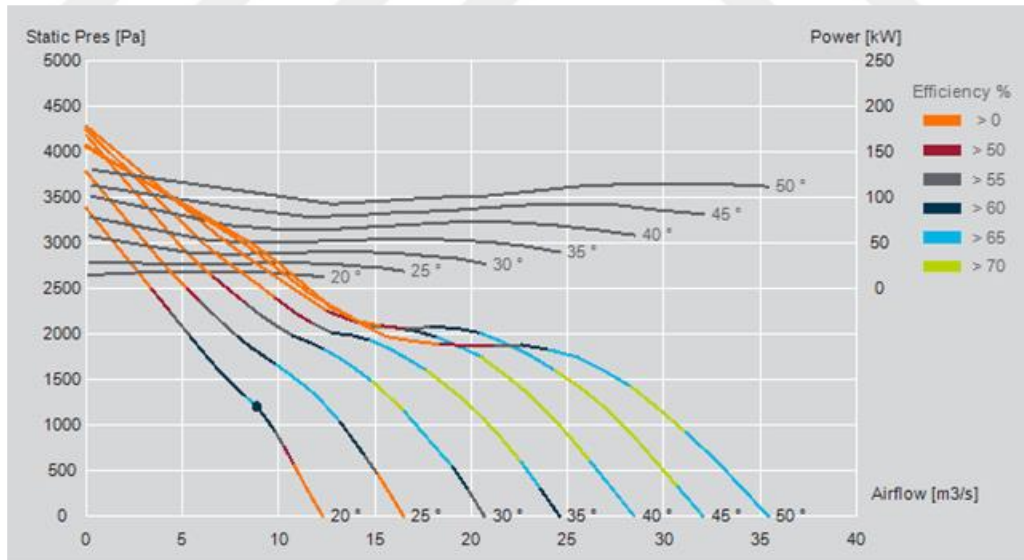
Fan çeşidine göre kulenin en üst noktasında veya yan yüzeyine bağlı şekilde bulunan elemanıdır. Aksiyel fan kulenin en tepesinde radyal fan ise kulenin yan duvarında bulunur. Kendilerine göre avantajları vardır. Kullanıldığı sektöre ve kulenin konulacağı yere göre karar verilir. Fanların asıl görevi kulenin içerisindeki buharlaşmaya bağlı ısı yükünü atmosfere atmaktır.

İstenilen hava debisi aksiyel fanda kanat açısı radyalde ise motor devri ile ayarlanabilir. Ancak aksiyel fanlara konacak bir frekans konvertörü ile (veya bir redüktörde aynı görevi görebilir) hava debisi ayarlanabilir. Aksiyel fan kanatları polipropilen veya polyesterden yapılmaktadır. Ancak önceki dönemlerde metal malzemelerde kullanılmaktaydı. Bu kanatlar alüminyum bir göbeğe oturtularak açı belirlenir ve kuleye monte edilir. Radyal fanlar ise genel olarak galvaniz malzemedir yapılır ve kanat açıları önceden belirlenmiştir. Fan motoru aksiyel fanda radyal fana göre çok daha dikkatli seçilmelidir. Bunun sebebi aksiyel fanın kulenin nemli hava çıkış noktasında bulunacağından kısa zamanda korozyona uğrayabilecek olmasıdır. Genel olarak toza ve neme dayanıklı IP 55-56 F sınıfı izole edilmiş motor kullanılmalıdır. Alınan her önleme rağmen alüminyum motor gövdesi zamanla korozyona uğrayacaktır. Motorda oluşabilecek problemlere yönelik kuleye bir titreşim şalteri konulması en mantıklı seçeneklerdendir. Radyal fanlarda ise motorun suya dayanıklılığına pek gerek

duyulmaz, motora yağmura karşı bir şapka yapılarak uzun bir kullanım ömrü sağlanabilir. Radyal ve aksiyel fan örnekleri Şekil 3.12’de görünmektedir.



Şekil 3.12. a)Radyal ve b)aksiyel fan



Şekil 3.13 Hava Akışı ve Statik Basınç Grafiği [27]

3.2.3. Damla Tutucu

Kulenin su dağıtım boruları ile fan grubunun arasında bulunan ve kuleden ısı yükü atılırken buharla bir su zerreciklerinin de dışarıya çıkmasını engelleyen elemanlardır. Kulenin oturma alanını kaplayacak şekilde hazırlanması su sarfiyatını engeller. Damla tutucular genellikle PVC malzemeden yapılır. Her ne kadar kulenin dolgu malzemesi de buna benzese kalınlık ve sertlik düzeyleri birbirinden farklıdır. Damla tutucuların istenilen ölçüde kesilen yaprakları genelde birbirine bir plastik yapışkanı ile yapıştırılır ve istenilen ebatlara göre kasalanır.

Damla tutucunun çeşitleri:

- Yüksüklü damla tutucular
- V tipi damla tutucular
- C tipi damla tutucular
- Emprenyeli damla tutucular



Şekil 3.14. Damla tutucu

3.2.4. Dolgu Malzemesi

Kulenin içerisindeki suyun ve havanın en büyük yüzey alanında ve en uzun zamanda karşılaşmasını sağlamak için konurlar. Kullanılacağı sektör ve istenilen kullanım koşullarına göre seçilmelidir. Örneğin bakımları düzenli olarak yapılacak bir kulede PVC yaprak tipi dolgu kullanımı daha işlevsel iken bakımlarının yapılması zor

olan kulelerde bigudi kullanılabilir. Bunun sebebi bigudi dolgunun sökümünün daha rahat olması ve temizleme işlemi yerine atılarak yenisinin alınmasıdır. Seçimleri esnasında dikkat edilecek bir diğer husus ise kulenin dolgusunun kullanım koşullarına uygunluğu olmalıdır. Örneğin termal koşulları ele alırsak 80 derece su dolaşan bir kulede normal ince yaprak dolgu kullanımı riskli olacaktır. Hele ki kulemiz sıcak bir çöl ikliminin olduğu yerde çalışacak ise güneşin etkisi ile bir dolguların erimesi kaçınılmaz olacaktır. Bu nedenle kulemiz çalışmayacak ve dolgular hava ile suyun geçiş yollarını kapatıp verimsiz hale gelecektir. Genel olarak seçimini yapabileceğimiz 2 çeşit dolgumuz mevcuttur. Ancak öncelerde ahşap ve metal olanları da kullanılmıştır. Kullanılan dolgu çeşitlerini genel olarak 2 ye ayırabiliriz:

- Bigudi dolgu
- PVC yaprak tipi dolgu



Şekil 3.15. Film tipi ve bigudi dolgu

Dolgunun üzerine gelecek olan su ve havanın su buharını dışarıya atmak için üniform olarak dağılması gerekmektedir. Optimum ıslak yüzey tasarlanıp monte edilen dolgulardan maksimum verim alınabilir.

3.2.5. Hava Giriş Panjurları

Nemi düşük havanın soğutma kulesine giriş yapması için kulenin havuz kısmı ile dolguları arasında bulunan bölümdür. Panjur yüzey alanı gerekli olan hava debisine göre belirlenir. Metal malzeme veya PVC malzemedan yapılabilir. Hava girişi esnasında yabancı maddelerin kule içerisine girişini engellemesinin yanında kule

suyunun da dışarı çıkmasını engeller. Güneş ışınlarının kule içerisine girmesi yosun oluşumuna neden olur, panjurlar bununda önüne geçer.

Kule görünümünün de bozulmaması amacı ile kulenin dört tarafına yapılır. Kule bakımı açısından kolay sökülüp takılabilmesi çok önemlidir. Panjurlar minimum hava direnci olacak şekilde monte edilmelidir. Havayı emişteki zorluk motorun fazla amper çekmesine sebep olur. Bu ise motor kapasitesinin artmasını gerektirir böyle bir durumda enerji sarfıyatı gereksiz gürültü kirliliği gibi sorunlarla karşılaşılır. Soğutma kulelerinin hava giriş panjurları Şekil3.16’da görülmektedir.



Şekil 3.16. Soğutma kulesi panjurları

3.2.6. Sirkülasyon Pompası

Kapalı tip su soğutma kulelerinde bulunur. Kulenin eşanjör kısmının üzerine havuz taban suyunu serpererek fan yardımı ile eşanjörün dış yüzey sıcaklığını yaşı termometre sıcaklığına yaklaştırır. İstenilen soğutma kapasitesine göre eşanjör boyutu belirlenir ve buna oranla pompa debisi hesaplanır. Sirkülasyon pompası soğutma kulesinin havuz kısmından aldığı suyu fiskiyeler yardımı ile homojen bir şekilde yayarak eşanjörün üzerine püskürtür. Bu esnada dolgular püskürtülen suyu olabildiğince yavaşlatarak soğutmanın yapıldığı eşanjör bölümünde veya açık kulelerde soğutmanın yapıldığı dolgu kısmında kalabildiği en uzun süre boyunca kalmasını sağlar. Pompanın kule kapasitesine göre seçilmesi enerji sarfıyatının ve su miktarının en aza indirilmesi için önemli bir faktördür.



Şekil 3.17. Kapalı tip bir kulede sirkülasyon pompası

3.2.7. Taşıyıcı Yapı

Kulenin elemanlarını bir arada tutmaya yarayan galvaniz krom veya polyester gibi malzemelerden üretilen yapıdır. Kulenin sadece dış kısmını oluşturmaz. İçerideki atkılar ve omegalarda bu sisteme dahildir. Dolguların eşanjörün doğru şekilde konumlanmasını sağlar. Yanlış biçimde yapılmış bir taşıyıcı yapı kulenin üretim maliyetini arttırdığı gibi kulenin ağırlığını da olumsuz yönde etkiler. Taşıyıcı yapı kullanım alanına göre malzeme olarak farklılık gösterir. Normal bir işletmenin uzun dönem yatırımı olarak düşünülmemen kuleleri veya yatırım maliyetini düşük tutmak amacı ile boyalı galvaniz sacdan yapılır. Bu kuleler paslanmazlık olarak yedi sene civarı bir ömüre sahiptir. Ancak uzun süre paslanması istenmeyen koşullarda taşıyıcı yapı krom malzemedan yapılır.



Şekil 3.18. Soğutma kulesinde taşıyıcı yapı

3.2.8. Servis Penceresi

Kulenin yan duvarında bulunan ve bakım esnasında kuleye girişi sağlayan elemandır. Pencere rahatlıkla açılıp kapatılabilir olmalıdır ve paslanmaz ve sızdırmaz olarak üretilmelidir. Herhangi bir arıza esnasında personelin girebileceği boyutlarda olmalıdır.



Şekil 3.19. Soğutma kulesinde servis penceresi

3.2.9. Su Yönlendiricileri

Kule içerisinde hava giriş panjurlarının üzerinde, dolguların ise altında bulunur. Amacı kule duvarlarından süzülen suyun dışarı çıkmasını engellemek ve kuleye panjurlardan giren havayı tam dolgu içerisinden geçecek şekilde göndermektir. Yönlendirici panjurların yapımı kulenin malzemesine göre değişim gösterir genel olarak galvaniz kulede galvaniz sacdan abgant bükümü ile z formu verilmiş bir sac kullanılır.



Şekil 3.20. Soğutma kulesinde su yönlendiriciler

3.3. Su Soğutma Kulesi Bakımı

Belirli süre (genelde 6 ay) çalışan bir kule sudaki kireç ve emiş panjurlarından giren kirli hava nedeniyle bakıma ihtiyaç duyar. Bu bakım kule performansının düşmemesi için çok önemlidir. Kapalı tip kulelerde eşanjörün üzerini kaplayan kireç tabakası verimi büyük ölçüde düşürür. Açık kulelerde ise suyun soğuması için gereken yüzey alanı kireçle kaplanacağından verim düşer. Her iki kule tipinde de emiş alanı tıkanarak kule iş yapamaz hale gelir. Kule temizlik işleminde uygulanacak adımlar şunlardır;

- Soğutma kulesi varsa eşanjör dahil olmak üzere havuz suyu boşaltılır.
- Kuledeki dolgu, damla tutucu, panjur gibi ekipmanlar sökülerek kireç ve kışır tabakalarından arındırılır. Bu işlem kireç sökücü bir asit yardımıyla yapılabilir.
- Kule eşanjörlü ise eşanjörün üzerindeki kireç tabakası kaynak noktalarına dikkat edilecek şekilde temizlenir. Bu sırada bakır borunun yıpranması da göz önüne alınmalıdır.
- Eşanjör veya kule su hattı için 4-5 saat kadar asidik su çevrilerek temizlenir.
- pH nötralizasyonu sağlanan kule taze su ile doldurulur.



Şekil 3.21. Bakım öncesi soğutma kuleleri

4. TERS AKIŞLI BİR SU SOĞUTMA KULESİNİN İNCELENMESİ

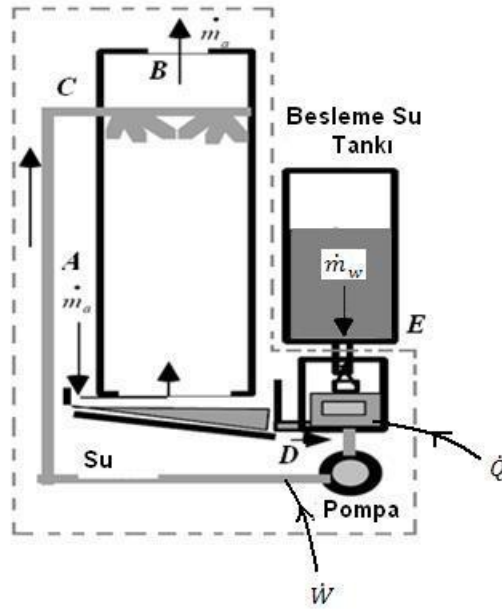
Su soğutma kulesi, belirli bir amaç ile işletmede ısınıp kuleye gelen suyun kuledeki fiskiyeler yardımı ile dolguların üzerine püskürtülmesiyle ve fanların buradaki artık ısıyı atmosfere yollamasıyla çalışır. Dalguların yüzeyinden süzülen su fanların yardımı ile buharlaşır ve ısı çekerek soğutma işlemi yapılır. Kulelerde yaş termometre sıcaklığına yakın değerlere kadar soğutma yapılabilir. Bu soğutma esnasında bir kısım su buharlaşacağı için kuleden su eksilir. Bu kayıp temiz su girişi ile geri kazandırılmalıdır.

Kapalı tip soğutma kulelerinde besleme hattı çok büyük önem taşımaktadır. Kapalı tip soğutma kulelerinde havuz suyu tamamen buharlaşırsa kule gerekli olan soğutma işlemi yapamaz kulenin kendi pompası yanabilir. Böyle bir durumda fan tek başına kapalı tip kuledeki soğutmayı sağlayamaz, çünkü eşanjörün üzerinde bir buharlaşma olmayacağından bakır borunun dış yüzey sıcaklığı yaş termometre sıcaklığına yaklaşamaz. Yaş termometre sıcaklığı böyle bir ortamda inilebilecek minimum sıcaklık noktasıdır. Haliyle kule su olmadan verimsiz olacak ve ısı transferi sadece hava yordamıyla az bir miktar gerçekleşecektir.

4.1. Termodinamik Analiz

Su soğutma kulelerinin termodinamik analizi kule içerisindeki soğutma hacminden geçen nemli havanın hareketi esas alınarak yapılır. Nemli havanın özelliklerinden faydalanmak için ise psikrometrik diyagrama bakılması gerekir. Bu analiz esnasında kullanılacak temel kavramlar aşağıda verilmiştir. Temel kavramlardan sonra bir örnek ile durum daha netleştirilmiştir.

Termodinamik analiz yapılırken termodinamiğin 1. yasasından yararlanılarak hesaplamalar yapılır. Termodinamiğin 1. yasası enerjinin ve kütlelerin hiçbir zaman kaybolmadığı yalnızca form değiştirdiğini ayrıca yoktan da var edilemeyeceğini söyler. Hesaplamalar yapılırken şekilde görüldüğü gibi belirli bir kontrol hacmi seçilir ve kütle enerji dengesi hesap edilir.



Şekil 4.1. Soğutma kulesinin kontrol hacmi [20]

Su soğutma kulesinde ısı transferi kule içerisinde gerçekleşir. Transferin bir kısmı suya bir kısmı atmosfere verilir. Su soğutma kulelerinde belirlenen kontrol hacminde iş (W) pompa tarafından yapılır. Atmosferden fanların zorlaması ile kuleye giren hava A noktasından girer (Şekil 4.1). E noktasında ise kule besleme suyu yer almaktadır. Besleme suyunun amacı buharlaşma ile kayıp olan suyun kuleye geri kazandırılmasıdır.

Normal şartlar altında kütle korunumu yasasını uygularsak kuleye giren hava ve su buharı kütleli debisi çıkıştaki hava ve su buharı debisine eşit olmalıdır.

Kütle Dengesi:

$$(\dot{m}_a)_A = (\dot{m}_a)_B = (\dot{m}_a) \quad (4.1)$$

Ayrıca,

$$(\dot{m}_v)_B = (\dot{m}_v)_A = (\dot{m}_w)_E \quad (4.2)$$

(a , v , w sırasıyla hava, buhar ve suyu ifade etmektedir.)

Kule içerisinde geçen kuru havanın (\dot{m}_a) kütleli debisi kule içerisinde sabit iken nemli havanın kütleli debisi buharlaşma arttıkça artmaktadır. Buharın hava

içerisindeki oranı (ω) psikrometrik diyagramdan giriş ve çıkış sıcaklıklarına göre bulunabilir.

$$\omega_B - \omega_A = \frac{m\dot{W}_E}{\dot{m}_a} \quad (4.3)$$

Diğer bir hesapla termodinamiğin 1. Yasası esas alınarak suyun ortama verdiği ısı ortam havasına aktarılmalıdır.

Enerji Dengesi:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{H}_{\text{Çıkış}} - \dot{H}_{\text{Giriş}} \quad (4.4)$$

$$\dot{Q} - \dot{W} = \dot{m}_a(h_B - h_A) - \dot{m}_w h_{w,E} \quad (4.5)$$

$\dot{m}_w h_{w,E}$ terimi diğerleri ile karşılaştırıldığında çok küçük bir değer olduğu için genellikle ihmal edilir.

Özgül hacim değerleri psikrometrik diyagramda belirli basınç altında 1 kg kuru hava için geçerlidir. Toplam kütle hesaplanmak istendiğinde 1 kg kuru havanın yanı sıra içerdiği miktarda su buharı ile toplanarak istenilen sonuca ulaşılır. x miktarda su buharı içeren bir hava kütlelerinin miktarı buradan $1+x$ kg şeklinde hesaplanır. Özgül hacmine bakılacak olursa $\frac{\omega_a}{1+x}$ formülü kullanılır. Kontrol hacminden çıkan havanın kütledebisi ise;

$$\dot{m} = 0.0137 * \sqrt{\frac{\Delta P_f}{\omega_B}} \quad (4.6)$$

olarak hesaplanır (ω_B gerçek özgül hacimdir).

Su buharının ve kuru havanın kütledebisi aşağıdaki formül kullanılarak bulunur;

$$\dot{m}_a = (1 + X) * 0.0137 * \sqrt{\frac{\Delta P_f(1+x_B)}{v_B}} \quad (4.7)$$

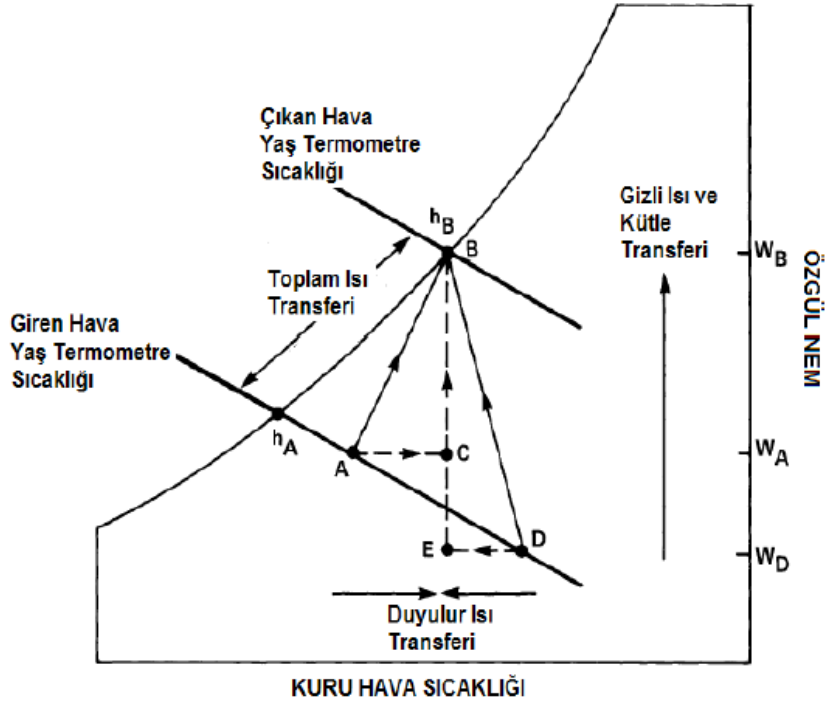
Bir manometre ile basınç farkı ölçülürse havanın kütledebisi aşağıdaki formül kullanılarak bulunabilir;

$$\dot{m}_a = 0.0137 * \sqrt{\frac{\Delta P_f}{\omega_{aB}(1+\omega_B)}} \quad (4.8)$$

Havanın atmosfere göre basınç farkı $\Delta P'$ kuleden çıkan hava kütesinin özgül hacmi ise ω_{AB} 'dir.

4.2. Psikrometrik Analiz

Bir su soğutma kulesinde soğutma kulesinin verimini belirleyen birçok faktör vardır. Doğal faktörler içerisinde kulenin verimini en büyük ölçüde etkileyen yaş termometre sıcaklığıdır. Yaş termometre sıcaklığı ne kadar düşük olursa soğutma kulesi o kadar verimli çalışır. Bunun yanı sıra kuru termometre sıcaklığı ve bağıl nem kulenin verimini yaş termometre sıcaklığından bağımsız etkileyecek kadar önemli değildir. Bir diğer taraftan kuru termometre sıcaklığı ve bağıl nem kuleden buharlaşan su miktarı üzerinde önemli etkiye sahiptir. Yapılacak psikrometrik analizde bu gösterilebilir.

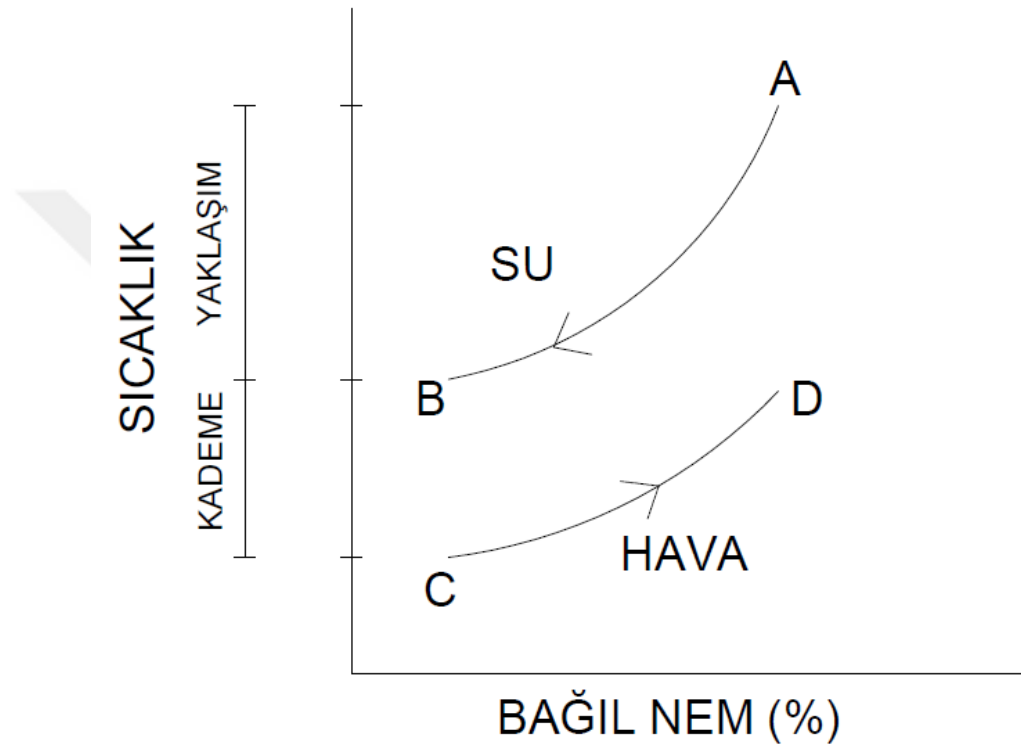


Şekil 4.2. Havanın ısınmasının psikrometrik diyagramda gösterimi [20]

Psikrometrik diyagramda gösterilen AB vektörü havanın ısınmasını, AC geçişi hava tarafından emilen ısının hissedilir kısmı, CB geçişi ise ısının gizli kısmını

göstermektedir. Su ısı yükünü havaya verdiğinde EB gizli ısıyı, DE ise hissedilir havadaki sıcaklık değişimini gösterir.

Hissedilir ısıyla gizli ısının oranı kullanılan suyun miktarını belirlemekte önemli rol oynar. Buharlaşma yalnızca gizli ısının transferi esnasında gerçekleşir. Bu miktar özgül nemdeki değişiklikle orantılıdır. Şekilde görülen AB noktaları arasındaki ($W_B - W_A$) buharlaşma oranı, DB ($W_B - W_D$) durumundan azdır.

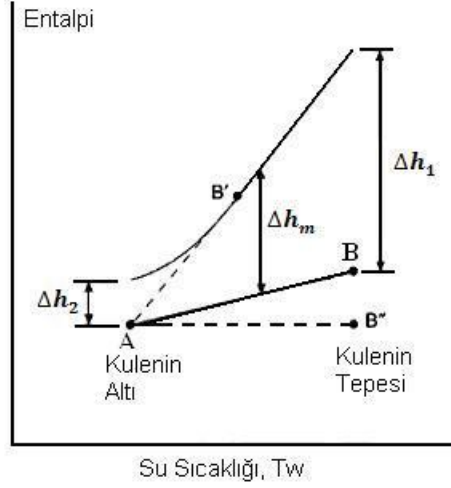


Şekil 4.3. Su ve havanın karşı akışlı soğutma kulesinde sıcaklıkla ilişkisi

D noktasındaki koşullarda kuleye giren dış hava, sudan nem ve ısı alarak doymuş halde kuleden çıkmıştır. Sudan atmosfere olan ısı miktarı A ve B noktaları arasındaki entalpi farkına ($h_b - h_a$) eşittir. Entalpi çizgileri yaş termometre sıcaklığı ile yakın olduğundan entalpideki değişim yaş termometredeki değişimle de ifade edilebilir.

4.3. Entalpi Farkı Metodu

Su soğutma kulesinin içerisinde meydana gelen buharlaşma ile bir kuleye giren havanın belirli miktarda nemi vardır. Kuleden çıkan havanın nemini bilmek tam olarak mümkün değildir. Bu nedenle verimi hesaplamak için entalpi farkı metodu daha uygun bir yöntem olur. Şekil 4.4’de kuleden geçen havanın entalpi farkı grafiği gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Ortalama Entalpi Farkı Grafiği [20]

Soğutma kulesinin çalışma esnasında atmosfere attığı enerjinin atılan nemli hava içerisinde atmosfer havasına göre oluşturduğu bir entalpi farkı bulunmaktadır. Atmosfer havasının ve kuleden çıkan havanın entalpileri aşağıdaki gibidir;

$$\Delta h_1 = h_{a,wi} - h_{a,o} \quad (4.9)$$

$$\Delta h_2 = h_{a,wo} - h_{a,i} \quad (4.10)$$

$h_{a,i}$ giren havanın entalpisi, $h_{a,o}$ çıkan havanın entalpisi, $h_{a,wi}$ giriş suyunun sıcaklığındaki havanın entalpisi ve $h_{a,wo}$ çıkış suyunun sıcaklığındaki havanın entalpisi. Ortalama entalpi farkı Δh_m , Δh_1 ve Δh_2 entalpilerini kullanarak aşağıdaki şekilde hesaplanır;

$$\Delta h_m = \frac{\Delta h_1 - \Delta h_2}{\ln \frac{\Delta h_1}{\Delta h_2}} \quad (4.11)$$

Aşağıdaki denklem ise havanın entalpi farkını bulmak için kullanılır.

$$\Delta h_a = \Delta h_{a,o} - \Delta h_{a,i} \quad (4.12)$$

Su soğutma kulesinin etkinlik katsayısı kule seçiminde çok önemli bir faktördür. Soğutma kulesinin etkinliği aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}}{\dot{Q}_{max}} \quad (4.13)$$

Atmosfere atılan ısı miktarı aşağıdaki formül ile hesaplanır;

$$\dot{Q} = \dot{m}_a (h_{a,0} - h_{a,i}) \quad (4.14)$$

Şayet ki teorik hesaplamalar ile havanın sıcaklığının kule giriş suyu sıcaklığına eşit alınarak kuleden çıktığı düşünülür ise teorik olarak maksimum ısı transferinin gerçekleştiği kabul edilir. Bu hesaplama ile \dot{Q}_{max} Aşağıdaki denklem ile bulunur;

$$\dot{Q} = \dot{m}_a (h_{a,w,i} - h_{a,i}) \quad (4.15)$$

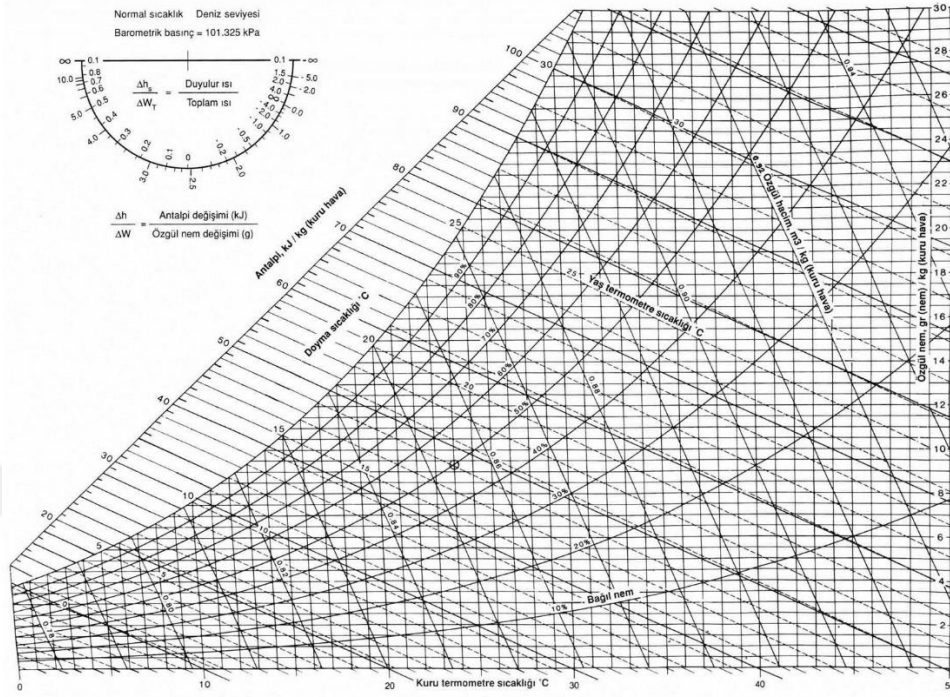
Bulunan denklemler kullanılarak aşağıdaki verim formülü elde edilir;

$$\varepsilon = \frac{h_{a,0} - h_{a,i}}{h_{a,w,i} - h_{a,i}} \quad (4.16)$$

4.4. Psikrometrik Temel Kavramlar

Kule verimini hesaplamada kuleye giren havanın ve kuleden çıkan havanın özellikleri verimi bulmak için en büyük ölçüde etken faktördür. Bu değerler bilinmeden

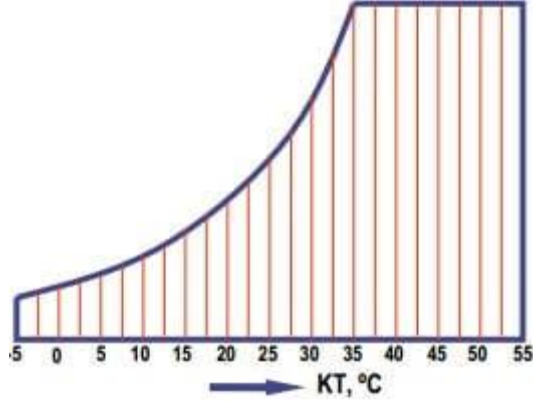
verim hesaplanamaz. Havanın özelliklerini bulmak için aşağıda gösterilmiş olan psikrometrik diyagramdan faydalanılır.



Şekil 4.5. Psikrometrik diyagram [21]

4.4.1. Kuru Termometre Sıcaklığı

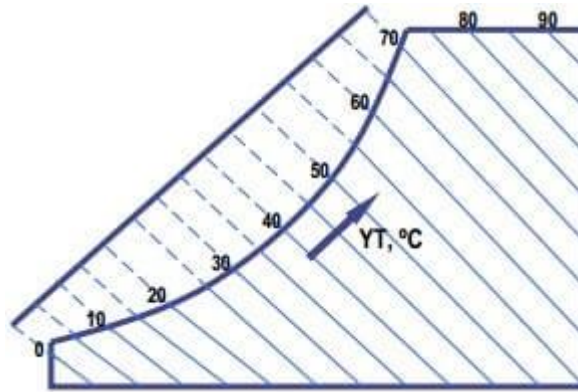
Kuru termometre sıcaklığı nemsiz havanın herhangi bir termo eleman, termometre, termokupl gibi bir sıcaklık ölçme aleti ile yapılan ölçmede elde edilen sıcaklığıdır. Bu sıcaklığın su soğutma kulesinde verime doğrudan etkisi olmaz. Daha çok kuleden buharlaşan su miktarı ile ilişkisi vardır.



Şekil 4.6. Kuru termometre sıcaklığının psikrometrik diyagramda kullanımı [22]

4.4.2. Yaş termometre sıcaklığı

Yaş termometre sıcaklığı termometrenin ucuna ıslatılmış bir pamuk parçası sararak yapılan ölçüm sonucuna denir. Kuru termometre sıcaklığından suyun buharlaşması esnasında çektiği ısı dolayısıyla daha düşüktür. Yaş termometre sıcaklığı kulenin verimi için doğrudan etkili bir faktördür. Kulenin soğuttuğu su hiçbir zaman için yaş termometre sıcaklığının altına inemez. Soğutulan su yaş termometre sıcaklığına ne kadar yaklaştırıla bilinir ise kulenin verimi o oranda yüksek olur.



Şekil 4.7. Yaş termometre sıcaklığının psikrometrik diyagramdaki gösterimi [23]

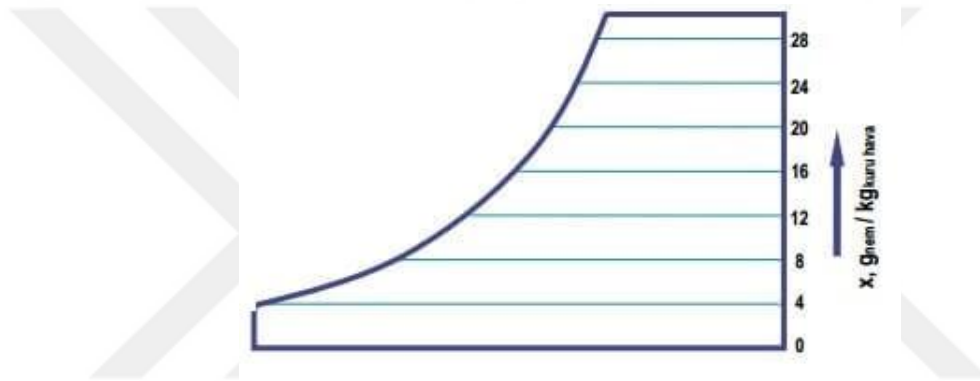
4.4.3. Çiy Noktası Sıcaklığı

Nemli havanın içerisindeki su buharının sabit basınçta soğutulduğunda yoğuşmaya başladığı sıcaklıktır. Çiy noktası sıcaklığının bulunması için psikrometrik

diyagramdan yararlanılır. Bu sıcaklık ne kadar fazla olursa havanın içerisinde aldığı nem oranı o derece fazla olur. Bu miktar kuleden atmosfere atılan entalpi miktarında dolaylı yoldan etkileyici faktördür.

4.4.4. Özgül Nem

Birim hacimdeki havanın (m^3) içerdiği su buharının gram olarak ifade edilmesine denir. Belirli sıcaklık değerleri için özgül nem değışiklik gösterir. Diğer faktörlerde göz önünde bulundurularak bu değerler psikrometrik diyagramda bulunabilir.

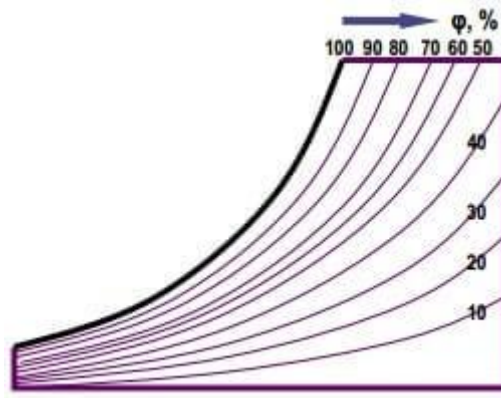


Şekil 4.8. Özgül nemin psikrometrik diyagramdaki gösterimi [22]

4.4.5. Bağlı Nem

Belirli bir sıcaklıktaki havanın taşıdığı nem miktarının taşıyabileceği maksimum nem miktarına olan oranıdır. Bağlı nem diğer bir ifade ile; hava içerisindeki su buharının kısmi basıncı / o sıcaklıktaki su buharının doyma basıncı olarak ifade edilir.

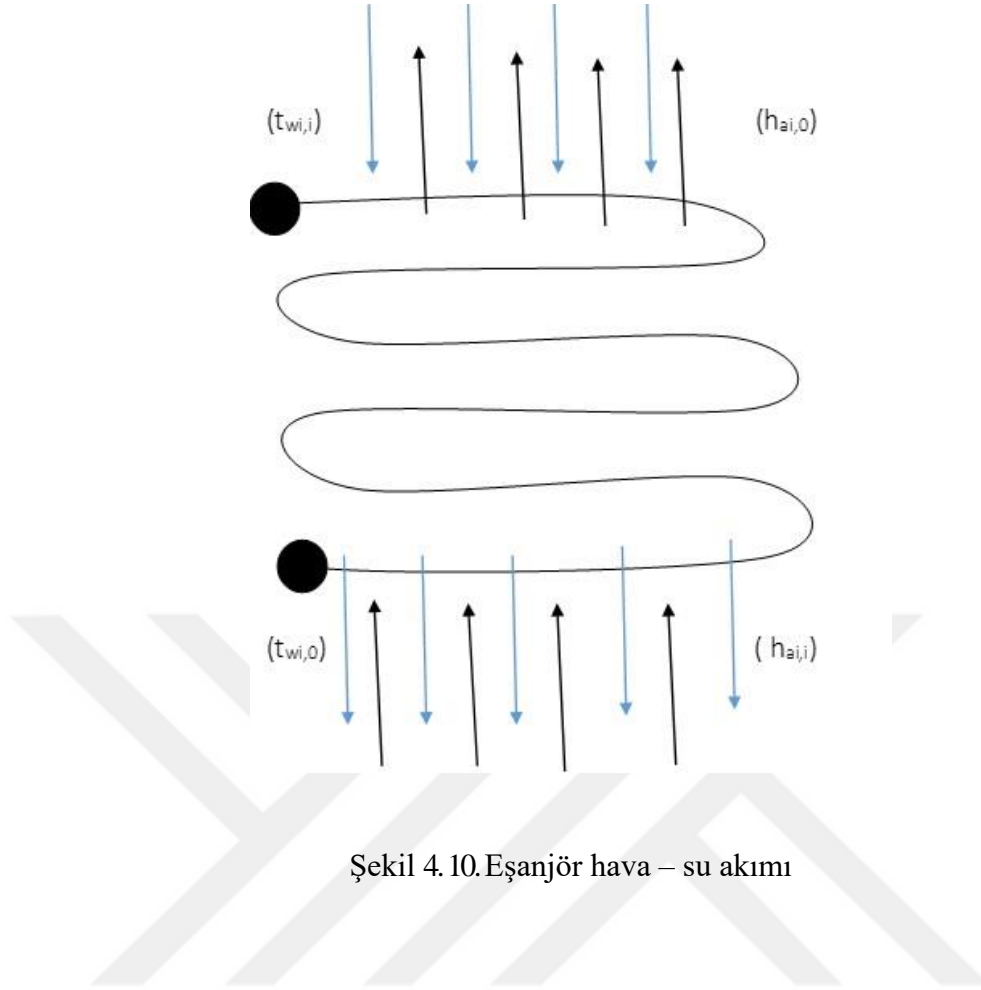
Kuru hava içerisinde bağlı nem sıfırdır, doymuş hava içerisindeki bağlı nem ise 1'dir. Belirli sıcaklıktaki ölçümü yapılan havanın bağlı neminin bu aralıkta olması gerekir. Havanın bağlı nemi higrometre ile ölçülür.



Şekil 4.9. Bağlı nemin psikrometrik diyagramdaki gösterimi [22]

4.5. Kapalı Tip Bir Soğutma Kulesinde Isı Eşanjörü İçin Isı Transfer Hesabı

Çalışmanın bu kısmında kapalı tip bir su soğutma kulesinin eşanjörünün ısı transferi ile atmosfere attığı ısı hesaplanarak eşanjörün ısı transferi incelenecek ve giriş sıcaklığına, boru boyuna, borunun ısı iletim katsayısına ve soğutulan suyun ısı taşınım katsayısına göre çıkış sıcaklığına olan etkisi formülize edilecektir. Kulenin çalışma prensibi gereği dolgularda yavaşlatılan su buharlaşma miktarına bağlı olarak atmosfere atılan gizli ısı ile soğutulur. Eşanjörün üzerine gelen soğutma suyunun bu ısı ve kütle transferi ile inebileceği en düşük sıcaklık ortamın yaş termometre sıcaklığıdır. Pratik olarak bu sıcaklığa inmek mümkün olmasa da yapılacak teorik hesaplamalarda bu sıcaklığı yaş termometre sıcaklığına eşit kabul edilecektir. Böyle bir kabul yapıldığında kulenin eşanjör borusunun üzerine gelen soğutma suyu sıcaklığı yaş termometre sıcaklığına eşit olacağından ısı transferi hesaplamalarında borunun dış yüzeyi yaş termometre sıcaklığında alınır. Boru içerisinde ısı taşınım yolu ile ilerlerken boruda iletim yolu ile bu ilerleme devam eder. En son varacağı borunun dış yüzey noktasında ise yaş termometre sıcaklığındaki ince su filmi tabakası mevcuttur. Bu tabakanın soğutma kulesinin çalışmasına bağlı olarak sürekli yaş termometre sıcaklığında kalacağı kabul edilecektir. Şekil 4.10'da bakır borunun etrafından sıcak ve soğuk su akışının şekil ile ifade edilmiş hali görülmektedir. Şekilde gösterildiği gibi yukarıdan aşağıya doğru su ve aşağıdan yukarı doğru hava akışı mevcuttur. Şekilde ifade edilen terimler aşağıda açıklanmıştır.

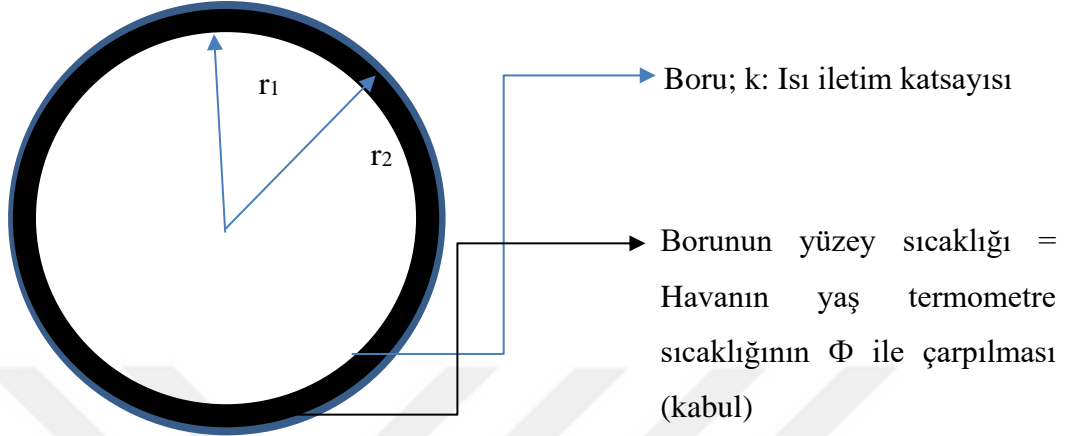


Şekil 4.10. Eşanjör hava – su akımı

G = kuru havanın debisi
 t_a = havanın giriş sıcaklığı
 t_{wi} = suyun giriş sıcaklığı
 $h_{ai,i}$ = havanın giriş entalpisi

Şekil 4.11’de su soğutma kulesinin içerisindeki bakır borunun kesit alanı çizimi gösterilmektedir. Kule içerisindeki bakır borulu eşanjörün yüzeyinde hep bir miktar ince su filmi bulunmaktadır bu kule içerisindeki püskürtme işlemi ile sağlanmaktadır.

Isı transferi hesabını yapmak için borunun dış yüzey sıcaklığına ihtiyaç duyarız ki eğer boru yüzeyinde hep bir su filmi mevcutsa bu sıcaklık havanın yaş termometre sıcaklığı değeri alınabilir.



Şekil 4. 11. Boru kesiti

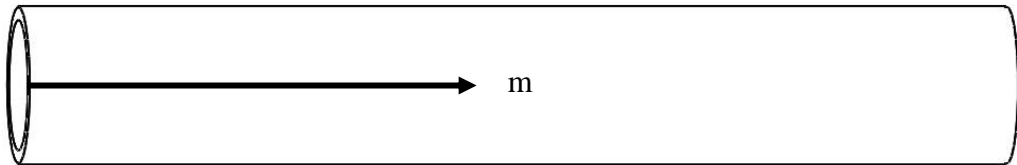
h_1 (iç yüzey taşınım katsayısı)

m = boru içerisindeki su debisi

r_1 = Kule eşanjör borusunun iç çapı

r_2 = Kule eşanjör borusunun dış çapı

Şekil 4.12.'de kulenin bakır eşanjörünün düz boru haline gelmiş biçimi gösterilmektedir. Soğutulacak suyun girişi m debisiyle şekil üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 4. 12. Borunun hayali açılmış hali

Borumuzu açık halde düşünüp diferansiyel bir parçacık alırsak hesaplarımızı yaptıktan sonra parçadan bütüne giderek belirli bir integrasyon oranında gerçek değerimize yaklaşıyoruz. Tekrar ne denli çok olursa sonuç o derece doğru çıkacaktır.

Aşağıdaki denklemler (denklem 4.17- 4.20 arası) boru içerisinden geçen suyun soğuması ile dış ortama transfer edilen ısı miktarını diferansiyel bir parçacık için hesaplamakta kullanılır.

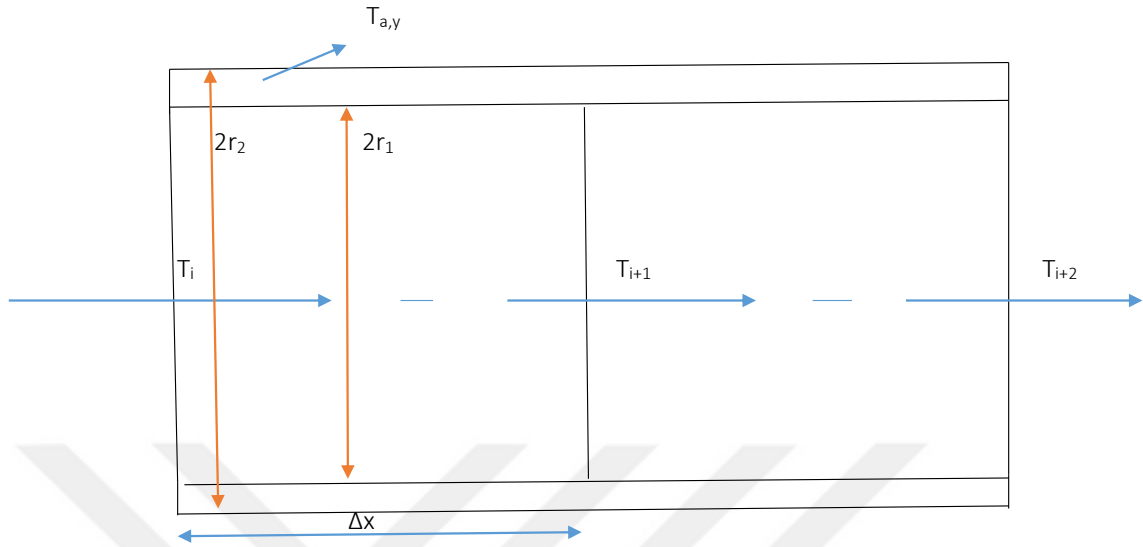
$$dQ_T = (2\pi r_1) * \Delta x h_1 (T_{i,m} - T_{y,1}) = 2\pi r_1 \Delta x * h_1 (T_{i,m} - T_{y,1}) \quad (4.17)$$

$$dQ_i = \frac{(2\pi k) * \Delta x (T_{y,1} - T_{y,2})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (4.18)$$

$$dQ_{\text{Toplam}} = \frac{(T_{i,m} - T_{y,2})}{\left(\frac{1}{2\pi r_1 \Delta x h_1}\right) + \left(\frac{1}{2\pi k \Delta x} * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)\right)} \quad (4.19)$$

$$dQ = \frac{2\pi \Delta x * (T_{i,m} - T_{y,2})}{\left(\frac{1}{h_1 r_1}\right) + \left(\frac{1}{k}\right) * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (4.20)$$

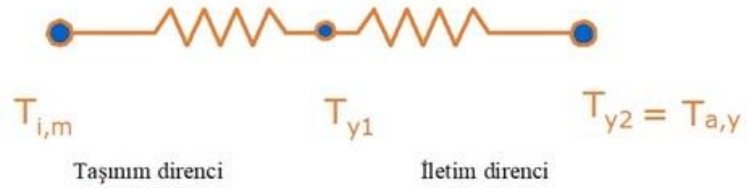
Şekil 4.13'te bakır borudan alınan diferansiyel parçacığın ısı geçişlerinin gösterildiği çizim verilmektedir.



Şekil 4.13. Diferansiyel parçacıklar arası geçiş

$$T_{i,m} = \frac{(T_i + T_{i+1})}{2} \quad (4.21)$$

Şekil 4.14'te ise bakır boru içerisindeki suyun taşınımı ve bakır borudaki ısı iletimi direnç metodu kullanılarak gösterilmiştir.



Şekil 4.14. Isı transferi direnç metodu

$$\text{Taşınım direnci} = \frac{1}{(2\pi r_1 \Delta x h_1)} \quad (4.22)$$

$$\text{İletim direnci} = \frac{1}{(2\pi k \Delta x) * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (4.23)$$

$$dq = \frac{\text{sıcaklık farkı}}{\text{direnç}} \quad (4.24)$$

$$dq = \frac{(T_{i,m} - T_{y,l})}{\left(\frac{1}{2\pi r_1 \Delta x h_1}\right)} \quad (4.25)$$

$$= \frac{(T_{y,l} - T_{a,y})}{\left(\frac{1}{2\pi k \Delta x}\right) * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (4.26)$$

$$dq = \frac{(T_{i,m} - T_{a,y})}{\left(\frac{1}{2\pi r_1 \Delta x h_1}\right) + \left(\frac{1}{2\pi k \Delta x}\right) * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (4.27)$$

$$dq = \frac{2\pi \Delta x * (T_{i,m} - T_{a,2})}{\left(\frac{1}{h_1 r_1}\right) + \left(\frac{1}{k}\right) * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (4.28)$$

m = su debisi

$$dq = m c_p * (T_i - T_{i+1}) \quad (4.29)$$

$$dq = \frac{2\pi \Delta x * (T_{i,m} - T_{a,y})}{\left(\frac{1}{h_1 r_1}\right) + \left(\frac{1}{k}\right) * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (4.30)$$

$$\bar{U} = \frac{2\pi \Delta x}{\left(\frac{1}{h_1 r_1}\right) + \left(\frac{1}{k}\right) * \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \quad (4.31)$$

ise “ \bar{U} ” yu “dq” içine yerleştirirsek;

$$dq = \bar{U} (T_{i,m} - T_{a,y}) \quad (4.32)$$

olur. “dq” ları birbirine eşitlersek;

$$dq = mc_p (T_i - T_{i+1}) = \dot{U} (T_{i,m} - T_{a,y}) \quad (4.33)$$

$$mc_p (T_i - T_{i+1}) = \dot{U} \left[\frac{(T_i + T_{i+1})}{2} - T_{a,y} \right] \quad (4.34)$$

$$2mc_p (T_i - T_{i+1}) = \dot{U} (T_i + T_{i+1} - 2T_{a,y}) \quad (4.35)$$

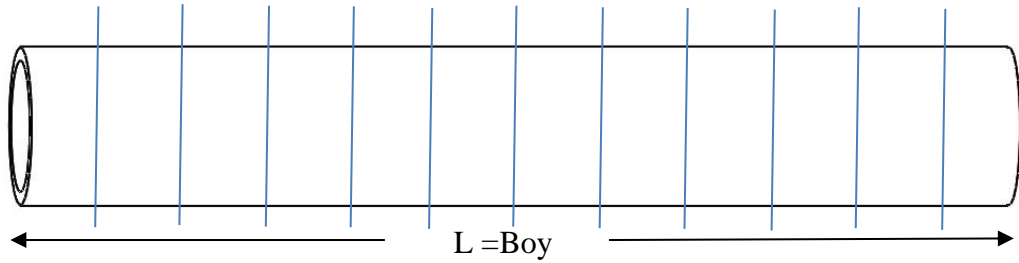
“ $2mc_p$ ”ye A dersek;

$$A T_i - A T_{i+1} = \dot{U} T_i + \dot{U} T_{i+1} - 2 \dot{U} T_{a,y} \quad (4.36)$$

$$A T_i - \dot{U} T_i + 2 \dot{U} T_{a,y} = A T_{i+1} + \dot{U} T_{i+1} \quad (4.37)$$

$$(A - \dot{U}) T_i + 2 \dot{U} T_{a,y} = (A + \dot{U}) T_{i+1} \quad (4.38)$$

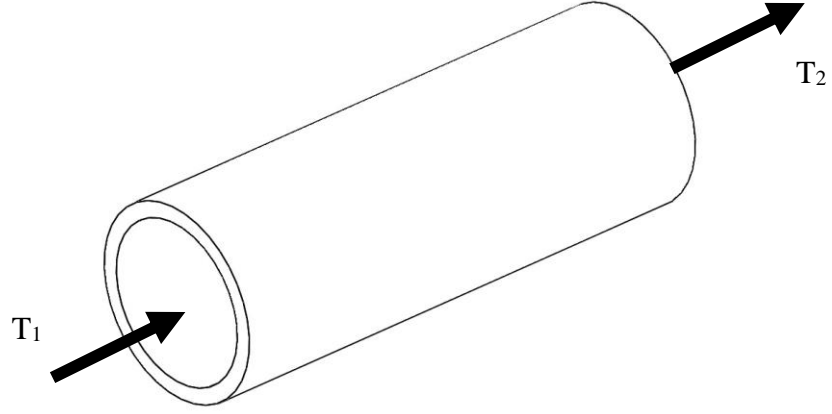
$$T_{i+1} = \left[\left(\frac{A - \dot{U}}{A + \dot{U}} \right) * T_i \right] + \left[\left(\frac{2\dot{U}}{A + \dot{U}} \right) * T_{a,y} \right] \quad (4.39)$$



Şekil 4.15. N sayısı gösterimi

Bakır borumuzu N tane diferansiyel parçaya böldüğümüzü düşünersek;

$$\Delta x = \frac{L}{N} \text{ olur.} \quad (4.40)$$



Şekil 4.16. Boru giriş ve çıkışı

Her diferansiyel parçacık için yapılırsa.... ;

T_1 = Suyun serpantine giriş sıcaklığı

$$T_2 = \left[\left(\frac{A - \bar{U}}{A + \bar{U}} \right) * T_1 \right] + \left[\left(\frac{2\bar{U}}{A + \bar{U}} \right) * T_{a,y} \right] \quad (4.41)$$

$$T_3 = \left[\left(\frac{A - \bar{U}}{A + \bar{U}} \right) * T_2 \right] + \left[\left(\frac{2\bar{U}}{A + \bar{U}} \right) * T_{a,y} \right] \quad (4.42)$$

.
.

.

$$T_N = \left[\left(\frac{A - \bar{U}}{A + \bar{U}} \right) * T_{N-1} \right] + \left[\left(\frac{2\bar{U}}{A + \bar{U}} \right) * T_{a,y} \right] \quad (4.43)$$

$$T_3 = \left\{ \left(\frac{A - \bar{U}}{A + \bar{U}} \right) * \left[\left(\frac{A - \bar{U}}{A + \bar{U}} \right) * T_1 \right] + \left[\left(\frac{2\bar{U}}{A + \bar{U}} \right) * T_{a,y} \right] \right\} + \left[\left(\frac{2\bar{U}}{A + \bar{U}} \right) * T_{a,y} \right] \quad (4.44)$$

$$T_3 = \left[\left(\frac{A - \bar{U}}{A + \bar{U}} \right)^2 * T_1 \right] + \left[1 + \left(\frac{A - \bar{U}}{A + \bar{U}} \right) * \left(\frac{2\bar{U}}{A + \bar{U}} \right) * T_{a,y} \right] \quad (4.45)$$

$$T_4 = \left[\left(\frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})} \right) * T_3 \right] + \left[\left(\frac{2\bar{U}}{(A+\bar{U})} \right) * T_{a,y} \right] \quad (4.46)$$

$$T_4 = \left[\left(\frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})} \right) * \left[\left(\frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})} \right)^2 * T_1 \right] + \left[\left(1 + \frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})} \right) * \left(\frac{2\bar{U}}{(A+\bar{U})} \right) * T_{a,y} \right] \right] + \left[\left(\frac{2\bar{U}}{(A+\bar{U})} \right) * T_{a,y} \right] \quad (4.47)$$

$$T_4 = \left[\left(\frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})} \right) * \left[\left(\frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})} \right)^3 * T_1 \right] + \left[\left(1 + \frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})} \right) + \left(\frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})} \right)^2 * \left(\frac{2\bar{U}}{(A+\bar{U})} \right) * T_{a,y} \right] \right] \quad (4.48)$$

$$T_N = \left[\left(\frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})} \right) * T_{N-1} \right] + \left[\left(\frac{2\bar{U}}{(A+\bar{U})} \right) * T_{a,y} \right] \quad (4.49)$$

formülünde “T₅” i bulmak için T₄ yerine konulduğunda ;

$$T_5 = \left[\left(\frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})} \right)^4 * T_1 \right] + \left[\left(1 + \frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})} + \left(\frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})} \right)^2 + \left(\frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})} \right)^3 \right) * \left(\frac{2\bar{U}}{(A+\bar{U})} \right) * T_{a,y} \right] \quad (4.50)$$

denklemini elde ediyoruz.

“T_N” ifadesi kendinden önce gelen “T_{N-1}” ifadesine bağlı olarak belirli düzende değişmektedir. Belirli bir noktaya yaklaşımların (limit) toplamı (Σ lim) integral olarak dönüştürülebiliyorsa benzer bir metotla ifademizin genel formülüne ulaşabiliriz.

$$T_N = \left[\left(\left(\frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})} \right)^{N-1} \right) * T_1 \right] + \left[\left(\frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})^{N-2}} + \dots + \frac{(A-\bar{U})}{(A+\bar{U})^0} \right) * \left(\frac{2\bar{U}}{(A+\bar{U})} \right) * T_{a,y} \right] \quad (4.51)$$

Önceden de belirttiğimiz gibi;

$$\bar{U} = \frac{(2\pi \Delta x)}{\left(\frac{1}{h_1 r_1} \right) + \left(\frac{1}{k} \right) * \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right)} \quad (4.52)$$

$$A = 2m c_p$$

$$\Delta x = \frac{L}{N} = \text{Boru boyu} / \text{bölüm sayısı}$$

$$r_1 = \text{Boru iç çapı}$$

$$h_1 = \text{Boru içindeki taşınım katayısı}$$

$$T_{a,y} = \text{Boru üstündeki su filmi sıcaklığı}$$

$$T_1 = \text{boruya giriş sıcaklığı (kabul)}$$

İşlem adımları sırasında \bar{U} denkleminde mevcut olan h_1 ve k değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. K değeri bakır boru için iletim katsayısı belirlidir: $0,385 \text{ J} / \text{g C}^\circ$

Boru içerisinde olan ısı taşınım olayında katsayı h_1 hesaplanırken yaklaşım yöntemi kullanılmalıdır. Bunun sebebi h değerinin sıcaklık ile değişim göstermesidir. İşlem ne kadar çok tekrarlanırsa gerçek sonuca o derece yaklaşılır. İşlem adımlarında ilk olarak Re sayısı hesaplanır.

$$U_m * \frac{D_1}{\mu} = Re$$

$$\mu = \text{kinematik viskozite}$$

$$D_1 = 2 r_1$$

$$U_m = \text{akışkan hızı}$$

Re hesaplanır ve 2300 den büyük olup olmamasına göre farklı yollar izlenir.

$Re < 2300$ ise laminar;

$$h_1 * \frac{D_1}{k_{su}} = 3,66 \text{ yapılır.}$$

Burada $k_{su} = \text{Suyun iletim katsayısıdır.}$

$$h_1 = k_{su} * \frac{3,66}{D_1} \text{ denkleminde bulunur.}$$

Suyun k değerine karar verirken tablodan (termodinamik) yararlanılır.

Ne kadar su buharlaşacağını bulmak için;

$Q = \text{transfer edilen toplam ısı}$

$$Q = m_{\text{su}} h_{\text{fg}}$$

h_{fg} = havanın içindeki su buharı potansiyeli

$$\frac{Q}{h_{\text{fg}}} = m_{\text{su}} = \text{soğutma kulesinde eksilen su miktarı.}$$

Yukarıda çıkarılan denklemlerle kapalı su soğutma kulesinin giren suyun sıcaklığına bağlı olarak çıkış suyunun sıcaklığı hesaplanabilir.

4.5.1. Enerji Analizi



Şekil 4.17. Enerji analizi için kontrol hacmi

Nemli havanın kullanıldığı açık bir sistemde kütle ve enerjinin korunumu hesaplanırken buharlaşan su miktarı dikkate alınmayacaktır buda L (suyun kütle debisi) ve G' nin havanın kütle debisi) sabit olmasına neden olacaktır.

Belirlenen hacme t °C sıcaklıkta giren su t – dt °C de sistemi terk etmektedir. Giren havanın entalpisi h_a ve çıkan havanın entalpisi h_a + dh_a olarak ifade edilir.

Atmosfere atılan ısı sudan uzaklaştırılan ısıya eşittir.

$$dq = G * dh_a = L * (4.19 \text{ kJ / kg} \cdot \text{K}) dt \text{ (kW)} \quad (4.53)$$

$$dq = (h_c * \frac{da}{c_{pm}}) * (h_i - h_a) \quad (4.54)$$

bu denklemdede;

d_q = Sudan atılan ısı

h_c = Konveksiyon katsayısı (kW / m² * K)

h_i = su sıcaklığındaki doymuş havanın entalpisi (kJ / kg)

h_a = havanın entalpisi (kJ / kg)

c_{pm} = nemli havanın özgül ısısı (kJ / kg * K)

4.5.2. Verim

Kuleler için verim ifadesi aşağıdaki ifade ile verilir ;

$$\varepsilon = \frac{Q}{Q_{\max}} \quad (4.55)$$

Havaya atılan enerji miktarı ve atılabilecek maksimum enerji miktarı aşağıdaki ifadelerle verilir ;

$$Q = m_a (h_{a,o} - h_{a,i}) \quad (4.56)$$

$$Q_{\max} = m_a (h_{a,wi} - h_{a,i}) \quad (4.57)$$

Entalpi farkları metodundan faydalanılarak yazılan bu denklemleri (1,2,3 nolu denklemler) kullanarak verim,

$$\varepsilon = \frac{(h_{a,o} - h_{a,i})}{(h_{a,wi} - h_{a,i})} \quad (4.58)$$

olarak bulunur.

Verim ifadesi ayrıca ;

$$\varepsilon = \frac{(T_{in} - T_{out})}{(T_{in} - T_{wb})} \quad (4.59)$$

olarak sıcaklıklara göre de yazılabilir.

5. BİR KAPALI TİP SOĞUTMA KULESİNDE DENEYSEL ÇALIŞMA

Kapalı tip su soğutma kulelerinde kulenin veriminin hesaplanması dış ortam havasının hesaplanmasında en büyük etmen ortam koşullarıdır. Ortam koşulları kulenin bulunduğu yere göre dış hava sıcaklığı, yağ termometre sıcaklığı ve havanın ne oranı gibi birçok faktöre göre değişiklik gösterir. Bu çalışmada yapılan testlerde bu değerler genel olarak birbirine yakın olduğu koşullarda gerçekleştirilmiştir.

Yapılan deneysel çalışmalarda öncelikle kulenin dolgulama sistemi değiştirilerek kulenin verimi incelenmiştir. Dolguların boyutlarının yanı sıra sıralamasının da verime olan etkisi gösterilmiştir. En verimli seçilen dolgu sistemi ile hava ve su debileri bir frekans konvertörü yardımı ile değiştirilerek kuleye giren hava debisinin ve kulede devir eden soğutma suyunun verime olan etkisi incelenmiştir. Bunun yanı sıra yapılan deneylerde yağ termometre sıcaklığının ve kuleye giren soğutulacak suyun da verime etkisi gösterilmiştir.

5.1. Sistemin tanıtımı

Test kulesinin 3 farklı sıralama ile kıvrılmış olan bakır eşanjörü mevcuttur. Bu bakır eşanjörler arasındaki fark kıvrım makaralarının boyutlarıdır. Bu farkın avantajı dolgu sıra sayısının değiştirilmesi ve eşanjörün kule havuzuna olan yakınlığıdır. Kule eşanjörünün sıra sayısını artırıp eşanjör arasına pvc film dolgular konulduğunda en verimli halinin elde edildiği görülmüştür. Buna göre 6 sıra bakır boru eşanjörlü, 3 sıra dolgulu YTO-AKSK-12 kullanılmıştır.

Kuleye giriş suyunun ısıtılması amaçlı ayrı bir havuz yapılarak havuzun içerisine su ısıtıcı rezistanslar konulmuştur. Buradaki amaç su soğutma kulesinin atmosfere attığı ısı yükünü incelerken sürekli olarak aynı sıcaklıkta soğutma suyunun sisteme girişini sağlamaktır. Bir panel vasıtası ile sıcaklık sabit tutulmuş ısıtılan su kuleye gönderilerek kulenin dışarı attığı ısı yükü incelenmiştir. Bu sistem pratik olarak gerçek hayatta görülebilecek sanayi tipi soğutma kuleleri veya hizmet sektöründeki soğutma kulelerinin küçük bir prototipidir.

Kulenin havuzuna, üst, orta, alt dolgusuna ve eşanjör giriş çıkışına termocouple konulmuştur. Bu noktalardaki su sıcaklığı incelenerek soğumanın ne derece ve kulenin

hangi noktalarında daha çok olduğu incelenmiştir. Bu inceleme ışığında soğutma kulesinin dolgu ve eşanjör kısmındaki soğutmanın kule havuzuna yaklaştıkça sıcaklığa nasıl bir etkisi olduğu görülür.

Kulenin pompası ve fanı debi farkının soğutmaya olan etkisini incelemek amacı ile frekans kontrolü cihazı ile kumanda edilmiştir. Fan ve pompa hızları belirli sıcaklıklarda artırılarak kule verimi incelenmiştir. Soğutma kulesindeki fanın ve pompanın frekansının artırılması her koşulda soğutmanın artacağı anlamına gelmez. Kullanılan plastik kanatlar belirli bir devirden sonra kendi açısını koruyamayarak burulmaya başlar. Bu burulma neticesinde kulenin hava debisi düşüşe geçer. Yapılan testlerde bu olay da göz önünde bulundurularak maksimum devir seçilmiştir.

5.1.1. Deneyin yapılışı

Şekil 5.1’de test kulesi ve ısıtma tankı gösterilmektedir. Testler öncelikle tek eşanjör (6 sıra) kullanılarak yapılmış ve hava ile su debisinin soğutma verimi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Bu debiler 30 Hz, 40 Hz ve 50 Hz frekans kontrol cihazı ile ayarlanarak elde edilmiştir. 30 Hz için kule su debisi 2 m³/h hava debisi 890 m³/h, 40 Hz için kule su debisi 2,5 m³/h hava debisi 1187 m³/h, 50 Hz için kule su debisi 2.8 m³/h hava debisi 1820 m³/h’tir.

İkinci aşamada ise üç adet farklı sıralı ve dolgulu eşanjörün birbiri ile verimi karşılaştırılmıştır. Eşanjörler 4, 6 ve 8 sıra olarak denenmiştir. Aksiyel kapalı soğutma kulesi 12’de boru sayısı değiştirilerek bakır boru alanı sabit olmak üzere eşanjör aşağıya doğru uzatılmıştır ve bu eşanjör boyut değişimine uygun dolgu sistemi kullanılarak verime bakılmıştır. Eşanjör sıra sayısının ve dolgu sayısının artırılması ile kulenin verimindeki artış incelenmiştir.

Soğutma suyunun girişine göre kulenin veriminin değişiklik gösterdiği yapılan deneylerde görülmüştür. Bu nedenle soğutulacak su farklı sıcaklıklarda kuleye sokularak çıkış suyunun sıcaklığına göre verim hesaplanmıştır. Su sıcaklığı, yağ termometre sıcaklığı, hava ve su debileri değiştirilerek yapılan deneylerin tamamı tek bir eşanjör üzerinde denenmiştir. Genel olarak 6 sıra bakır eşanjör, 4 sıra dolgulama yapılan soğutma kulesinden faydalanılmıştır. Yapılan ölçümlerde dolgu sıcaklıkları üst dolgu, orta taraftaki dolgular ve alt dolgu sıcaklığı da verilerek tablolananmıştır. Buradaki

verim ısıtma havuzundan kuleye giren su sıcaklığı, kuleden soğutularak çıkan suyun sıcaklığı ve yaş yaş termometre sıcaklığı esas alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 5.1. Test cihazı ve harici ısıtma tankı, 6 ve 8 sıralı eşanjörler

5.1.2. Test Cihazlarının Tanıtımı ve Ölçümdeki Belirsizlikler

Anemometre: Bu cihazlar rüzgârın veya gaz halindeki bir akışkanın hızını ölçmeye yarar. Testimizde kulenin hava debisini belirlemek için kullanılmıştır. Kule hava debileri ölçümü en iyi sonucu vermesi açısından kule panjurlarından cihaz başının çapı yani 70 mm aralıklara bölünen panjurda aralarda boşluk kalmayacak şekilde ölçülmüştür. Ölçümde tüm panjur yüzeyinden alınan hava hızları m/s cinsinden ortalama hesaplanarak bu değer yüzey alanı ile çarpılmıştır.

Tablo 5.1. Anemometre cihazının teknik özellikleri [28]

Hava hızı Ölçümü		
Kademe	Çözünürlük	Doğruluk
0.4 - 25.0 m/s	0.1 m/s	$\pm(2\%+1d)$
Sıcaklık Ölçümü		
Kademe	Çözünürlük	Doğruluk
0 - 50°C	0.1°C	$\pm 0.8^\circ\text{C}$



Şekil 5.2. Anemometre

Termokupl: Testimizde aynı şekilde kule havuzu ve dolgu aralarındaki sıcaklık değerleri eşanjör giriş çıkış sıcaklıkları ve harici tank sıcaklığını ölçmek için kullanılmıştır. Bunlar bir pano aracılığıyla rezistanslara bağlanıp kulenin soğuttuğu harici tanktaki suyun sıcaklığını sabit tutulmasını sağlamıştır.



Şekil 5.3. Termokupl [24]

Manometre: Testimizde ise pompa basıncını belirlemek için kullanılmıştır bu sayede basınç ve pompa motorunun çektiği ampere bakılarak maksimum çıkılabilecek pompa debisine bakılmıştır ve bu bir vana aracılığıyla ayarlanmıştır. Sonrasında ise pompa ile fan birlikte çalışarak bir frekans konvertörü ile kontrol edilmiştir.

Tablo 5.2. Manometrenin Teknik Özellikleri [29]

Kullanım Özellikleri		
	Standart	İsteğe Bağlı
Optimum Ölçüm Aralığı	0,1 x PN ve 0,75 x PN arasında	
Koruma Sınıfı	IP41	-
Depolama Sıcaklıkları	-40... + 70 °C	-
Mekanik Şok Test Yüğü	15 g	-
Mekanik Titreşim Testi	10 Hz ile 150 Hz -1 oktav/dk. 2s / 3 eksende	
Uygunluk	EN 837 – 1	EN 837-1
Hassasiyet Sınıfı	KL 2.5	KL 1.6
Aşırı Basınç Sınırı	≤40 bar PN x 1.25	>40 bar PN x 1.15
Çalışma Basıncı (max.)	Tam skala değerinin maksimum % 75 geçmemelidir.	
Ortam Sıcaklığı	-40...+60 °C	-
Akışkan Sıcaklığı	Maksimum + 60 °C	Maksimum + 120 °C



Şekil 5.4. Manometre

Debimetre: Sıvı veya gazların doğrusal olan veya olmayan bir hat üzerinden geçişteki debilerini ölçmeye yarayan alettir. Testimizde pompa debisini ölçmek için kullanılmıştır.

Tablo 5.3. Debimetrenin Teknik Özellikleri [30]

Teknik Özellikleri	
Bağlantı	½" ile 2 ½" arası veya Flanşlı Tipler
Debi Aralığı	10..100 L/H ile 12...60 m ³ /H ve 120m ³ /h kadar
Islak Kısımlar	AS
O-ring	Viton
Şamandıra	ABS
Sıcaklık	0°C...60°C
Bağlantı Malz.	ABS
Basınç	6 bar
Hassasiyet	4 % T.S.
Bağlantı	Dikey
Bağlantı Boyu	280mm ile 430mm arası



Şekil 5.5. Debimetre [25]

Ampermetre: Testimizde cihazların maksimum amperlerinin altında olduklarını gözlemlenmek için kullanılmıştır.

Tablo 5.4. Ampermetrenin Teknik Özellikleri [31]

Temel Fonksiyonlar	Aralığı	En İyi Doğruluk
DC Voltaj	400mV/4V/40V/400V/600V	+-(0.8%+1)
AC Voltaj	4V/40V/400V/600V	+-(1%+5)
DC Akım	40A/400A	+-(2%+3)
AC Akım	40A/400A	+-(2.5%+5)
Direnç	400W/4kW/40kW/400kW/4MW/40MW	+-(1%+2)
Frekans	10Hz~1MHz	+-(0.1%+3)
Görev Döngüsü	0.1%~99.9%	+
Giriş Empedansı	≥10MW	+
DC Gerilim Ölçümü		3999



Şekil 5.6. Ampermetre [26]

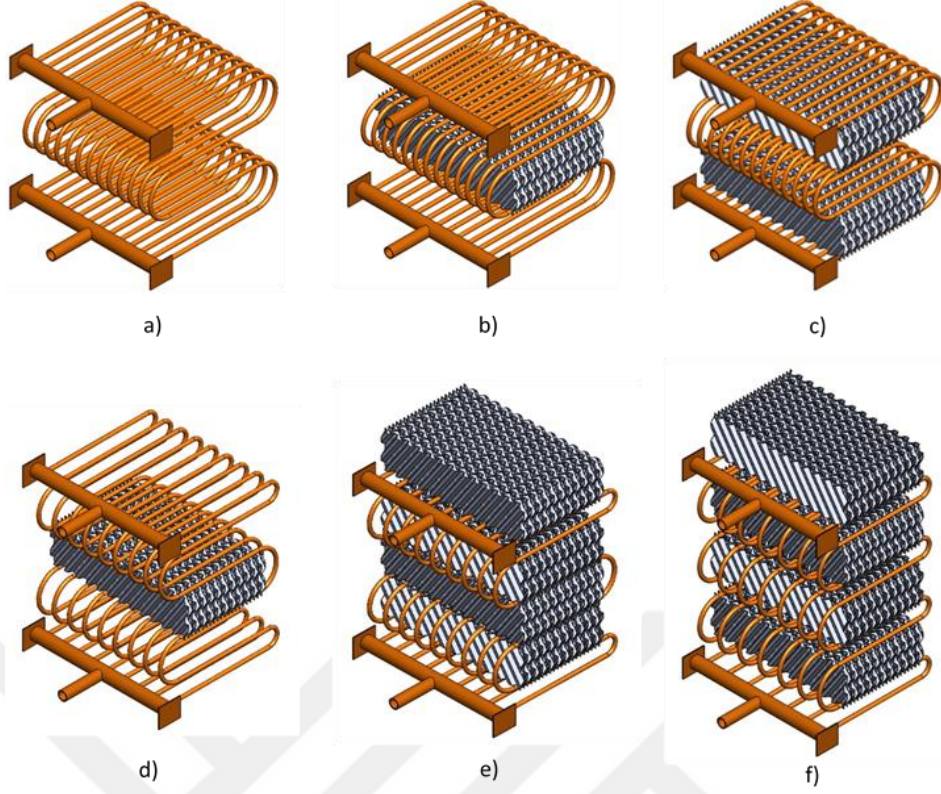
6. SONUÇLAR

Test standından elde edilen değerler (sıcaklık, nem vb.) kullanılarak farklı dolgu ve eşanjör sıralamaları ile farklı hava ve su debilerinde kapalı tip soğutma kulesi için performans analizleri yapılmıştır. Üç farklı eşanjör sıralaması ile hazırlanan bakır borudan üretilmiş üç adet eşanjör ve bunlara uygun dolgu tipleri test standında denenmiştir. İlk eşanjör dört sıra bakır borudan yapılmıştır. İlk olarak dolgusuz denenerek soğutmadaki kapasitesine bakılmıştır. Daha sonraki adımlarda dolgu sırası artırılarak verimdeki artış izlenmiştir. Altı sıralı eşanjör ikinci olarak denenmiş. Aynı dolgu arttırımı bu eşanjör içinde yapılmıştır. Verimdeki artış yine izlenmiştir. Son olarak sekiz sıra bakır kullanılan eşanjör. Son olarak sekiz sıra bakır boru kullanılan eşanjör düzeneğe bağlanarak en fazla kullanılabilen dolgu sıralaması kullanılıp eşanjörün verimine bakılmıştır. Dört sıra ve altı sıra eşanjörlerde bakır boru sırasının ve dolgu sırasının artması ile verimin arttığı izlenmiştir. Bu nedenle sekiz sıra bakır borulu eşanjör için dört sıra dolgunun maksimum verimi vereceği düşünülerek testler gerçekleştirilmiştir. Verimdeki artış sürekli gözlenmiştir.

Hava ve kule devir daim suyu debisi verimin artmasında oldukça önemli rol oynamaktadır. Bunun anlaşılması adına bir frekans konvertörü düzeneğe yerleştirilerek verimin izlenmesi sağlanmıştır. Frekans konvertörü 30Hz, 40Hz, 50Hz olacak şekilde üç seviyede çalıştırılmıştır. Hava debisi ve kule devir daim suyu debisi verimde birbiri ile bağımlı olarak hareket edeceği için ikisinde tek bir frekans konvertörüne bağlanmıştır. Aksi takdirde artan su debisi hava debisini etkileyeceği ve düzenkteki farklı parametreleri doğuracağı için ikisininde tek bir verim arttırıcı unsur olacağı göz önüne alınmıştır.

6.1 Dolgu ve Eşanjör Sıra Sayısı Etkisi

Üç farklı eşanjör ile yapılan testin sonuçları Tablo 1 dedir. Testler $2.5 \text{ m}^3/\text{h}$ sabit su debisi ve $1187 \text{ m}^3/\text{h}$ hava debisi ile yapılmıştır. Görüldüğü gibi alan sabit kalmak koşulu ile eşanjör havuza yaklaştırıldıkça verim artmaktadır. Aynı bakır boru kullanılarak sıra sayısı dolgu sayısı değiştirilerek %10'luk verim artışı sağlanmıştır.



Şekil 6.1. a) 4 sıra bakır boru dolgu yok b) 4 sıra bakır boru tek dolgu c) 4 sıra bakır boru iki dolgu d) 6 sıra bakır boru tek dolgu e) 6 sıra bakır boru dört dolgu f) 8 sıra bakır boru dört dolgu

Bakır boru sıra sayısı sabit kalmak koşulu ile dolgu sırası arttırılınca verimin arttığı gözlemlenmektedir.

Tablo 6.3. Dolgu ve Eşanjör Sıra Sayısının Verime Etkisi

Eşanjör Sırası	Dolgu	Verim
4 Sıra Bakır Boru	Dolgu Yok	% 13.6
4 Sıra Bakır Boru	150 mm Tek Sıra	% 15.3
4 Sıra Bakır Boru	150 mm İki Sıra	% 18.7
6 Sıra Bakır Boru	150 mm Tek Sıra	% 18.75
6 Sıra Bakır Boru	150 mm 4 Sıra	% 20.26
8 Sıra Bakır Boru	150 mm 4 Sıra	% 23.6

Literatürde benzer çalışmalara bakacak olursak verim arttırımı için dolgulamanın büyük önem taşıdığı görülmektedir. Genel olarak eşanjörün üzerine ve altına konulan dolgu demetleri ile verim büyük ölçüde arttırılmıştır.

Yapılan çalışmaların birinde Mahdi ve ark. [33] dolgulamanın kule verimi açısından ne derece önemli olduğuna değinmiştir. Çalışmada 280 mm ve 560 mm'lik dolgular kullanılmıştır. Bu dolguların kulenin verimini sırasıyla %6 ve %28 arttırdığını göstermişlerdir.

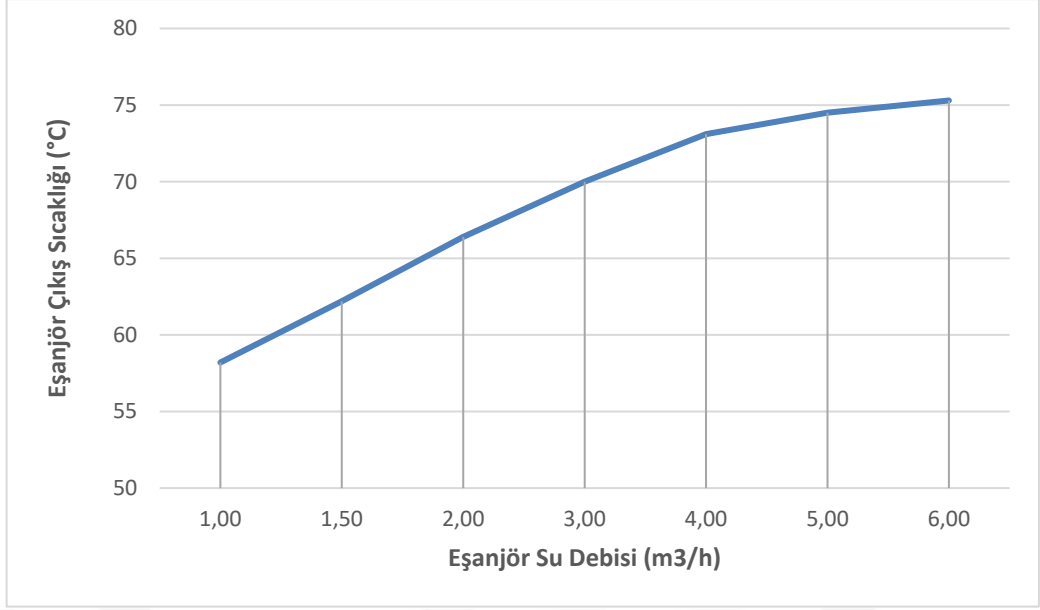
Tomás ve ark. [34] yaptıkları çalışmada alternatif olarak başka tip dolgu kullanarak çıkış suyu sıcaklığını diğer parametreleri sabit tutarak 8 derece düşürmüştür, bu da eşanjör çıkış suyu sıcaklığını da % 20' lik bir verim almalarını sağlamıştır.

6.2 Eşanjör Su Debisinin Etkisi

Tablo 6.4. Eşanjör Giriş Sıcaklığı Sabit Su Debisi Arttığı Durumun Verime Etkisi

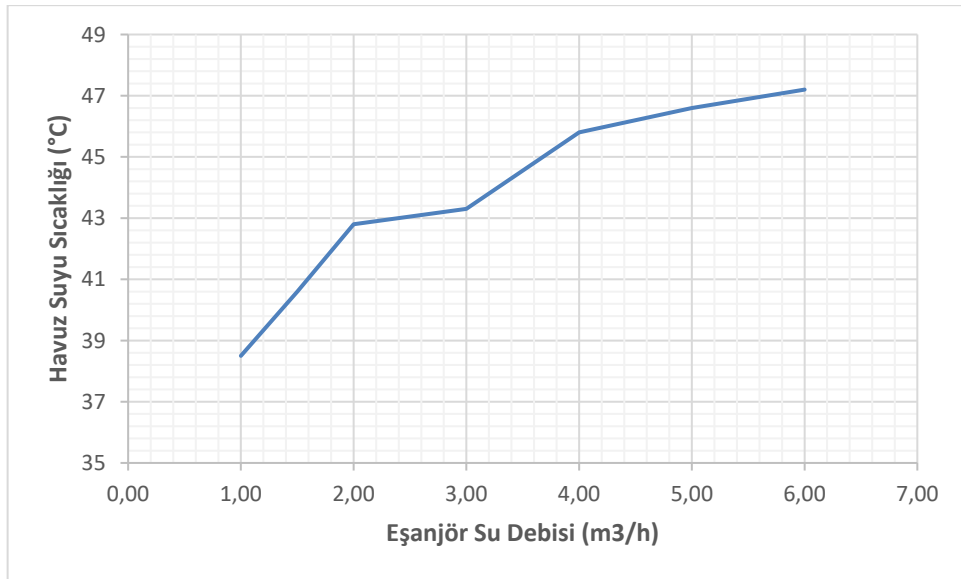
Eşanjör giriş sıcaklığı ₁ (°C)	Eşanjör çıkış sıcaklığı ₁ (°C)	Eşanjör su debisi (m ³ /h)	Havuz suyu sıcaklığı ₁ (°C)	Üst dolgu üst sıcaklık (°C)	Orta dolgu üst sıcaklık (°C)	Alt dolgu üst sıcaklık (°C)	Yaş termometre sıcaklığı ₁ (°C)	Kuru termometre sıcaklığı ₁ (°C)	Kule hava çıkış sıcaklığı ₁ (°C)	Verim (%)
80	58.2	1	38.5	32.7	31.2	29.7	11.1	15.6	37	31.6
80	62.2	1.5	40.6	35	33.3	30.9	11.1	15.6	38	25.8
80	66.4	2	42.8	37.5	35.3	32.9	11.4	15.8	39	19.8
80	70	3	43.3	39.4	37	33.5	11.3	15.6	40	14.5
80	73.1	4	45.8	41.3	39	35.2	11.3	15.9	43	10
80	74.5	5	46.6	42.6	40	36.3	11.5	16.4	44	8
80	75.3	6	47.2	42.7	40.5	36.9	11.5	16.5	44	6.8

Şekil 6.2'de görüldüğü üzere eşanjör su debisi arttırıldığı zaman eşanjör su çıkış sıcaklığı da artmaktadır. Prototipte verimi etkileyen faktörlerin hepsi sabit tutulduğu zaman eşanjör giriş suyu debisi kule kapasite değeri değişmeyeceği için önemli bir yere sahiptir. Genel ısı alışverişi denklemi gereğince kule kapasitesi sabit tutulup kütle artar ise sıcaklık farkı azalacağından eşanjör çıkış sıcaklığı da artacaktır.



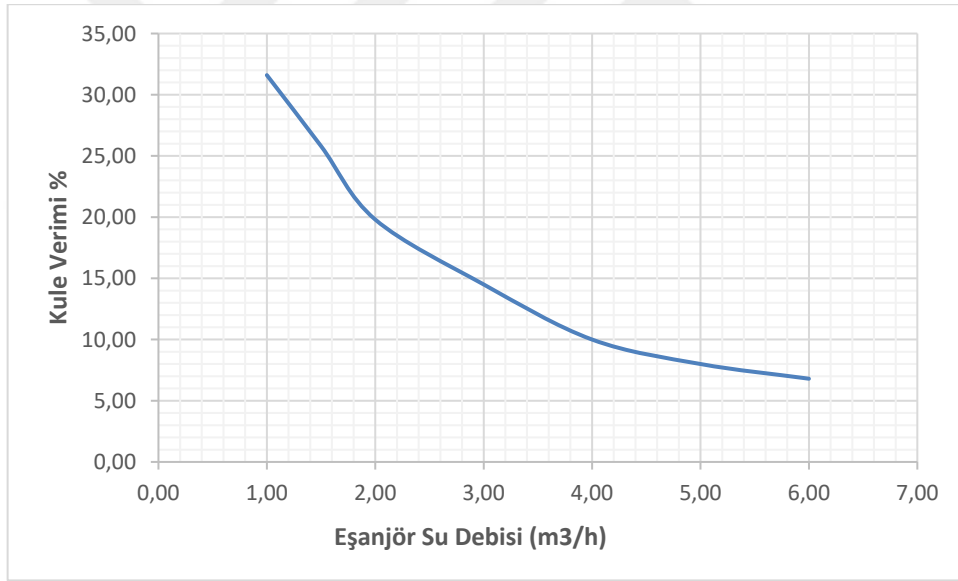
Şekil 6.2. Eşanjör Çıkış Sıcaklığı

Şekil 6.3’de görüldüğü gibi ısı yükünü atmosfere veremeyen eşanjör olması gereken sıcaklığın üzerinde kontrol hacminin içerisinde kule havuzuna verdiği ısı olması gereken değerden yüksek olacaktır. Bu durum kule havuzunun sıcaklığının artmasına sebep olacaktır. Normal şartlar altında kule kapasitesine uygun debiler ile kullanılan bir kulenin havuz suyu sıcaklığı yaş termometre sıcaklığına yakın bir değer alacak iken kapasitesinden fazla ısı yükü gönderilen kulelerin havuzu yüksek sıcaklıklarda kalacaktır. Aşağıdaki grafikte bu gösterilmiştir.



Şekil 6.3. Havuz suyu sıcaklığı

Şekil 6.4’de görüldüğü üzere eşanjör su debisi arttırıldıkça verim düşmektedir. Bir su soğutma kulesinin fiziksel kapasitesinin değiştirilmesi bakır boruların temas ettiği yüzey alanı, biçimi, bulunduğu konum ve aynı zamanda fan ve devir daim pompasının debilerinin değişmesi ile mümkündür. Kulenin fiziksel kapasitesi değişme bile verimi etkileyecek bazı faktörler vardır. Örneğin yaş termometre sıcaklığının düşmesi veya kule içerisinde başka bir devir daim akışkanının kullanılması bunu mümkün kılar. Biçim olarak kulede fiziksel bir değişiklik yapılmaması kulenin veriminin etkilenmeyeceği anlamına gelmez. Eşanjör suyu debisi, kulenin fiziksel kapasitesini değiştirmiyor olsak bile kulenin verimi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Yapılan testler sonucunda elde edilen grafikte de görüldüğü üzere eşanjör su debisi arttığı zaman verim azalmaktadır.



Şekil 6.4. Kule Verimi

Literatürde eşanjördeki su debisinin sisteme olan etkisini incelemek için ise giriş sıcaklığı, yaş termometre ve kule pompa fan devirleri sabit tutularak yapılan çalışmalar mevcuttur.

Wei ve ark. [32] yaptıkları çalışmada yaş termometre sıcaklığının, kule hava debisinin, kule giriş suyu debisi ve kule giriş suyu sıcaklığının verime olan etkilerini incelemiştir. Çalışmalarında yaş termometre sıcaklığının azalması ile verimin

artışını, kule hava debisinin artması ile verimin arttığını, kule giriş suyu debisinin artırılması ile verimdeki düşüşü ve kule giriş suyu sıcaklığındaki artış ile verimin artışını göstermişlerdir. Mahdi vd. yaptıkları çalışmada aynı şekilde yağ termometre sıcaklığındaki ve kule giriş suyu debisindeki artışın verimi olumsuz yöne etkilediğini ortaya koymuşlardır. Aynı zamanda bu çalışmada kule fiskiye suyu debisinin artışının ve kule giriş suyu sıcaklığındaki artışın verimle olan olumlu etkisi de incelemiştir.

6.3. Kule Hava Ve Su Debileri Değişiminin Etkisi

Bu testte ise kule su ve hava debisi değiştirilmiştir ve diğer değerler sabit tutulmuştur. Hava debisi 2 ve 2,8 m³/h arasında su debisi ise 890 ve 1820 m³/h arasında değişmektedir. Eşanjöre giriş sıcaklıkları ise 35 °C ve 80 °C olarak alınmıştır. Hava ve su debisi aynı anda değiştirilmiştir ve aşağıdaki değerler alınmıştır.

- 30 Hz için kule su debisi 2 m³/h hava debisi 890 m³/h
- 40 Hz için kule su debisi 2,5 m³/h hava debisi 1187 m³/h
- 50 Hz için kule su debisi 2.8 m³/h hava debisi 1820 m³/h tir.

35 °C için verim sonuçları tablo 6.3 de ve 80 °C için ise tablo 6.4 de verilmiştir.

Tablo 6. 3. 35°C’de Eşanjör giriş sıcaklığı ve debi sabit iken frekansın arttırılmasının verime etkisi

Eşanjör giriş sıcaklığı 1 (°C)	Frekans (Hz)	Eşanjör çıkış sıcaklığı 1 (°C)	Eşanjör debisi (m ³ /h)	Havuz suyu sıcaklığı 1 (°C)	Üst dolgu üst sıcaklık (°C)	Orta dolgu üst sıcaklık (°C)	Alt dolgu üst sıcaklık (°C)	Yağ termometre sıcaklığı (°C)	Kuru termometre sıcaklığı (°C)	Kule verimi (%)
35	30	31.1	2	22.7	19.7	18.1	18.5	11.8	19.5	16.8
35	40	30.3	2	21.3	19.5	19.3	16.2	11.4	19.5	19.9
35	50	28.4	2	19.3	18.6	19.1	12.8	11.4	19.2	27.9

Tablo 6.4. 80°C’de Eşanjör giriş sıcaklığı ve debi sabit iken frekansın arttırılmasının verime etkisi

Eşanjör giriş sıcaklığı ₁ (°C)	Frekans (Hz)	Eşanjör çıkış sıcaklığı ₁ (°C)	Eşanjör debisi (m ³ /h)	Havuz suyu sıcaklığı ₁ (°C)	Üst dolgu üst sıcaklık (°C)	Orta dolgu üst sıcaklık (°C)	Alt dolgu üst sıcaklık (°C)	Yaş termometre sıcaklığı ₁ (°C)	Kuru termometre sıcaklığı ₁ (°C)	Kule verimi (%)
80	30	63.4	2	38.4	32.7	30.9	30.1	14	16.0	25.1
80	40	61.8	2	35.9	32.2	31.1	24.2	12.7	15	27
80	50	60.3	2	32.9	32	31.3	17.8	11.9	14	28.9

Tablo 6.3 ve 6.4’de görüldüğü gibi hava ve su debisi aynı oranda arttırıldığında verim de artış olduğu görülmektedir. Eşanjör giriş sıcaklığı arttığında ise verimin daha fazla olduğu görülmekte ama hava ve su debisinin artışı ile olan verim artış hızı daha azdır. 35 °C lik giriş sıcaklığı için % 66.07 lik artış değeri varken 80 °C için %15.13’lük bir artış elde edilmiştir.

7. ÖNERİLER VE TARTIŞMA

- Kapalı tip bir eşanjörde sıra sayısı arttırıldığında ve ona bağlı dolgulama yapıldığında verimin arttığı gözlemlenmiştir. 4 sıradan 8 sıraya çıkarılınca YTO-AKSK- 12 deney kulesinin veriminde % 10 artış elde edilmiştir.
- 4 sıra bakır boru için yapılan testte dolgu sıra sayısının artmasıyla kule veriminde % 3'lük bir verim artışı sağlanmıştır.
- 2. Testte ise frekans konvertörü ile kontrol edilen deney düzeneğinin veriminin frekansa bağlı hava ve su debisiyle arttığı ve artış hızının düşük eşanjör giriş sıcaklığında daha yüksek olduğu ortaya konmuştur.

Tez kapsamında yapılan deneylerin sayısı arttırabilir, bu deney farklı dolgu tipleriyle denenip, farklı çeşit fan tipleriyle tekrarlanarak daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Tez kapsamındaki deneyler baz alınarak bir HAD analizi yapıp bu deneylerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırılabilir. Kule içerisindeki soğutucu akışkan yerine başka bir soğutucu akışkan kullanılabilir, bu akışkanın kaynama noktası daha düşük bir akışkandan seçilebilir ve böylelikle yağ termometre sıcaklığı daha aşağıya çekilebilir, bu koşullarda verimin daha yüksek olabileceği öngörülebilir.

8. KAYNAKÇA

- [1]A. Kaiser, M. Lucas, A. Viedma ve B. Zamora, «Numerical model of evaporative cooling processes in a new type of cooling tower,» International Journal of Heat and Mass Transfer, no. 48, p. 986–999, 2005.
- [2]A. Alkhedhair, H. Gurgenci, I. Jahn, Z. Guan ve S. He, «Numerical simulation of water spray for pre-cooling of inlet air in natural draft dry cooling towers,» Applied Thermal Engineering, cilt 61, pp. 416-424, 2013.
- [3]G. Heidarinejad, M. Karami ve S. Delfani, «Numerical simulation of counter-flow wet-cooling towers,» international journalof refrigeration, cilt 32, p. 996 –1002, 2009.
- [4]Q. Zhang, J. Wu, G. Zhang, J. Zhou, Y. Guo ve W. Shen, «Calculations on performance characteristics of counterflow reversibly used cooling towers,» International Journal of Refrigeration, cilt 35, pp. 424-433, 2012.
- [5]W. Asvapoositkul ve M. Kuansathan, «Comparative evaluation of hybrid (dry/wet) cooling tower performance,» Applied Thermal Engineering, cilt 71, pp. 83-93, 2014.
- [6]A. K. M. Mohiuddin ve K. Kant, «Knowledge base for the systematic design of wet cooling towers. Part II: Fill and other design parameters,» International Journal of Refrigeration, cilt 19, pp. 52-60, 1996.
- [7]M. Su, G. Tang ve S. Fu, «Numerical simulation of fluid flow and thermal performance of a dry-cooling tower under cross wind condition,» Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, cilt 79, pp. 289-306, 1999.
- [8]S. Bedekar, P. Nithiriasu ve K. Seetharamu, «Experimental Investigation Of The Performance Of A Counter-Flow, Packed-Bed Mechanical Cooling Tower,» Energy, cilt 23, pp. 943-947, 1998.
- [9]G. Gan, S. Riffat, L. Shao ve P. Doherty, «Application of CFD to closed-wet cooling towers,» Applied Thermal Engineering, cilt 21, pp. 79-92, 2001.
- [10]R. Al-Waked ve M. Behnia, «CFD simulation of wet cooling towers,» Applied Thermal Engineering, cilt 26, pp. 382-395, 2006.
- [11]M. Sadafi, I. Jahn, ve K. Hooman, «Cooling performance of solid containing water for spray assisted dry cooling towers,» Energy Conversion and Management, cilt 91, pp. 158-167, 2015.
- [12]W. Asvapoositkul ve M. Kuansathan, «Comparative evaluation of hybrid (dry/wet) cooling tower performance,» Applied Thermal Engineering, cilt 71, pp. 83-93, 2014.
- [13]J.-f. Zhou, S.-w. Wu, Y. Chen ve C.-l. Shao, «Semi-numerical analysis of heat transfer performance of fractal based tube bundle in shell-and-tube heat exchanger,» International Journal of Heat and Mass Transfer, cilt 84, pp. 282-292, 2015.
- [14]P. Imani-Mofrad, Z. H. Saeed ve M. Shanbedi, «Experimental investigation of filled bed effect on the thermal performance of a wet cooling tower by using ZnO/water nanofluid,» Energy Conversion and Management, cilt 127, pp. 199-207, 2016.
- [15]F. Gharagheizi, R. Hayati ve S. Fatemi, «Experimental study on the performance of mechanical cooling tower with two types of film packing,» Energy Conversion and Management, cilt 48, pp. 277-280, 2007.
- [16]<http://www.yto.com.tr/tr/>.
- [17]http://ctpsusogutmakulesi.com/SuSogutmaKulesiCesitleri,servis_bakim_revizyon,11.html.
- [18]<https://npre.illinois.edu/news/nuclear-power-what-it-means-illinois>.
- [19]http://www.niba.com.tr/TR/Products_Details.asp?PGGroupID=364&PGImageID=#prettyPhoto.
- [20]H. Gül, 2012, Ters akımlı soğutma kulesi performans analizi, 2018.
- [21]<https://www.termokon.com/icerik.php?id=28>.

- [22]<http://www.thesisat.org/psikrometrik-diyagram-ve-kullanimi.html>.
- [23]<http://www.thesisat.org/psikrometrik-diyagram-ve-kullanimi.html>.
- [24]<http://diyot.net/termokup/>.
- [25]http://www.smstork.com/t-skpk-samandirali_plastik-tup-debimetreler.html.
- [26]<http://olcualetleri.blogspot.com/2013/03/pens-ampermetre-nedir.html>.
- [27]http://mwiftp.multi-wing.com/website/brochures/3c_eng.pdf
- [28]<https://www.netes.com.tr/urun/lutron-yk-80ap-hava-akimi-hizi-ve-sicaklik-olcer#teknik>
- [29]<http://www.pakkens.com.tr/products/basinc-olcerler-1/genel-amacli-manometre-5/manometreler-15/o-50-mm-2.html>
- [30]<https://www.rst-elektronik.com/samandirali-debimetre/plastik-tuplu-samandirali-debimetre>
- [31]<https://www.saralelektrik.com/urunler/otomasyon-kontrol-sistemleri/delta/ac-hiz-kontrol-cihazlari/olcum-test-cihazlari/unit-ut-202-pensampermetre>
- [32]<https://www.mdpi.com/1996-1073/10/3/282/htm>
- [33]https://www.researchgate.net/publication/311767073_Thermal_Characteristics_of_Closed_Wet_Cooling_Tower_Using_Different_Heat_Exchanger_Tubes_Arrangement
- [34]<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431118323408>

9. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Basri Efe ŞENGİL

Doğum Yeri ve Yılı : İzmir, 1991

Medeni Hali : Bekar

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : efesengil@hotmail.com

Eğitim Durumu

Lise : Karşıyaka Merkez Anadolu Lisesi, 2009

Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, 2013

Yüksek Lisans : Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 2019

Mesleki Deneyim

Türkoğlu Makine 2013-2019

Buchen-Esman 2019 (halen)