

ÖZ
YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YERALTI TERMAL ENERJİ DEPOLAMADA KULLANILAN
FARKLI DOLGU MADDELERİNİN TERMAL
ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

Metin Özer YILMAZ

ÇUKUROVA ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ
ENSTİTÜSÜ KİMYA ANABİLİM DALI

Danışman : Prof. Dr. Halime Ö. PAKSOY

Yıl : 2005, Sayfa : 64

Jüri : Prof. Dr. Halime Ö. PAKSOY

Prof. Dr. Serdar ÖZTEKİN

Doç. Dr. Sultan GİRAY

Dolgu malzemeleri Yeraltı Termal Enerji Depolama sistemlerinde ve Yer Kaynaklı Isı Pompalarında, kuyu ve ısı değiştirici boruları arasında kullanılmaktadır. Bu sistemler için ısı değiştiricilerin tasarımı dolgunun ısıl iletkenliğine ve kuyunun ısıl direncine bağlıdır. Bu çalışmada, farklı dolgu maddeleri deneysel olarak laboratuvar kuyu modelinde test edilmiştir. Deneylerde, ısı taşıyıcı akışkan farklı akışkan hızlarında U-boruda dolaştırılmıştır. U-boru içindeki giriş ($T_{giriş}$) ve çıkış sıcaklığı ($T_{çıkış}$) sistemin sürekliliğinde ölçülmüştür. Sıcaklıklar kuyu içinde, U-boruda ve kuyu boru ile jeolojik formasyon arasında da ölçülmüştür. Ölçümler düzenli olarak 10 dakika aralılarla alınmıştır. Deney süresi 25 saattir. Bazalt dolgu maddelerinin ısıl direnci ve ısıl iletkenliği sıcaklık ölçümlerinden belirlenmiştir. Kuyunu ısıl direnci 0,012-0,576 (K/W) arasında ve sistemin ısıl iletkenliği 0,2-8,22 (W/mK) arasında bulunmuştur. Dolgu malzemesi olarak faz değiştiren maddeler kullanılarak Kuyularda Termal Enerji Depolaması sistemlerinden kısa süreli termal enerji depolama olanakları araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yeraltı Termal Enerji Depolama, Kuyu içi Dolgu Maddesi, Faza Değiştiren Maddeler, Isıl İletkenlik, Isıl Direnç

ABSTRACT
MSc THESIS

**INVESTIGATED THERMAL PROPERTIES OF DIFFERENT
GROUTING MATERIALS USED IN UNDERGROUND
THERMAL ENERGY STORAGE**

Metin Özer YILMAZ

DEPARTMENT OF CHEMISTRY INSTITUTE OF
NATURAL AND APPLIED SCIENCES UNIVERSITY OF
ÇUKUROVA

Supervisor : Prof. Dr. Halime Ö. PAKSOY

Year : 2005, Pages : 64

Jury : Prof. Dr. Halime Ö. PAKSOY
Prof. Dr. Serdar ÖZTEKİN
Assoc. Prof. Dr. Sultan GİRAY

Grouting or back-fill materials are used to seal the annulus between the borehole and heat exchanger loops in GSHP and UTES systems. Designing ground heat exchangers for these systems is dependent on thermal conductivity of the grouting and thermal resistance (R_b) of the borehole system. In this study, different grouting materials were tested in the experimental well model in the laboratory. In the experiments, the heat carrier fluid was circulated in U-pipe with different flowrate (l/s). Outlet (T_{wo}) and inlet (T_{wi}) temperatures in the U-pipe were measured at steady-state conditions. Temperatures were also measured in the borehole, in U-pipe and out of casing in the surrounding formation with thermocouples. The measurements were taken at regular intervals of 10 minutes. The duration of experiment was 25 hours. The thermal resistance and thermal conductivities of the bazalt grouting were determined using temperature measurements. Thermal resistance of borehole values were ranging from 0,012-0,576 (K/W) and thermal conductivity of system values were found 0,2-8,22 (W/mK). The effect of using PCM as grouting for the purpose of short term utilization of Borehole Thermal Energy Storage system were studied.

Key Words: Underground Thermal Energy Storage, Borehole of Grouting Material, Phase Change Material (PCM), Thermal Conductivity, Thermal Resistance

İÇİNDEKİLER	SAYFA
ÖZ.....	I
ABSTRACT.....	II
TEŞEKKÜR.....	III
İÇİNDEKİLER.....	IV
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	IX
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Termal Enerji Depolaması (TED).....	2
1.1.1. Duyulur ısı depolama.....	3
1.1.2. Gizli ısı depolama.....	3
1.1.3. Termokimyasal Enerji Depolama.....	5
1.1.4. Isı Depolama Sistemi.....	6
1.2. Yeraltında Termal Enerji Depolaması (UTES; Underground Thermal Energy Storage).....	7
1.2. Kuyularda Termal Enerji Depolaması (KTED).....	8
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	14
3. MATERYAL METOD.....	23
3.1. Materyal.....	23
3.1.1. Deney Düzeneği.....	23
3.1.1.1. KTED Modeli için Tank.....	23
3.1.1.2. Su Isıtıcısı.....	24
3.1.1.3. U-boru ve Kuyu boru.....	26
3.1.1.4. Sirkülasyon Pompası.....	26
3.1.1.5. Sıcaklık Ölçer (Data- Logger) ile Sıcaklık Ölçme Metodu.....	27
3.1.1.5.1 Model 107 Sıcaklık Algılayıcısı.....	27
3.1.1.5.2. Model 105T Sıcaklık Algılayıcısı.....	28
3.2. Deney Süresince Kullanılan Dolgu Malzemeleri.....	29
3.2.1. Bazalt.....	29

3.1.2.2. Parafin.....	30
3.1.2.3. Koko yağ asidi.....	30
3.1.2.4. Palm yağ asidi.....	30
3.1.2.5. Laurik asit.....	31
3.1.2.6. Palmitik asit.....	31
3.2. METOD.....	31
3.2.1. Isıl İletkenlik (λ) ve Isıl Direnç Hesabı (R_{sistem}).....	32
3.2.2. Faz Değişirici Maddelerin Karışımlarının Hazırlanması.....	35
3.2.2.1. Koko Yağ Asidi, Palm Yağ Asidi ve Parafin Karışımı.....	36
3.2.2.2. Laurik Asit ve Palmitik Asit Karışımı.....	36
4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	37
4.1. Bazalt Deneyleri.....	37
4.1.1. Doğal Bazalt.....	38
4.1.2. 0,0-4 mm tanecik boyutunda bazalt.....	42
4.1.3. 0,0-1 mm tanecik boyutundaki bazalt örneği.....	45
4.2. Su.....	49
4.3. Faz Değiştiren Maddelerin Kullanılması.....	51
4.3.1. Koko Yağı, Palm Yağı ve Parafin Karışımı.....	51
4.3.2. Laurik Asit ve Palmitik Asit Karışımı.....	53
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	55
KAYNAKLAR.....	58
ÖZGEÇMİŞ.....	64
EK 1 Data-Logger Dosyası için DLD Dosyası	
EK 2 DSC Analiz Grafikleri	

ÇİZELGELER DİZİNİ	SAYFA
Çizelge 2.1. Bentonite farklı dolgu malzemelerinin ilavesiyle λ (W/m,K) sonuçları.....	14
Çizelge 2.2. Çimentolu dolgu maddesinin farklı su ve çimento oranlarında ısı iletkenliği.....	16
Çizelge 2.3. Çimento tabanlı dolgu maddesine farklı katkı maddelerinin eklenmesi ile Dolgunu ısı iletkenliği	16
Çizelge 2.4. Farklı dolgu malzemelerinin kanal uzunluğuna etkisi	17
Çizelge 2.5. Farklı dolgu malzemelerinin λ ve R_b	17
Çizelge 2.6. Farklı boru tiplerinin kullanıldığı KTED sistemlerinde R_b değerleri.....	18
Çizelge 2.7. Dolgu malzemesi–normal yer altı formasyonu fiziksel özellikleri	19
Çizelge 2.8. IDT ve laboratuarda elde edilen λ (W/m,K) değerleri	21
Çizelge 3.1. Kullanılan TU-16A Model ısıtıcının özellikleri.....	25
Çizelge 3.2. U boru ve kuyu borunun özellikleri.....	26
Çizelge 3.3. Su sirkülasyon pompasının devir sayısı.....	26
Çizelge 3.4. Model 107 sıcaklık algılayıcısının özellikleri.....	28
Çizelge 3.5. Bazaltın Kimyasal Analizi.....	29
Çizelge 4.1 Bazaltın % Kütlice Artışı.....	38
Çizelge 4.2. Dolgu malzemelerinin $T_{girişort}$, $T_{çıkışort}$, Q_{ort} , $R_{sistemort}$, $R_{dolguort}$ ve λ_{ort}	51

ŞEKİLLER DİZİNİ	SAYFA
Şekil 1.1. Yeraltında termal enerji depolama teknikleri.....	7
Şekil 1.2. Açık döngülü KTED uygulaması	9
Şekil 1.3. Kapalı Döngü KTED sistemi	10
Şekil 1.4. KTED sistemlerinde kullanılan farklı geometrilerdeki boru kesitleri	10
Şekil 3.1. Kuyuda termal enerji depolama (KTED) modeli.....	24
Şekil 3.2. Su tankı ve KTED modeli.....	25
Şekil 3.3. Sıcaklık Ölçer (Data-Logger) CR10X.....	27
Şekil 3.4. Model 107 sıcaklık algılayıcısı.....	28
Şekil 3.5. Model 105T sıcaklık algılayıcısı.....	29
Şekil 3.6. x ,yönündeki ısı iletimi için ısı direnç gösterimi.....	33
Şekil 3.7. Kuyu kesiti ve ısı direnç şeması.....	33
Şekil 4.1. Doğal bazaltın kuru ısınma ve soğuma eğrileri.....	39
Şekil 4.2. Doğal bazaltın kuru ısınma sırasındaki Q ve R_{sistem} 'in zamanla değişimi.....	40
Şekil 4.3. Doğal nemli bazaltın ısınma ve soğuma eğrisi.....	41
Şekil 4.4. Doğal nemli bazaltın ısınma sırasındaki, Q ve R_{sistem} 'in zamanla değişimi.....	41
Şekil 4.5. 0,0-0,4 mm tanecik boyutunda bazalt örneğinin ısınma ve soğuma eğrileri.....	43
Şekil 4.6. 0,0-4 mm tanecik boyutundaki kuru bazalt'ın ısınma sırasındaki, Q ve R_{sistem} 'in zamanla değişimi.....	44

Şekil 4.7.	0,0-4 mm tanecik boyutunda nemli bazalt örneğinin ısınma ve soğuma eğrileri.....	45
Şekil 4.8.	0,0-4 mm tanecik boyutundaki nemli bazalt'ın ısınma Q ve R_{sistem} 'in zamanla değişimi.....	45
Şekil 4.9.	0,0-1 mm tanecik boyutunda bazalt örneğinin ısınma ve soğuma eğrileri.....	47
Şekil 4.10.	0,0-1 mm tanecik boyutundaki kuru bazalt'ın ısınma sırasındaki Q ve R_{sistem} 'in zamanla değişimi.....	47
Şekil 4.11.	0,0-1 mm tanecik boyutunda bazalt örneğinin nemli ısınma ve soğuma eğrileri.....	48
Şekil 4.12.	0,0-1 mm tanecik boyutundaki nemli bazalt'ın ısınma sırasındaki Q ve R_{sistem} 'in zamanla değişimi.....	49
Şekil 4.13.	Su örneğinin nemli ısınma ve soğuma eğrileri.....	51
Şekil 4.14.	Suyun ısınma sırasındaki Q ve R_{sistem} 'in zamanla değişimi.	51
Şekil 4.15.	Koko yağı, palm yağı ve parafin karışımlı dolgunun donma eğrisi.....	52
Şekil 4.16.	Laurik asit ve palmitik asit karışımının donma eğrisi.....	53

SİMGELER VE KISALTMALAR

TED	: Termal Enerji Depolama
CFC	: Kloroflorokarbon
PCM	: Faz Değiştiren Maddeler
UTES	: Yeraltında Termal Enerji Depolama
GSHP	: Yer Kaynaklı Isı Pompası
ATED	: Akiferde Termal Enerji Depolama
KTED	: Kuyularda Termal Enerji Depolama
IDT	: Isı Duyarlılık Testi
PVC	: Polivinilklorür
PE	: Polietilen
Q	: Enerji
m	: Kütle
C _p	: Özgül Isı
λ	: Isıl İletkenlik
R	: Isıl Direnç
T	: Sıcaklık
ΔT	: Sıcaklık farkı
T _a	: Akışkan Sıcaklığı
T _u	: U-borunun dış yüzeyinin sıcaklığı
T _{ki}	: Kuyu iç duvar sıcaklığı
T _{kd}	: Kuyu dış duvar sıcaklığı
T _{giriş}	: Giriş Sıcaklığı
T _{çıkış}	: Çıkış Sıcaklığı
IEA	: Uluslar arası Enerji Ajansı

1. GİRİŞ

Günümüzde bütün dünya enerji sorununa çözüm getirme çabası içine girmiştir. Kullanımdaki enerjinin mevcut durumunu devam ettirmek, sürdürülebilir bir kalkınma ve gelecek için, yeni ve yenilenebilir kaynakların etkili kullanımının şart olduğu artık bütün dünya tarafından kavranmaktadır. Bugün için günlük yaşantımızda enerji vazgeçemeyeceğimiz bir gereksinimdir. Artan nüfus, şehirleşme ve endüstrileşme enerji gereksiniminin daha da artmasına neden olmaktadır. Dünya enerji gereksiniminin %78 fosil yakıtlarla karşılanmaktadır. Fosil yakıtlar gün geçtikçe tükenmekte olup geri dönüşüm süreleri çok uzundur. Fosil yakıtların; çok uzun vadede yenilenmeleri, yanması sonucunda CO_x, NO_x ve SO_x gibi gazların emisyon şiddetlerinin artması, asit yağmuruna sebep olması, sera etkisini artırması, uçucu organik bileşikler ve radyoaktif maddeler açığa çıkarması ve ozon tabakasına zarar vermesi kullanımları sırasında meydana gelen olumsuz sonuçlardır.

Özellikle Türkiye gibi enerji gereksinimi gittikçe artan, ancak yerli kaynakları bu ihtiyacını karşılayamayacak olan ülkelerde enerjinin ithal edilmesi gerekmektedir. Bu durum ülkemizin her geçen gün biraz daha dışa bağımlı hale gelmektedir. Bu dışa bağımlılık yakın gelecekte Türkiye'nin siyasi ve ekonomik bakımdan güç kaybetmesine sebep olacaktır.

Enerji üretim ve tüketimindeki bu tablo araştırmacıları ekonomik, temiz ve çevreyle dost olan yeni ve yenilenebilir enerji kaynaklarını bulmaya itmektedir. Yeni enerji kaynakları arasında rüzgar, güneş, hidroelektrik, biyogaz ve jeotermal enerji sayılabilir. 1970 enerji krizi sonrası başlatılan çalışmalar, çevresel boyutların da devreye girmesi ile ivme kazanmıştır. Bu çalışmalar içinde, mevcut doğal kaynakları değerlendirmeye yönelik olarak, termal enerji depolama yoluyla kullanma yöntemleri önemli bir yer tutmaktadır. Enerji tasarrufunun ve verimliliğinin artırılması, yeni enerji kaynaklarının devreye sokulmasından daha ekonomiktir. Termal enerji depolama teknikleri (TED) ile kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtların kullanımını azaltıp, enerji verimliliğini artırarak dünyada artan enerji talebine alternatif çözümler getirilir. Dünyada geniş bir şekilde kullanılan bu sistemler Türkiye'de henüz yaygın bir kullanıma sahip değildir. Kısa süre içerisinde yapılan

çalışmalar sonucu, Termal Enerji Depolama (TED) Teknolojilerinin çevre ile dost ve ekonomik olduğunu gösteren uygulamalar hızla artmıştır (Andersson,1994; Andersson,1997; Andersson ve ark., 2000; Bakema,1998 ; He, Gustafsson ve Setterwall, 1998; Fieback ve Gutberlet, 1998; Kabus ve ark., 2000; Paksoy ve ark., 2000; Snijders ve Bakema, 1997; Wu, Ma ve Bink, 2000). Sadece Türkiye’de TED sistemlerinin kullanılmasıyla ülke genelinde fosil yakıtlardan sağlanacak %10 ‘luk tasarruf ile emisyonlarda beklenen azalma yılda en az 5,6 milyon ton CO₂, 18900 ton SO₂ ve 21600 ton NO_x olacağı tahmin edilmektedir. (Paksoy ve Evliya., 2000).

1.1. Termal Enerji Depolaması (TED)

Termal enerji bir maddeyi oluşturan atom veya moleküllerin kinetik ve potansiyel enerjilerinin toplamıdır. Atomik veya moleküler dönme, öteleme ve titreşim sonucu oluşur. Termal enerjinin aktarımı ısı akışıyla olur. Termal enerji depolama sistemleriyle ozon tabakasına zarar veren kloroflorokarbonlara (CFC) gereksinim duymadan doğrudan soğutma-ısıtma yapılabilir. Elektrik enerjisine duyulan gereksinim azalmakta ve elektriğe en çok ihtiyaç duyulan zamanlarda elektriğe aşırı yüklenme engellenebilmektedir. Böylece enerji santrallerine duyulan gereksinmeyi ve fosil yakıt kullanımını azaltarak çevreyi daha az kirleten çözümler sunmaktadır. Termal enerji depolaması kullanım süresine göre ikiye ayrılır. Bunlar kısa süreli depolama (gece-gündüz) ve mevsimlik depolama (yaz-kış)’dır. Kullanım sıcaklığına göre sıcak depolama, soğuk depolama ve her iki amaçlı olan sıcak ve soğuk depolama olarak belirlenmiştir. Uzun dönem TED ile temel olarak hedeflenen, yazın sıcaklığı koruyup kışın kullanmak, veya kışın soğukunu depolayıp yazın kullanmaktır. Termal enerjinin elde edilmesiyle kullanımı arasındaki zaman farkı enerji depolamasıyla kapatılabilir.

Termal Enerji Depolama yöntemleri ısı yöntem ve kimyasal yöntem olmak üzere ikiye ayrılır. Isıl yöntem duyulur ısı ve gizli ısıdan oluşurken, kimyasal yöntem tepkime ısısı, kimyasal ısı pompası ve termokimyasal ısı pompasından oluşur.

1.1.1. Duyulur ısı depolama

Duyulur ısı depolama yönteminde, ısı depolama materyalin sıcaklığındaki değişim sonucunda ortaya çıkan duyulur ısıdan yararlanır. Isı depolama sıvı, katı ve sıvı ile katının beraber olduğu hibrit materyallerde yapılabilir. Bu sistemde depolama ve geri kazanma süresince depolama materyalinin sıcaklığı değişir. Çok sayıda depolama ve geri kazanma çevriminin gerçekleşebilmesi bu sistemin avantajı, gereksinim duyulan depo hacminin büyük olması ise dezavantajdır

1.1.2. Gizli ısı depolama

Gizli ısı maddenin faz değişimi sırasında çevreden aldığı veya verdiği ısıdır. Gizli ısı depolama yöntemleri için gerekli depo hacmi duyulur ısıya göre daha küçüktür. Faz Değiştiren Maddeler (PCM, Phase Change Material) termal enerjiyi gizli ısı şeklinde depolayabilen maddelerdir. Isı depolama materyalinin iç enerjisinin önemli oranda değişmesi, bu materyalin faz değiştirmesine neden olur. Uygun sıcaklık sınırlarında, depolama materyalinin faz değiştirmesi ile ortaya çıkan gizli ısı depolanabilir. Isı depolama amacıyla, belirli sıcaklıklarda faz değişimlerine uğrayan ve gizli ısı değerleri yüksek olan materyallerden yararlanır. Isı depolamaya uygun faz değişimleri; katı-katı ve katı-sıvıdır. Sıvı-buhar faz değişimi, gaz fazın depolanmasının basınçlı depolama kaplarını gerektirmesi gibi karşılaşılan sorunlar nedeniyle ısı depolamaya uygun değildir. Katı durumdaki bir materyal kristalleşerek diğer bir katı faza dönüştüğünde (katı-katı değişimi), kristalleşme ısısı şeklinde ısı depolanır. Materyal ilk durumdaki katı fazına yeniden dönüştüğünde, faz değişimi sırasında da depolanan ısı da geri kazanılır. Katı-katı faz değişimi sırasında açığa çıkan gizli ısı miktarı azdır. Katı-sıvı faz değişiminde, diğer faz değişimlerine oranla daha az hacim değişimi gerçekleşir. Uygulamada hacimsel enerji depolama kapasitesi yüksek olduğundan sadece katı-sıvı veya kristalleşme ısısı yüksek olan katı-katı faz değişimleri pratik öneme sahiptir. Faz Değiştiren maddeler (PCM) inorganik ve organik olmak üzere iki alt gruba ayrılırlar.

İnorganik PCM' lere tuz hidratları ve klarat hidratları örnek verilebilir. İnorganik PCM' lerin avantajları; yüksek ergime ısısı, iyi termal iletkenlik, ucuz ve yanıcı olmamaları; dezavantajları ise korozif olmaları, aşırı soğuma göstermeleri, faz bozulması ve hidrat sayısında azalma şeklinde özetlenebilir.

Organik PCM'lere parafinleri ve yağ asitlerini örnek gösterebiliriz. Organik PCM'lerin avantajları; kimyasal yönden kararlı, az veya hiç aşırı soğuma göstermemesi, korozif ve toksik olamamaları, yüksek ergime ısısı ve düşük buhar basıncı göstermeleri, dezavantajları ise düşük termal iletkenlik, faz değişimi sırasında büyük hacim değişimi, yanıcı olmaları şeklinde özetlenebilir.

PCM' de termal enerji depolama uygulamaları çok çeşitli olmakla beraber en çok kullanılmayan alanları (Mazman, 2000; Özonur, 2004; Gök, 2005);

- Yapı malzemelerinde binaların ısıtma ve soğutma yükünün azaltılmasında,
- Fotovoltaik elementlerin soğutulması,
- Tekstil
- Ev ısıtma ve sıcak su
- Gıda
- Medikal alanda (kan üniteleri)
- Motorlu taşıtlar için ısı depolama sistemi
- Taze gıdaların depolanması
- Sıcaklığa duyarlı cihazların soğutulması

PCM'ler hem ısıtma hem de soğutma sistemlerinde uygulanabilir. Yapı malzemelerinin yalıtım ve ısı aktarım özelliklerini geliştirmek için kullanılacak faz değiştiren maddeler parafinler, yağ asitleri, ötektik karışımlar, yağ alkollerini neopentil glikol ve inorganik PCM'lerdir. Parafinik hidrokarbonlar, yağ asitleri ve yağ alkollerini düşük çözünürlüğe sahip maddeler olmakla birlikte su içerisinde hiç çözünmezler. Bu yüzden yapı malzemeleri uygulamaları için tercih edilirler. Erime entalpileri 150-220 kJ/kg arasında değişir.

1.1.3. Termokimyasal Enerji Depolama

Isı enerjisi kimyasal enerjiye dönüştürülerek uzun süre depolanabilir. Termokimyasal ısı depolamanın ilkesi; ekzotermik olarak tepkimeye girebilen iki veya daha fazla kimyasal bileşikte tersinir tepkimeler süresince kimyasal bağlarda ısı depolanmasına dayanır. Depolama sisteminin ömrü prensip olarak sınırsızdır. Kimyasal bağların tersinir olarak ayrışma ve birleşmesi sırasında, ısı değeri yüksek olan kimyasal tepkimeler gerçekleştiğinden, ısı depolama kapasitesi genellikle yüksektir.

Termokimyasal yöntemle ısı depolayan sistemler, gizli ısı depolama sistemlerinden daha karmaşıktır. Sistemdeki bileşenlerin kendi aralarındaki olası etkileşimleri önemlidir. Yöntemin en önemli özelliği seçilen tepkimenin tersinir olmasıdır. Termokimyasal yöntemle ısı depolama tersinir kimyasal tepkimeler, kimyasal ısı pompası (absorpsiyonlu ısı pompası) ve termokimyasal ısı borularında yapılabilir. Tersinir kimyasal tepkimelerle ısı depolamada; endotermik bir tepkime kullanılarak depolanan ısı, ekzotermik olarak geri kazanılır. Tepkime sıcaklığında oluşan tepkime ürünleri ayrı ayrı depolanır; ısı, ürünlerin tekrar karıştırılması ve gerektiğinde katalizör eklenmesiyle geri kazanılabilir.

Kimyasal ısı pompası, tersinir tepkimeler yardımıyla aralarında gaz bileşenin transfer edildiği iki alt sistemden oluşur. Kimyasal ısı pompası sistemlerinde, buhar yoğunlaşması ile açığa çıkan yoğunlaşma ısısı geri kazanılır.

Termokimyasal ısı borularında kullanılan tepkimelerde, kolay yoğunlaşmayan gaz durumdaki reaktifler bulunur. Isı enerjisinin, ısı borusuyla uzun mesafelere iletilmesi için tepkime ürünlerinden yararlanılır. Termokimyasal ısı borusuyla ısı depolama teknolojisi, yüksek sıcaklıkta nükleer veya güneş enerjisi uygulamalarında ve endüstriyel kazanlardaki damıtma çevrimlerinde uygulanmaktadır.

Güneş enerjisinin tersinir kimyasal tepkimelerle depolanması gelişme aşamasında olan yeni bir yöntemdir. Düşük sıcaklıktaki uygulamalar için kimyasal tepkimelerle ısı depolanmasına ilişkin önemli gelişmeler sağlanmış olmakla birlikte uygulamada karşılaşılan önemli sorunlar termokimyasal ısı depolama yönteminin yaygın olarak uygulanmasını sınırlandırmaktadır.

Adsorpsiyonlu ısı depolama sistemleri metal-alumina-silikat maddelerinden olan zeolitlerin gözenekli yapısından yararlanırlar. Nemli hava adsorban malzemenin bulunduğu yataktan geçirilerek su buharının adsorplanması sağlanır, kuru sıcak hava aynı yataktan geçirildiğinde su buharını desorbe edip soğuyarak çıkar. Bu işlem sırasında desorpsiyon ısı depolanmasını adsorpsiyon da ısının geri kazanmasının sağlamaktadır (Hauer, 2002).

1.1.4. Isı Depolama Sistemi

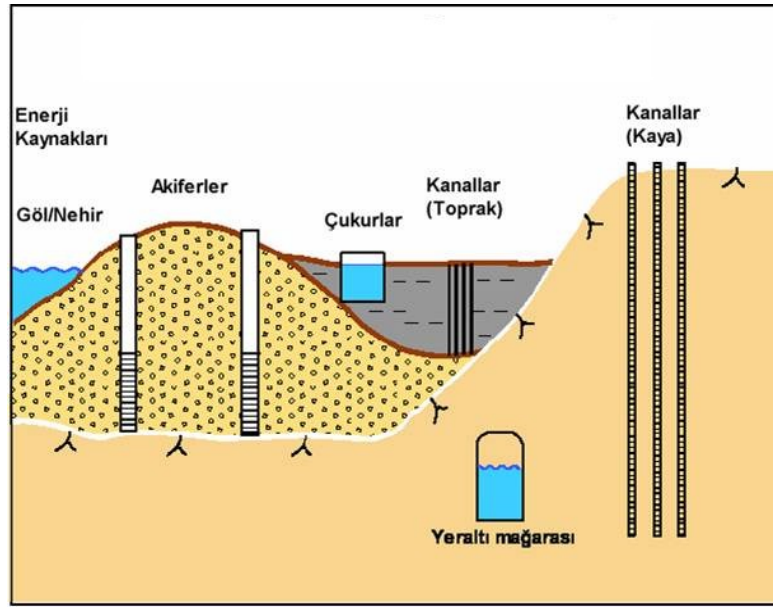
Isı depolama yöntemi seçimi esas olarak; ısı depolama süresi, ekonomik uygulanabilirlik ve işletme koşullarına bağlıdır. Herhangi bir uygulama için ısı depolama yönteminin belirlenmesi, ısı depolamanın etkinlik ve ekonomik olması sistemin tasarımına bağlıdır. Genel olarak, birim hacimdeki iç enerji değişiminin fazla olduğu ısı depolama materyallerinin kullanılması durumunda, ısı depolama için gerekli hacim azalır. Bir ısı depolama sisteminde bulunması gereken özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir (Özonur, 2004).

- Isı depolama materyalinin birim kütle veya hacmi için ısı depolama kapasitesi yüksek olmalıdır.
- Isı depolama materyali çalışma sıcaklığı aralığında uygun özelliklere sahip olmalıdır.
- Sistemde depolanan ısı bütünüyle geri kazanılabilmelidir.
- Isı depolama ve geri kazanma etkinliğinde azalma olmaksızın, çok sayıda depolama ve geri kazanma çevrimi gerçekleştirilebilmelidir.
- Isı depolama materyali korozyif, toksik etkili ve yanıcı özellikte olmamalıdır.
- Sistem ucuz ve kullanım süresi uzun olmalıdır.

1.2.Yeraltında Termal Enerji Depolaması (UTES; Underground Thermal Energy Storage)

Termal Enerji Depolaması yer altında gerçekleştirildiğinde Yeraltında Termal Enerji Depolaması (UTES; Underground Thermal Energy Storage) adını alır. Yer altı özellikle termal enerji elde edilmesi ve depolaması için çok uygundur. Yeraltının depo olarak kullanılması sırasında izolasyona gerek yoktur. Isı pompası ile beraber kullanıldığı zaman Yer Kaynaklı Isı Pompası (GSHP) adını alır.

Yeraltında TED uygulaması için pek çok teknik geliştirilmiştir (Andersson ve ark., 2000; Andersson, 1997). UTES teknikleriyle enerji tasarruf edilerek daha verimli kullanılır. Bu teknikler, klasik ısıtma/soğutma sistemlerine göre çevreyle daha uyumludur. Dünyada pek çok ülkede UTES tekniklerinin uygulamaları ve gelişimleri için araştırmalar devam etmekte; ve Uluslar arası Enerji Ajansı'nın çalışmalarıyla giderek yaygınlaşmaktadır (Nordell ve Sehlberg, 1994; Nordell, 1997; Nordell, 2000). UTES teknikleri deponun kullanım amacına ve depolama ortamına göre sınıflandırılır.



Şekil 1.1. Yeraltında Termal Enerji Depolama (UTES) teknikleri (Andersson ve ark., 2003b).

Depolama ortamı sadece su olduğunda; kaya oyuğu ve çukur depolaması yapılır. Depolama ortamı olarak hem toprağın, hem de suyun kullanılması halinde Akiferde Termal Enerji Depolama Sisteminde (ATED) gerçekleştirilir. Depolama ortamı yeraltındaki jeolojik formasyon olduğunda Kuyularda Termal Enerji Depolaması (KTED) yapılır. Sondajla açılan düşey veya yatay yer altı kuyusuna yerleştirilen uygun boru sisteminde ısı taşıyıcı akışkan dolaştırılarak termal enerji depolaması yapılır. UTES teknikleri içinde uygulamalar en çok, ATED ve KTED teknikleriyle yapılmaktadır. UTES teknikleri uygulanabilirliğinde yer altı jeolojik yapısı önemlidir. UTES teknikleri içerisinde özel bir jeolojik yapı gerektirmeyen tek sistem KTED uygulamasıdır.

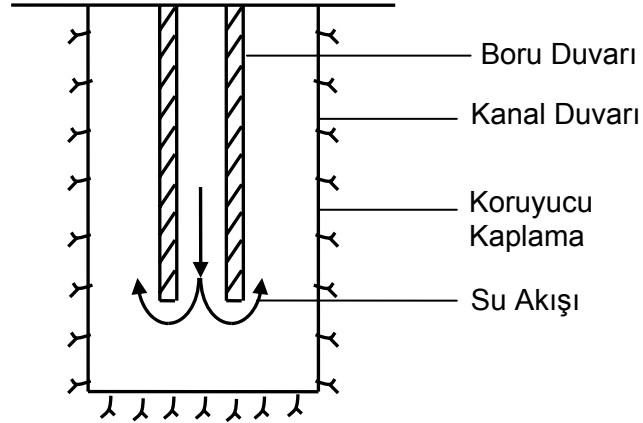
1.3. Kuyularda Termal Enerji Depolaması (KTED)

Kuyularda termal enerji depolamada yeraltına borular döşenerek, uygun bir ısı taşıyıcı akışkan ile depolama yapılır. Kuyular yatay veya düşey olarak kullanılabilir. KTED sisteminde kuyu bir ısı taşıyıcı akışkanla, etrafındaki jeolojik yapı arasında “ısı değiştiricisi” olarak kullanılır. Düşey KTED uygulaması için uygun bir sondaj tekniği kullanılarak bir kuyu açılır. Açılan kuyu içerisine ısı taşıyıcı akışkanın dolaştırılacağı bir boru sistemi yerleştirilir. Kuyu ve içindeki borular yeraltı ısı değiştiricisi olarak kullanılır. Yer altı ısı değiştiricileri ısı taşıyıcı akışkan ile yer altı jeolojik formasyon arasında ısı aktarımını sağlar.

KTED ısıtma, soğutma veya her iki amaçlı uygulanabilir. Her iki amaç için kullanılan KTED sistemlerinde ısıtma ve soğutma yüklerinin eşit olması istenir. KTED uygulaması sırasında depolama yapabilmek için ekonomik olabilecek, uygulama amacına göre, sıcak veya soğuk enerji kaynakları bulunmalıdır. Sıcak enerji kaynağı olarak güneş enerjisi, endüstriyel veya ısı pompası atık ısısı kullanılabilir. Soğutma amaçlı KTED kaynağı olarak ise kış ortam havası, soğuk yüzey suları (göl, nehir vb.) veya ısı pompası kullanılabilir. Depolanan enerjiler binaların ısıtma ve soğutmalarında kullanılabilir.

KTED açık veya kapalı döngülü sistem olarak uygulanabilir. Açık döngülü KTED sistemlerinde, ısı taşıyıcı akışkan kanalla doğrudan temas halindedir. Akışkan

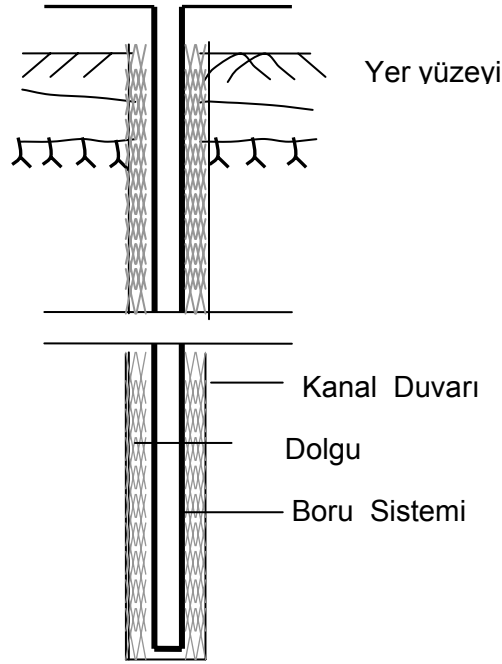
ve kayacın doğrudan temasından dolayı su kimyası önem teşkil eder. Isı değiştircilerinde, çökelmelerden kaynaklı kabuklaşma veya korozyon problemleri olabilir. Açık sistemin avantajı ise, yer altı yapısı ve ısı taşıyıcı akışkan arasında iyi bir ısı transferi gerçekleşmesidir.



Şekil 1. 2. Açık döngülü KTED uygulaması (Dikici, 2004)

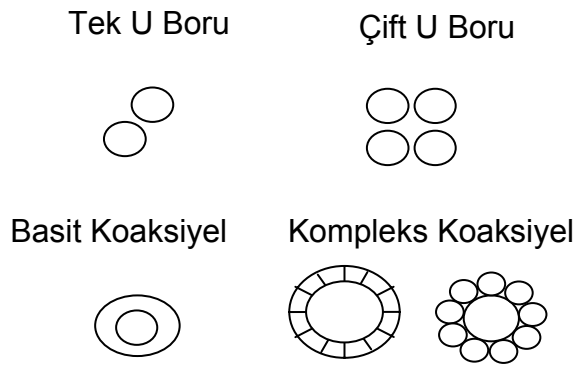
Kapalı döngü KTED sistemlerinin, uygulamaları açık sistemlere göre daha yaygındır. Genellikle kuyuya bir veya birden fazla U boru yerleştirilir.

En çok kullanılan boru tipi U borudur. Uygulama amacına yönelik sıcaklık aralığındaki ısı taşıyıcı akışkan, boru sisteminde pompa vasıtasıyla kapalı döngüde dolaştırılır. Böylece akışkan yeraltını ısıtırken (soğuturken), kendisi soğuyarak (ısınarak) kanaldan dışarı çıkar. Tekrar ısıtılmak (soğutulmak) üzere bir ısı değiştircisinden geçirilir. Isınan (soğuyan) akışkan tekrar yeraltına yollanır. Isı taşıyıcı akışkan seçimi, çalışma sıcaklık aralığına bağlı olarak yapılır. Genellikle su veya farklı yüzeylerde alkol-su karışımları kullanılabilir. Kapalı KTED sistemleri açık KTED sistemlerine göre daha az ısı transferi gerçekleşir.



Şekil 1.3. Kapalı Döngü KTED sistemi (Dikici, 2004)

Düşey yer altı kanallarında farklı geometrilerde borular kullanılabilir. Kullanılan borular genellikle basınca dayanıklılığı yüksek olan yüksek yoğunluklu polietilen borulardır. En yaygın uygulaması tek U boru tipidir. Çift U boru veya koaksiyel borular da kullanılabilir. Şekil 1.4’de farklı geometrilerdeki boru kesitleri verilmiştir (Dikici, 2004).



Şekil 1.4. KTED sistemlerinde kullanılan farklı geometrilerdeki boru kesitleri (Dikici, 2004)

Termal Enerji Depolama Sistemlerinde yeraltında kuyularda depolamada düşey ısı değiştiricisi ile toprak arasındaki ısı aktarımını artırmak için dolgu malzemesi kullanılır. Dolgu malzemesi U boru ve yer altı kuyusu arasında kalan boşluklara yerleştirilir. Termal iletkenliği yüksek olan dolgu malzemesi kullanılarak sistemin termal performansı artırılabilir. Böylece daha iyi bir ısı transferi sağlanmış olur. Bazı KTED sistemlerinde dolgu malzemesi olarak yer altı suyundan yararlanılmaktadır. Genellikle İsveç KTED sistemlerinin sert kaya içindeki kanallar sondaj yapıldıktan sonra yeraltı suyu ile kendilinden dolabilmektedir (Gehlin ve Hellström, 2000). Kuyu derinliği; yerel iklim, ısı pompası, soğuk ve sıcak depolama ve jeolojik formasyon tipine bağlıdır. Yeraltındaki ısı değiştiricisinin, akışkan ve toprak arasındaki ısı akışı için minimum dirençte ve minimum uzunlukta olması istenir. Isı değiştirici etrafındaki dolgu malzemesinin seçimi sistemin performansı ve ekonomik bakımdan büyük bir etkiye sahip olabilir. Böylece daha iyi bir ısı transferi sağlanmış olur (Remund ve Lund, 1996; Kjellson ve Hellström, 1997). Yüksek termal performans gerekli kuyu derinliği ve boru uzunluğunu azaltacağından, sistemin yatırım maliyeti de düşecektir.

Dolgu malzemesi kullanımının sebepleri;

- Sondaj sırasında yüzeyden gelebilecek kirlilikleri engellemek.
- Akifer içindeki suyun göçmesini engellemek.
- Koruyucu kaplama boyunca olan sızıntıyı engellemek; artezyen formasyonunun hidrolik özelliklerini korumak.
- Plastik kuyu kaplama yapıldığında yapısal dayanıklılık sağlamak.
- Koruyucu kaplamalardaki eksiklikler ya da aşınmalara karşı korumak.

İyi bir dolgu malzemesinin özellikleri ise aşağıdaki gibi olmalıdır (Gaber ve Fisher, 1988).

- Suyun akışına direnmek için düşük geçirgenliğe sahip olmak.
- Sıkı bir şekilde yarıkları doldurmak için hem koruyucu hem de kuyu duvarı ile bağlanabilmelidir.
- Formasyon malzemesi veya yeraltı suyu bileşenleri ile kimyasal olarak inert olmalıdır.
- Kolayca karışmalıdır.

- Kıvamı (yoğunluğu) pompalanacak düzeyde olmalıdır.
- Pompa ekipmanından kolayca temizlenebilmelidir.
- Minimum düzeyde güvenilir ve zararsız olmalıdır.
- Ucuz olmalıdır.
- Geçirgen bölgelere girmelidir.
- İyi bir ısı transferi için yüksek bir termal iletkenliğe (λ) sahip olmalıdır.

Yüksek nem içeren kil tabanlı materyallerin ısı transfer kapasiteleri hakkında az bilgiye sahip olunmasına rağmen bentonit dolgu maddeleri GSHP ve UTES sistemlerinde dolgu malzemesi gibi kullanılır. Bu amaçla birçok uygulamada bentonit kullanılmaktadır. Bentonitin yüksek derecede koloidal (10^{-7} ila 10^{-4} cm çapları arasında değişen ve çıplak gözle görülemeyen partiküller) özellikler göstermesi, suya karşı ilgili olup şişme yapması, fakat büzülmemesi, çok küçük taneciklerinin orijinal hacminin 10 – 20 katına çıkabilmesi dolgu malzemesi olarak seçilmesindeki başlıca nedenlerdir. Bentonit, volkanik kül veya tüf gibi, camsı volkanik gerecin kimyasal ayrışmasıyla ve bozuluşuyla ortaya çıkan ve son derece küçük kristaller halindeki kil minerallerinden (başlıca montmorillonit grubu) oluşan ve büyük ölçüde kolloidal silisten ibaret, yumuşak, şekillenebilir, gözenekli ve açık renkli bir kayadır. Kimyasal formülü $Al_4 Si_8 O_{20} (OH)_4.nH_2O$, özgül ağırlığı 2.7-2,8 g/cm^3 tir (www.mta.gov.tr)

Son yıllarda yapılan çalışmalar da bentonit dolgu maddesinin düşük termal iletkenliğe sahip olmasından dolayı dolgu maddesi içindeki oranı azaltılarak, çimento tabanlı dolgu maddeler kullanılmaya başlanmıştır. Sistemin etkinliğini artıracak, ucuz ve kolay bulunabilir yeni bir dolgu maddelerine ihtiyaç vardır.

Bu çalışmada, laboratuarda hazırlanan kuyu modelinde farklı dolgu malzemesi karışımları denenecektir. Dolgu karışımlarında daha önce denenmemiş olan ve ülkemizde zengin kaynakları bulunan bazalt kullanılacaktır. Kullanılan dolgu maddelerinin tanecik büyüklükleri ve termal özellikleri araştırılacaktır. Isıl direnç, ısıl iletkenlik, uygulanabilirlik ve ekonomik açıdan en uygun olan dolgu malzemesi

önerilecektir. Ayrıca, dolgu malzemesi olarak faz değiştiren maddeler kullanılarak KTED sistemlerinden kısa süreli termal enerji depolama olanakları araştırılacaktır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Remund ve Lund KTED (1996) sistemleri için ısı iletkenliği artırıcı bentonit dolgu maddeleri kullanmışlardır. Isıl iletkenlik bentonit yüzdesinin bir işlevi gibi kullanılmış olup eklenen katkı maddelerinin yüzdelerinin çeşitli oranlarda bentonit ile karıştırıp ve katkı maddelerinin ısı iletkenlik üzerinde etkilerini incelemişlerdir. Bentonitin ısı iletkenliği 0,7-08, W/mC arasındadır ve buradaki KTED sistemlerinde kullanılan sondaj çamurunun iletkenliğinden 2 –3 kez daha düşüktür. Kuvartz, kum, mika ,kil ve demir eklendiğinde ısı iletkenlik %10-%70 oranında artmıştır. İlave edilen maddelerin karışım yüzdeleri %3-36 Bentonit + %70 ilave su veya %3-36 bentonit + % 50 ilave su şeklindedir. Sonuçlar Çizelge 2.1 de verilmiştir. Bentonitin %36'dan fazla kullanıldığında dolgunun vizkositesinin arttığı ve akmadığı gözlenmiştir. Ayrıca kilin karışıma %30'dan fazla konmaması önerilmiştir. Karışıma %50 kil ilavesinde aşırı kalınlaşma olduğunu belirtmişlerdir (Çizelge 2.1.).

Çizelge 2.1. Bentonite Farklı Dolgu Malzemelerinin İlavesiyle λ (W/m,K) Sonuçları (Remund ve Lund, 1996)

Temel Dolgu %	İlaveler (% ağırlık)	Isıl İletkenlik
Saf Bentonit	-	0,75
Bentonit (3-36)	Kuvars % 70	2,35
	Kum % 70	1,79
	Kireç taşı % 70	1,56
	Demir cevheri % 70	1,46
Bentonit (3-36)	Kuvars % 50	1,65
	Kum % 50	1,35
	Kireç taşı % 50	1,26
	Demir cevheri % 50	1,17
	Kil % 50	1,13

Remund (1999) tarafından yapılan laboratuvar ve saha çalışmalarında, açılan kuyulara U boru üç farklı konfigürasyonda yerleştirilip, kanal ısı direnci belirlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçlarından kuyunun ısı direncinin kuyu çapı, U

borunun dış çapı, dolgu malzemesinin ısı iletkenliği ve kuyudaki U boru konfigürasyonu ile olan ilişkisi gösterilmiştir. Saha çalışmaları sonuçlarında ise dolgunun ısı iletkenliğinin 0,74 - 1,47 (W/mK)'e artması ile toplam direncin %15,3-19,5 azaldığı tespit edilmiştir (Remund, 1999).

Farklı iki kuyuda soğutma ve ısıtma saha çalışmaları yapılarak yerin ısı iletkenliği hesaplanmıştır. Bunun için yerin ısı özelliklerini önceden bildiren bir deneysel cihaz yapılarak sıcaklık verileri alınmıştır. Saha çalışmalarının sonuçları laboratuvar sonuçlarıyla uyum içindedir. Isı iletkenlik, λ ısıtma ile yapılan deneylerde soğutma ile yapılan deneylere göre daha yüksek bulunmuştur. Bu farklılık yeraltındaki doğal konveksiyon ısı aktarımına bağlanmıştır. Ayrıca sonuçlar iki boyutlu sonlu elemanlar modeli ile elde edilen parametrelerle de karşılaştırılmıştır (Witte ve ark., 2002).

Standart bentonit ve termal olarak iyileştirilmiş dolgu malzemelerini karşılaştırarak Yer altı Termal Enerji Depolama sistemlerinin performansı ve kuyu uzunluklarına etkisini incelemişlerdir. Isı transfer hızının artırılması sistem fiyatını ve dolayısıyla kuyu uzunluğunu kısaltır. Isı transfer hızındaki anlık % 10'luk artış dolgu ile dolu kuyuda toplam ısı transferinde % 25'lik artışa neden olmuştur (Carlson, 2000).

KTED sistemlerinin tasarımı nda çimento lu dolgu malzemelerinin etkileri ve ısı iletkenlikleri araştırılmıştır. Dolgu malzemelerinin ısı iletkenlikleri, ısı iletkenlik cihazı ile tespit edilmiştir. Laboratuvar çalışmasında dolgu olarak silika kum, bentonit, plastikleştirici, silikon karpit ve farklı oranlarda su ve çimento karışımı kullanılmıştır. Bu malzemelerin farklı karışımlarından hazırlanan dolgu malzemelerinin ısı iletkenliklerinin 1,7-3,3 (W/mK) arasında olduğu bulunmuştur. Silikon karpit tabanlı dolgunun Isı iletkenliği 2,725-3,302 (W/mK) arasında bulunmuştur. Silikon karpitin yüksek ısı iletkenliğine rağmen pahalı oluşu ve dolgunun sağlamlığına olumsuz etkisinden dolayı önerilmemektedir. Silika kumun ekonomik bakımdan kullanılabilir bir katkı maddesi olduğunu bulmuşlardır. (Allan ve Kavanaugh, 1999).

Çizelge 2.2. Çimentolu Dolgu Maddesinin Farklı Su ve Çimento Oranlarında Isıl İletkenliği (Allan ve Kavanaugh,1999)

Dolgu Malzemesi	Su/Çimento oranı	Termal iletkenlik (λ) W/(m.K)		% Kütle kaybı
		Nemli	Kuru	
Çimento+Superplastikleştirici	0.40	0.868	0.706	5.4
Çimento	0.60	0.836	0.585	12.7
Çimento	0.80	0.803	0.456	22.2

Çizelge 2.3. Çimento Tabanlı Dolgu Maddesine Farklı Katkı Maddelerinin Eklenmesi ile Dolgunu Isıl İletkenliği (Allan ve Kavanaugh,1999).

Dolgu Malzemesi	Su/Çimento oranı	Katkı maddesi/ Çimento oranı	Termal iletkenlik (λ) W/(m.K)		% Kütle kaybı
			Nemli	Kuru	
Silika Kum	0.45	1.2	1.731	1.605	3.3
Silika kum	0.45	2.0	2.394	2.265	1.7
Silika kum	0.75	2.0	2.161	1.491	7.7
Saf silikon karpit	0.45	1.1	2.725	2.147	3.2
Saf Alüminyum oksit	0.45	1.3	2.075	1.794	3.2
Saf olmayan alüminyum oksit	0.45	1.9	2.318	2.128	2.9

KTED sistem maliyetine farklı dolgu malzemeleri kullanılmasının etkileri Spilker tarafından farklı çaplardaki dört adet düşey kuyuda yapılan çalışmalarda araştırılmıştır. Standart bentonit kullanıldığında sistemin yatırım maliyetinin arttığı görülmüştür. Standart bentonitin yerine ince kum kullanılması halinde, gerekli kuyu (0,16 m çap için) derinliğinin %49 daha az olabileceği bulunmuştur. Kullanılan yer altı ısı değiştiricisi boru uzunlukları böylece daha kısa olabilmektedir (Çizelge 2.4.) (Spilker, 1998).

Çizelge 2.4. Farklı Dolgu Malzemelerinin Kanal Uzunluğuna Etkisi (Spilker, 1998)

Kanal Çapı (cm)	Dolgu Malzemesi	Kanal Derinliği (m)
16.51	İnceltirilmiş Kum	195
12.07	Isıl olarak zenginleştirilmiş Bentonit	215
12.07	Standart Bentonit	267
16.51	Standart Bentonit	290

Isıl iletkenliği belirlemek için Halifax'ın Novascotia şehrinde bir saha çalışması yapılmış olup, termal iletkenlik, (λ) 2,39 W/mK ve yaklaşık olarak ısı direnç, (R_b) 0,06 K(W/m) bulunmuştur. Elde edilen sonuçlar o bölgenin kayaç yapısının ısı özellikleriyle karşılaştırıldığında daha düşük oldukları görülmüştür. Akışkan olarak %60-%40 glikol karışımı kullanılmıştır (Cruickshanks ve ark, 2000).

Belçika'nın Mol kentinde yer altı kaynaklı ısı termal iletkenlik ve direnç testleri yapılmıştır. 3 farklı ısı duyarlılık cihazı ile birkaç metre aralıklarla aynı jeoloji formasyonunda açılan 30,5 m derinliğinde açılan çift U boru kullanılan 3 kuyuda farklı dolgu maddeleri denenmiştir. Elde edilen sonuçlar Çizelge 2.5'te verilmiştir. (Sanner ve Mands, 2000).

Çizelge 2.5. Farklı Dolgu Malzemelerinin λ ve R_b (Sanner ve Mands, 2000).

Dolgu Malzemesi	Groenholland	UBEG	LTW
Kum	$\lambda=2,47$ W/mK $R_b=0,06$ K/(W/m)		$\lambda=2,47$ W/mK $R_b=0,05$ K/(W/m)
Kum	$\lambda=2,40$ W/mK $R_b=0,1$ K/(W/m)		$\lambda=2,51$ W/mK $R_b= ?$
Bentonit	$\lambda= 1,86$ W/mK $R_b=0,08$ K/(W/m)	$\lambda=2,48$ W/mK $R_b=0,13$ K/(W/m)	

Büyük binalarda kullanılan KTED'ler için Almanya'da ısı duyarlılık testi yapılmıştır. Bunun için Mobil test cihazı kullanılmış olup belirli jeolojik formasyonlarda ısı iletkenlik ve direnç hesabı yapmışlardır (Sanner ve ark., 2000).

Kjellsson ve Hellström kuyu sisteminde kullanılan farklı tipteki ve geometrideki boruların yüksek akışkan sıcaklıklarının (15-45°C) ve ısı akısının (40-90 W/m) kuyunun ısı direncine etkilerini görebilmek ve KTED sistemlerini ticari açıdan uzunluğunu ve büyüklüğünü belirlemek için bir laboratuvar modelinde çalışmışlardır. Akışkan olarak %25'lik propilen glikol kullanılmıştır (Kjellsson ve Hellström, 1997).

İsveç'te kanalda depolama sistemlerinde farklı konfigürasyondaki U borular ile ısı duyarlılık testi yapılmıştır. Kanal depolama sistemlerin ısı direncini ve ısı iletkenliğini ölçerek aynı dolgu malzemesiyle yapılan laboratuvar örneklerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Çift U boru sisteminin ısı direnci tek U borulu sisteme göre genel olarak yaklaşık %50 daha düşük bulunmuştur. Hesaplamalarda sabit ısı akısı modelini kullanmışlardır (Çizelge 2.6.) (Gehlin ve Hellström, 2000).

Çizelge 2.6. Farklı Boru Tiplerinin Kullanıldığı KTED Sistemlerinde R_b Değerleri (Gehlin ve Hellström, 2000).

Yapı Şekli	Laboratuvar- R _b (K/(W/m))	IDT- R _b (K/(W/m))
Tek U borulu KTED	0,052-0,065	0,056
Çift U borulu KTED	0,026-0,038	0,025
Açık sistem KTED	-	0,015

Saha çalışmalarında farklı dolgu malzemeleri ve farklı çapta boru konfigürasyonları kullanarak; kanal çapı, dolgu miktarı ve dolgunun termal iletkenliğinin Yer altı termal enerji depolama sistemlerinde ilişkisini incelenmiş ve uygun fiyatla etkin sistemler yapmak için ısı performans testleri yapılmıştır (Simith ve Perry, 1999)

ABD'de Yer altı termal enerji depolama sistemlerinde sistemlerinin tasarımında dolgu kullanımı için belirli düzenlemeler getirilmiştir. Bu

düzenlemelerin amacı yer altı suyunun kalitesini korumaktır. Kullanılan dolgu malzemeleri yüksek dayanımlı bentonit-çimento karışımıdır (Karen, 2000).

Saha çalışmalarında toprağın ısı özelliklerini tespitinde yeni bir model geliştirilmiştir. Tek boyutlu nümerik ısı transfer modeline dayanan metot ile kanalın ısı iletkenliği ve toprağın ısı direncini hesaplamışlardır. Bu metod ile yapılan hesaplamalar kısa süreli voltaj değişimlerinden kaynaklanan ısı akısındaki oynamalardan etkilenmemektedir. Isıl direnç hesaplanmasında dolgu malzemesinin ısı direnci hesaba katılmamıştır (Shonder ve Beck, 2000).

Saha çalışmalarında kuyuların ısı direnç hesaplamalarında sabit ısı akısı modeli kullanmışlardır. (Beier ve Smith, 2002).

KTED uygulamalarında sistem performansını arttırmak için dolgu malzemeleri kullanmışlardır. U boru olarak bakır seçilmesinin sebebi ısı direncinin oldukça düşük olması ve U boru içindeki akışkan sıcaklığıyla boru yüzeyindeki sıcaklık farkının çok az olabilmesidir. Dolgu malzemesi olarak bentonit-kum ve bentonit-toz bakır-su karışımları kullanılarak kuyunun ısı performansını incelemişlerdir. Bakırın küçük tanecikli yerine daha büyük bakır taneciklerinin kullanılmasıyla sistem performansının artırılabilceğini belirtmişlerdir (Gu ve O'Neal, 1998).

Gu ve O'Neal (1998), % 12.5 bentonit + % 25 kum + % 62.5 su karışımını dolgu malzemesi olarak denemişlerdir (Çizelge 2.7.). Dolgu malzemesi olarak bahsedilen karışımın ısı iletkenliği ve özgül ısı daha yüksektir.

Çizelge 2.7. Dolgu Malzemesi –Normal Yer Altı Formasyonu Fiziksel Özellikleri(Gu ve O'Neal 1998).

Fiziksel Özellikler	Yer altı toprak örneği	Dolgu malzemesi
Isıl İletkenlik (W/m,K)	1.3	1.6
Özgül Isı (J/kg,K)	2079	3960
Yoğunluk (kg/m ³)	1695	1092

Çimento dolgu malzemelerinin ısı özelliklerini arttırıcı laboratuvar çalışması yapmışlardır. Dört farklı karışımlarda dolgu örnekleri test edilmiş olup, bunların ısı

iletkenliğini deneysel ve teorik olarak ısı direncini hesaplamışlardır. Çimentolu dolgu malzemelerinde yüksek miktarda su bulunması pompalanabilmesini kolaylaştırır. Fazla çimento kullanımı dolgunun geçirgenliğini artırırken, dayanıklılık ve iletkenliğini azalttığını bulmuşlardır (Kavanaugh ve Allan, 1999).

Aynı koşullarda tasarlanan aralarında 30 m mesafe bulunan, iki adet 160 m derinliğinde 0,152 m çapında KTED’de elektrikli ısıtıcı kullanarak ısı duyarlılık test (IDT) deneyleri yapılmıştır. İki kuyunun açıldığı bölgede yer altı suyu akışı yoktur. Dolgu malzemesi olarak bentonit yerine kuvarz-kum kullanılmıştır. Deney sonuçları birbirinden % 10 farklıdır. Deney süresi 5,5 gün olan kanalda λ ve R değerleri sırasıyla 3,0 W/m,K, 0,088 K/(W/m) iken, test süresi 6,5 gün olan kanalda λ ve R değerleri 3,0 W/m,K, 0,104 K/(W/m) dir (Pahud, 2001).

Hollanda firması Groenholland tarafından ısı pompalı IDT cihazıyla deneyler yapılmıştır. Deneyler genellikle GSHP tasarım veya uygulama bölgelerinde gerçekleştirilmiştir. Londra’da bir kilisenin GSHP ile ısıtma-soğutma tasarımı için açılan iki adet 50 m’lik kuyuda ısı yollanarak (33,2 W/m) ve çekilerek (-27,2 W/m) deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları; jeolojik örneklerle yapılan laboratuvar deneyleri ve tablo değerleriyle kıyaslanmıştır. Hem laboratuvar hem de tablolardan elde edilen λ sonuçları, IDT deney sonuçlarından daha düşük bulunmuştur. Toprak profillerinde su tabakasına rastlanmamıştır. Beklenen ısı iletkenlik 0,8 W/m,K iken, IDT’yle sırasıyla 1,38 ve 1,43 W/m,K iletkenlik değerleri elde edilmiştir. Sonuçların bu şekilde yüksek çıkması KTED yatırım maliyetini % 25 azaltır. Temelde aynı olan iki kanalın IDT sonuçları farklıdır. Bu durum; ısı iletkenliğinin yüksek olduğu kanalın nemle doymuş toprak yapısında olmasıyla açıklanmıştır (Dikici, 2004; Pahud, 2001).

Lulea’da farklı tipteki boruların kullanıldığı; yeraltı suyu ile kendiliğinden dolmuş ve dolgulu KTED sisteminde elde edilen λ (W/m,K) değerleri verilmiştir. Kanallar 63 m derinliğinde ve 0,15 m çapındadır. Normalde yer altı suyu ile dolan kanallardan biri doğal taşınım etkisini araştırmak için kumla doldurulmuştur. Böylece yeraltı suyu ile oluşan doğal taşınım etkisi kaldırılmıştır. Yeraltı suyu ile dolu olan, tek U borulu KTED ve çift U borulu KTED için λ (W/m,K) değerleri eşit bulunduğu halde, tek U borulu dolgulu KTED için daha düşük olan 3,45 (W/m,K) elde edilmiştir (Dikici, 2004). Laboratuvarında aynı kanaldan alınan sondaj

örneğiyle yapılan deneylerden elde edilen ortalama değeri ise IDT sonuçlarından daha düşüktür (Çizelge 2. 8.) (Nordell, 1994a).

Çizelge 2.8. IDT ve Laboratuarda Elde Edilen λ (W/m,K) Değerleri (Nordell, 1994a).

Boru –Test Tipi	Dolgu Malzemesi	λ (W/m,K)
Tek U -IDT	Yeraltı suyu	3,62
Çift U -IDT	Yeraltı suyu	3,62
Tek U-IDT	Kum	3,45
Sondaj Örneği-Laboratuar	-	3,4

Düşük sıcaklıkta (0-120°C) faz değiştiren organik ve inorganik maddelerle ilgili günümüze kadar yapılan 261 araştırma yapılmıştır (www.fskab.com/annex17, 2003). Organik maddeler olarak parafinler, yağ asitleri ve karışımları kullanılmıştır. İnorganik maddeler olarak tuz hidratları ve karışımları kullanılmıştır

Organik bileşiklerde depolamada gerekli depolama hacminin fazla olması gibi bir dezavantaj olsa da, bileşimlerini değiştirmeden eğrime, kendi kendine kristalleşebilme, aşırı soğumadan donabilme ve geleneksel tasarım modelleriyle uygun olarak kullanabilme gibi üstünlüklerinden dolayı bu konudaki çalışmalar daima zorunlu ve ilgi çekici olmuştur (Mazman, 2000). Parafinler düşük sıcaklıktaki uygulamalar için kullanılabilen organik kimyasallardandır. Ancak pahalı oluşu ve ihtiyaç duyulan her sıcaklık aralığına uygun parafinlerin bulunmaması gibi dezavantajlara sahiptirler (Heine ve Abhat, 1978).

Türkiye’de PCM depolaması sistemi 180 m²’lik bir serayı ısıtmak için denenmiştir. Güneş enerjisi 6000 kg parafin içeren tank içinde mevsimlik olarak depolanmıştır (Baştencilik, Paksoy ve Öztürk, 1996).

Isı depolama uygulamaları için uygun organik PCM materyallerinin faz dengeleri araştırılmış ve bu PCM’lerin absorpsiyonlu ısı pompalarının daha verimli çalışabilmesi için nasıl kullanılabileceği konusunda bir fizibilite çalışması yapılmıştır (Martin, 2002).

Bina elementlerinde kullanılan çoğunlukla parafin ve tuz hidratının gözenekli bir yapıya absorpsiyonu sonucu elde edilen faz değiştiren maddelerin termal

depolama performansları simülasyon ile analiz edilmiştir. Bu simülasyon ile faz değiştiren depolama elementleri için matematiksel bir model tanımlanmıştır (Kitano ve ark., 2002).

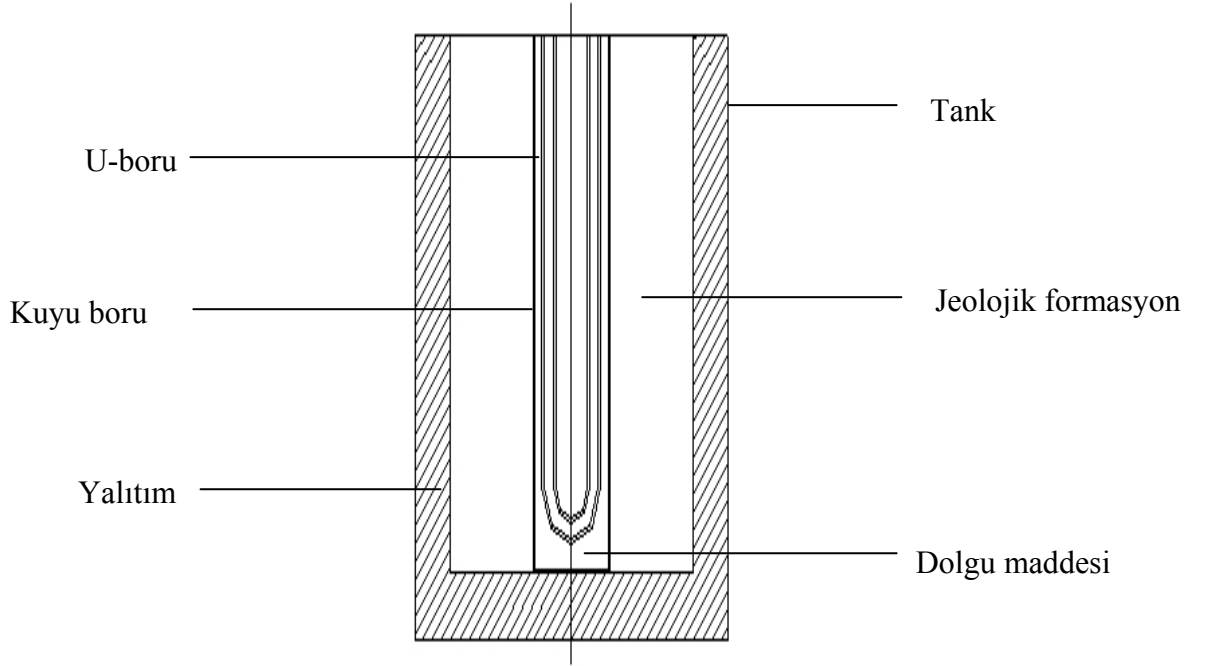
3. MATERYAL VE METOD**3.1 MATERYAL**

Deney süresince kullanılan malzemeler; bir polietilen U-boru, kuyu olarak kullanılacak PVC boru, sisteme sabit sıcaklıkta su gönderilmesi için tank ve sirkülasyon pompası, kuyu termal enerji depolama (KTED) modeli için tank, kuyu içindeki farklı bölgelerdeki sıcaklıkların ölçülüp kaydedilmesi için sıcaklık ölçer (Data-Logger) ve seziciler kullanılmıştır.

Deneyisel çalışmada dolgu maddesi olarak farklı tanecik büyüklüğünde bazalt minerali kullanılmıştır. Ayrıca dolgu malzemesi olarak faz değiştiren maddeler kullanılarak düşük sıcaklıkta KTED sistemlerinde kısa süreli termal enerji depolama denenmiştir.

3.1.1. Deney Düzenegi**3.1.1.1. KTED modeli için tank**

Deney düzeneginin kesiti Şekil 3.1. de ve üç boyutlu görüntüsü Şekil 3.2.'de verilmiştir. KTED modeli için bir kenarı 0.44 m olan küp şeklinde metal bir tank kullanılmıştır. Tankın dış yüzeyi cam yünü ile yalıtılmıştır. Tank içinde bir adet U boru ve U borunun yerleştirileceği bir adet kuyu boru kullanılmıştır.



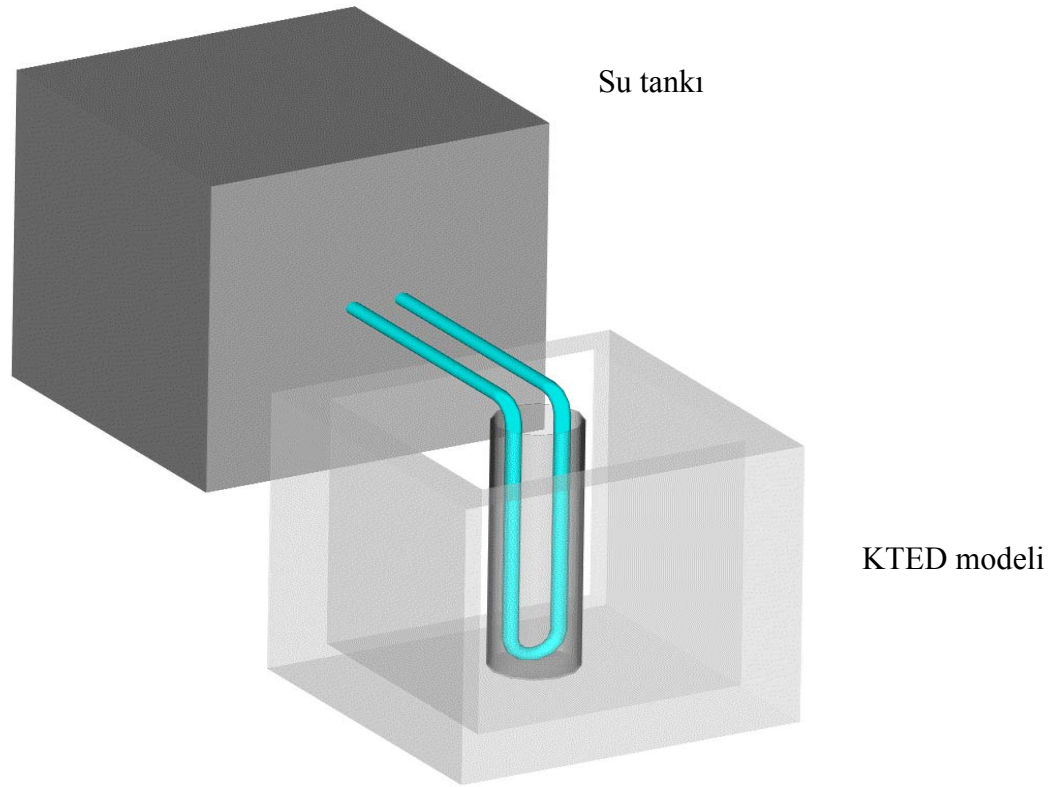
Şekil 3.1. Kuyuda Termal Enerji Depolama (KTED) modeli kesiti

3.1.1.2. Su Isıtıcısı

Su ısıtıcısı $0.50 \times 0.51 \times 0.57 \text{ m}^3$ hacminde metal bir tanktır. Tanka özellikleri Çizelge 3.1 de verilen TU-16A marka termostatlı bir ısıtıcı takılmıştır. Sistemin sabit sıcaklıkta kalması için ısıtıcı deney süresi boyunca çalıştırılmıştır. Su ısıtıcısı -40°C 'den $+200^\circ\text{C}$ 'ye kadar kontrollü bir sıcaklık elde etme ve istenilen bir sıcaklıkta sıcaklığı sabitleyebilme imkanı sağlamaktadır. $-40^\circ\text{C}/5^\circ\text{C}$ aralığındaki uygulamalarda Techne Fridge Unit denilen bir soğutucu üniteye ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışmada su tankın sıcaklığı bazalt örneği için 42°C ve faz değiştiren maddeler için erime noktalarına uygun olacak şekilde farklı sıcaklıklarda tutulmuştur.

Çizelge 3.1. Kullanılan TU-16A Model ısıtıcının özellikleri

Uygulama aralığı	-40°C'den +200°C' ye kadar
Çalışma aralığı	+5°C'den +200°C' ye kadar
Sıcaklık değişimi	$\pm 0,005^{\circ}\text{C}$
Seçilen sıcaklığın doğruluğu	$\pm 2,1 \%$, 2%
Sıcaklık yükselme aralığı	2°C



Sekil 3.2. KTED modelinin üç boyutlu görüntüsü

3.1.1.3. U-boru ve Kuyu boru

KTED modelinde ısı taşıyıcı akışkanın dolaştırılacağı U-boru iki borunun U şeklinde birleştirilmesiyle yapılmıştır. U-boru kuyu borunun içine yerleştirilir. Kullanılan boruların özellikleri Çizelge 3.2 de verilmiştir.

Çizelge 3.2. U Boru ve Kuyu Borunun Özellikleri

U boru	Kuyu boru
Dış çap : 0,02 m	Çap: 0,11 m
İç çap: 0,012 m	Et kalınlığı: 0,005 m
Et kalınlığı :0,004m	Uzunluk: 0,44 m
Dıştan dışa çapı: 0,085 m	Cinsi: PVC (Polyvinilklorür)
Uzunluk: 2 X 0,40 m	
Cinsi: PE (Polietilen)	

3.1.1.4. Sirkülasyon Pompası

Su tankından U-boru boyunca akışkanın dolaştırılması için için Halm marka HUP 2000 serisi su sirkülasyon pompası kullanılmıştır. Tek fazlı dalgalı akım 230 V, 50 Hz üç devir hızı kademelidir. Çevreye fazla zarar vermeyen bir reçine-kuvars-kum karışımından döküm olan stator, motorun güvenli çalışmasını ve çalışma düzgünlüğünü arttırmaktadır. Motorun devir hızı deneyler sırasında en alt düzeyde çalıştırılmıştır. Çizelge 3.3 de sirkülasyon pompasının devir sayıları ile ilgili bilgiler verilmiştir.

Çizelge 3.3. Su Sirkülasyon Pompasının Devir Sayısı

Devir sayısı	A	W
1	0,27	56
2	0,37	83
3	0,44	100

3.1.1.5. Sıcaklık Ölçer (Data- Logger) ile Sıcaklık Ölçme Metodu

Sıcaklık ölçer seziciler yardımı ile ölçüm alarak verileri özel veri tabanında kaydeder. Üzerinde bulunan işletim sistemi sayesinde istenen amaca hizmet etmek üzere farklı programlar hazırlanabilir. Bu programlar sayesinde bir çok şekilde ölçüm alınabilir ve harici aygıtlar kontrol edilebilir.

Çalışmalar sırasında kullanılan Campbell marka sıcaklık ölçerin modeli CR10X'dir. CR10X datalogger programını oluşturmak için kapsamlı işletim, matematik ve program kontrol komutları içermektedir. Veriler ve programlar kalıcı flash bellekte veya pil destekli SRAM'de saklanır. Standart hafıza, 2 adet son Kayıt bölümünde 62,000 veri noktasında saklar.

Standart çalışma sıcaklığı -25 ile +50°C arasındadır. Aşırı şartlarda CR10X -55 ve +80°C aralığında test ve garanti edilmiştir. CR10X ölçüm, kontrol modülü ve takıp çıkarılabilir kablo panelinden oluşmaktadır. Deney için kullanılan program Campbell Scientific destekli CR10X uyumlu SCWin-Short Cut for Windows 2.4 adlı yazılım programıdır(Ek1)



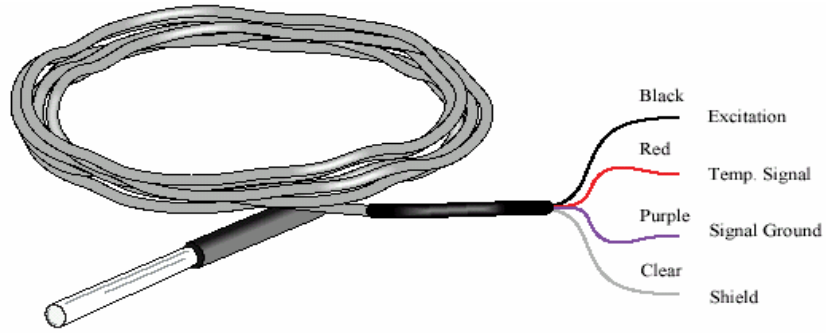
Şekil 3.3. Sıcaklık Ölçer (Data-Logger) CR10X

3.1.1.5.1. Model 107 Sıcaklık Algılayıcısı

107 sıcaklık problemleri (Çizelge 3.4, Şekil 3.4) sıcaklık ölçümleri için termistör kullanmaktadır. Hava, toprak ve su sıcaklığı ölçümleri için tasarlanmıştır. 21 ps basınca kadar su içine batırılabilir.

Çizelge 3.4. Model 107 Sıcaklık Algılayıcısının Özellikleri

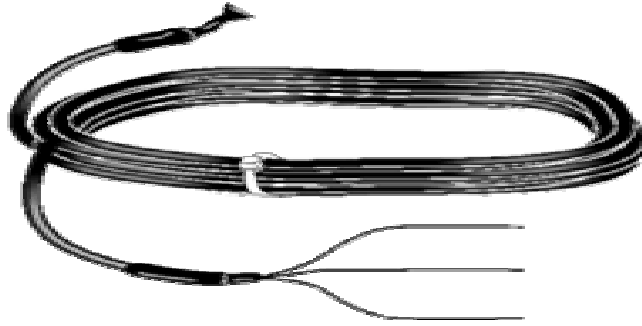
Sıcaklık ölçüm aralığı	-35°C +50°C
Çalışma aralığı	-50°C +100°C
Karalılık	24°C ile 48°C arasında $\pm 0.4^\circ\text{C}$



Şekil 3.4. Model 107 Sıcaklık Algılayıcısı

3.1.1.5.2. Model 105T Sıcaklık Algılayıcısı

105T sıcaklık problemlerinin (Şekil 3.5) genel amacı toprak içindeki sıcaklığı ölçmektir. Kablo çapı 0.8 cm ve sıcaklık ölçüm aralığı -78 ve +50°C'dir.



Şekil 3.5 Model 105T Sıcaklık Algılayıcı

3.1.2. Deney Süresince Kullanılan Dolgu Malzemeleri

3.1.2.1. Bazalt

Yeryüzünde en çok rastlanan kayaç türlerindedir. Saha üzerinde lavlar halinde, çoğunlukla kolan yapısı gösterirler (UZ, 2000). Sert taşlar sınıfında bulunan ve renkleri genellikle siyah olan bazaltlar yoğun ve homojen bir renge sahiptir. Bazaltın siyah renkli ve ağır olması, içerisinde bulunan manyetitten kaynaklanmaktadır. Bazaltlar iri ve ince taneli olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Kesme ve işlenmeleri oldukça kolay olan bu kayaçlar genellikle kaldırım taşı yapımında kullanılırlar. Kayaçta ayrıca gaz boşlukları mevcut olup, bunlar herhangi bir dolgu malzemesi tarafından doldurulmamıştır (TEĞMEN, 2005).

Laboratuarda kullanılan bazalt örneği olivin türüdür. Dolgu malzemesi olarak kullanılan bazalt Osmaniye yöresinden alınmıştır. Çizelge 3.4 verilen bazaltın kimyasal yapısı Çukurova Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümü'nde alkali eritiş yöntemi ile belirlenmiştir. (TEĞMEN, 2005).

Çizelge 3.5. Bazaltın Kimyasal Analizi

Kayaç Adı	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaCO ₃	MgCO ₃
Olivinli Bazalt	44,9	11,48	11,01	20,3	12,3

3.1.2.2. Parafin

Parafinler petrol türevleri olup, genel olarak içeriğinde alkanlar (C_nH_{2n+2}) bulunur. Parafin mumlarındaki alkan içeriği genelde %75'ten fazladır. Parafinler içerisinde bulunan alkanların yapısına göre normal parafinik hidrokarbonlar (düz zincirli yapıya sahip olanlar) ve izoparafinik hidrokarbonlar (dallanmış yapıya sahip olanlar) olarak sınıflandırılırlar. Parafinlerin ergime noktaları molekül ağırlığı arttıkça artar. Karbon sayısı çift olan parafinler ucuz, bol ve kimyasal olarak kararlı olduklarından ısı depolama için tercih edilirler (Abhat, 1983).

Bu çalışmada KTED sisteminde kısa süreli termal enerji depolama için 48-58°C erime aralıklı analitik saflıkta olmayan bir parafin kullanılmıştır.

3.1.2.3. Koko yağ asidi

Yağ asitleri yenilenebilir ergime ve donma özelliklerine ve çok az veya hiç aşırı soğuma olmadan donma özelliklerine sahip olduklarından faz değiştiren madde olarak kullanıma uygundur (Özonur, 2004).

Bu çalışmada kullanılan koko yağ asidi analitik saflıkta olmayıp ticari bir üründür. Erime noktası 22-24°C ve erime entalpisi 71,02 J/g 'dır.

3.1.2.4. Palm yağ asidi

Palm yağı, *Elaeis guineensis* olarak bilinen, Malezya, Batı ve Orta Afrika ile Endonezya'da ekimi yaygın olarak yapılan yağlı meyvenin pulp kısmından (yağ oranı yüzde 50) elde edilen bir yağdır. Meyvenin çekirdeğinden elde edilen ve laurik asit (% 40-52) içeriği yüksek olan yağ ise palm çekirdeği yağı olarak bilinmektedir. Palm meyvesi özellikle hasat ve işleme sırasında kuvvetli enzimatik hidroliz reaksiyonlarına maruz kaldığı için bazı durumlarda palm yağının serbest yağ asidi içeriği yüzde 50'ye kadar yükselebilmektedir. İyi kaliteli meyvelerden elde edilen palm yağının bile serbest yağ asidi içeriği diğer bitkisel kaynaklı yağlardan daha

yüksektir. Palm yağı % 38-52 oleik, % 5-11 linoleik asit içeriği ile oleik-linoleik grubu yağlar arasında yer almaktadır. Palm yağı % 38-52 oleik, %5-11 linoleik asit içeriği ile oleik-linoleik grubu yağlar arasında yer almaktadır. Palm yağının doymuş yağ asitlerinden palmitik asit içeriği ise % 32-45 arasında değişmektedir.

Bu çalışmada kullanılan palm yağ karışımı analitik saflıkta olmayıp ticari bir üründür. Erime noktası 36-38°C ve erime entalpisi 19,02 J/g'dır.

3.1.2.5. Laurik asit

Dolgu malzemesi olarak kullanılan PCM karışımında laurik asit analitik saflıkta olup, erime noktası 43-45°C molekül formülü $C_{12}H_{24}O_2$ (M: 200.32 g/mol) ve yoğunluğu 0,883 g/ml'dir.

3.1.2.6. Palmitik asit

Dolgu malzemesi olarak kullanılan PCM karışımında palmitik asit analitik saflıkta olup, erime noktası 61-63°C ve molekül formülü $C_{16}H_{32}O_2$ (M:256,43 g/mol) ve yoğunluğu 0,852 g/ml'dir.

3.2. METOD

Yeraltında Termal Enerji Depolama tekniklerinden Kuyuda Termal Enerji Depolama (KTED) tekniğinin laboratuvar modeli gerçekleştirilmiştir. Sisteme sabit sıcaklıkta su, pompa vasıtası ile gönderilip, U boruda dolaştırılmıştır. Deney süresince suyun giriş ($T_{giriş}$) ve çıkış ($T_{çıkış}$) sıcaklıkları, dolgu malzemesinin başladığı (T_u) ve bittiği yerlerde (T_{ki}) ve kuyu boru ile jeolojik formasyon arasındaki (T_{kd}) yerde sıcaklıklar, sürekli olarak ölçülüp, veri okuma kaydetme düzeneği ile kaydedilmiştir. Bilgisayar bağlantısı ile zamana bağlı verilerin sürekli olarak izlenebilmesi ve grafiğinin çizilebilmesi mümkün olmuştur. Suyun akış hızı pompa çıkışına konulan vana ile ayarlanmıştır. U boruda dolaştırılan akışkan hızı 0,9 , 0,1 ve

0,11 l/s 'dir. Yapılacak ölçümlerle sistemin ısı iletkenliği, λ (W/mK) ve ısı direnci, R_{sistem} (K/W) hesaplanmıştır.

3.2.1. Isıl İletkenlik (λ) ve Isıl Direnç Hesabı (R_{sistem})

U boruda dolaştırılan akışkandan aktarılan ısı, (Q) Eşitlik (1) ile hesaplanır. Burada m; akışkanın akış hızı (g/s) ve C; özgül ısısı (J/gK) 'dır.

$$Q = mC(T_{\text{çıkış}} - T_{\text{giriş}}) \quad (1)$$

U borudan jeolojik formasyona ısı aktarımı ısı iletimi ile gerçekteşir. Tek boyutlu ısı iletimi Eşitlik (2) de verilen Fourier yasasıyla ifade edilir. Burada λ .(W/mK) ısı iletkenlik, dT/dx ; x yönündeki sıcaklık gradyentidir. Eksi işareti ısı iletiminin sıcaklığın azalan yönünde olduğunu gösterir (Kakaç, 1998). Isı iletimi λ ile doğru orantılı Δx ile ters orantılı olarak artar.

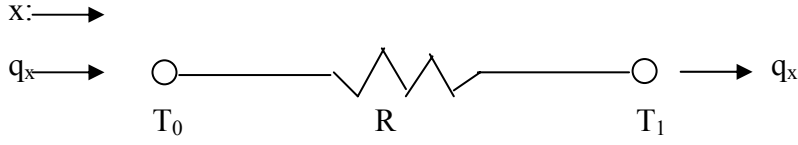
$$q_x'' = -\lambda \frac{dT}{dx} \quad (2)$$

Sürekli durum için, aralarında L uzaklığı olan T_0 ve T_1 sıcaklıkları ($T_0 > T_1$) arasındaki x yönündeki ısı iletimi Fourier yasasına göre Eşitlik (3) den hesaplanabilir.

$$q_x'' = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} = \lambda \frac{T_0 - T_1}{L} \quad (3)$$

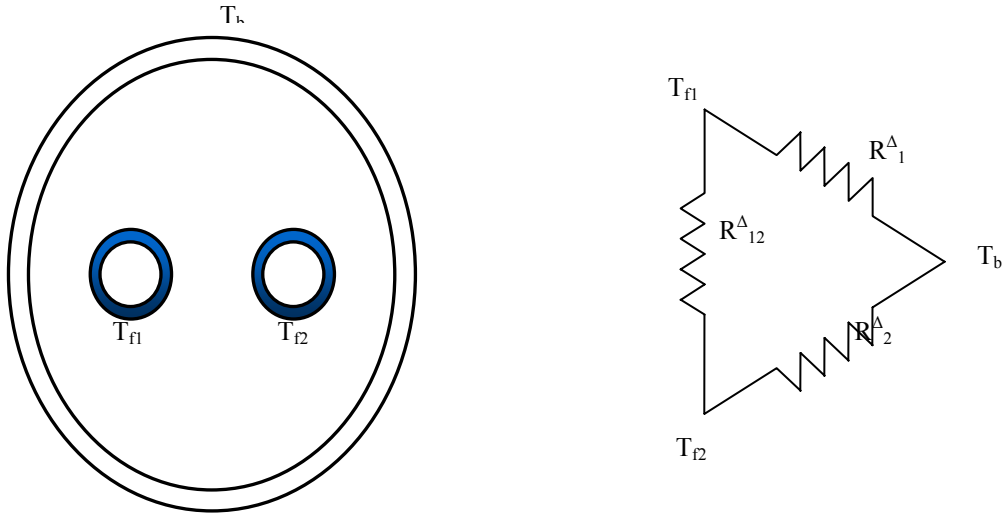
T_0 ile T_1 sıcaklıkları arasındaki ısı iletimine karşı ısı direnç, R, bir devreden elektrik akımının geçmesi sırasında oluşan direnci ifade eden Ohm yasasına benzetildiğinde, Eşitlik (4) yazılabilir. Isıl direnç şematik olarak şekil 3.6 da gösterilmiştir.

$$q_x'' = \frac{T_0 - T_1}{R} \quad (4)$$



Şekil 3.6. x yönündeki ısı iletimi için ısı direnç gösterimi

KTED kuyu modeli için ısı iletiminde geçerli olan ısı direnç şeması ve kuyu kesiti Şekil 3.7 de verilmiştir. Burada U borunun bir kolundaki akışkanın sıcaklığı T_{f1} , U borunun diğer kolundaki akışkanın sıcaklığı T_{f2} ve kuyu borunun sıcaklığı T_b ile gösterilmiştir. Isıl dirençler ise R_{11}^{Δ} T_{f1} ile T_b arasında, R_{22}^{Δ} T_{f2} ile T_b arasında ve R_{12}^{Δ} ise T_{f1} ile T_{f2} arasındadır.



Şekil 3.7. Kuyu kesiti ve ısı direnç şeması

Şekil 3.7 de verilen ısı dirençlerin hesaplanabilmesi için Eşitlik (5) ve Eşitlik (6) de verilen denklem sistemi ile ifade edilir. Eşitlik (7) de verilen R_b ise sistemin toplam ısı direncidir (Hellström, 1991).

$$q_1 = \frac{(T_{f1} - T_b)}{R_{11}^{\Delta}} + \frac{(T_{f1} - T_{f2})}{R_{12}^{\Delta}} \quad (5)$$

$$q_2 = \frac{(T_{f2} - T_b)}{R_2^\Delta} + \frac{(T_{f2} - T_{f1})}{R_{12}^\Delta} \quad (6)$$

$$R_b = \frac{R_1^\Delta R_2^\Delta}{R_1^\Delta + R_2^\Delta} \quad (7)$$

Şekil 3.7'deki iki boru sisteminin simetrik ve borulardaki akışkan sıcaklıklarının eşit olduğu kabul edildiğinde, $R_1^\Delta = R_2^\Delta$ olarak alınabilir. Toplam ısı direnç R_b Eşitlik (8) ile ifade edilir.

$$R_b = \frac{R_1^\Delta}{2} \quad (8)$$

Eşitlik 5-8 için sabit ısı kaynaklı model kullanılarak R_1^Δ elde edilen çözüm Eşitlik (9)'da verilmiştir (Hellström, 1991);

$$R_1^\Delta = \frac{1}{2\pi\lambda_b} \left(\ln(r_b/r_p) + \ln(r_p/2D) + \sigma \ln(r_b^4/(r_b^4 - D^4)) \right) + R_p \quad (9)$$

burada σ ;

$$\sigma = \frac{\lambda_b - \lambda_j}{\lambda_b + \lambda_j} \quad (10)$$

olup, λ_b sistemin ısı iletkenliği λ_j ise jeolojik formasyonun iletkenliğidir. R_p ise U borunun ısı direnci olup Eşitlik (11) den elde edilir:

$$R_p = \ln(r_{po}/r_{pi}) / (2\pi\lambda_p) \quad (11)$$

Eşitlik (9) – (12) beraber çözüldüğünde sistemin ısı iletkenliği, λ_b 'yi hesaplanabilir. Burada:

D : Kuyu merkezinin U-borunun merkezine uzaklığı

r_b : Kuyu borunun yarıçapı

r_p : U-borunun yarıçapı

Sistemin ısı iletkenliğinin hesaplanmasındaki diğer bir metod sürekli durum için Eskilson(1978) tarafından önerilen Eşitlik (12) kullanılarak yapılabilir.

$$\lambda = \frac{1}{2\pi R_{sistem}} \ln(H/2r_b) \quad (12)$$

Burada H, U borunun uzunluğudur. Sistemin ısı direnci R_{sistem} deneysel sıcaklık ve Q verilerini kullanarak Eşitlik (13) den hesaplanır.

$$R_{sistem} = \frac{(T_a - T_{kd})}{Q} \quad (13)$$

T_a : Akışkan sıcaklığı. $T_a = (T_{giriş} + T_{çıkış})/2$

T_{kd} : Kuyu dış duvar sıcaklığı, kuyu borunun bittiği jeolojik formasyonun başladığı noktadaki sıcaklık

3.2.2. Faz Değiştiren Maddelerin Karışımının Hazırlanması

Kullanılan faz değiştirici maddelerden belirli oranlarda karışım hazırlanarak istenilen sıcaklıkta erime noktası olan dolgu maddeleri elde edilmiştir.

3.2.2.1. Koko yağ asidi, palm yağ asidi ve parafin karışımı

Karışım oranları sırası ile hacimce 18.2:70:11,8 dir. Erime sıcaklığı 43-46 °C'dir. Erime entalpisi 30 kJ/kg 'dır.

3.2.2.2. Laurik asit ve palmitik asit karışımı

Karışım oranları sırası ile kütlece %64 / %36'dır (Kauranen ve ark, 1991). Erime sıcaklığı 35-40,6°C ve erime entalpisi 180 kJ/kg 'dır

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada yer altı termal enerji depolamada kullanılmak üzere farklı dolgu malzemelerinin ısı özellikleri incelenmiştir. KTED kuyu modeli için laboratuarda deneysel yapı inşa edilmiştir. Deneylerde farklı tanecik boyutunda bazalt örnekleri, su ve dolgu malzemesi olarak faz değiştiren maddeler kullanılarak KTED sistemlerinde kısa süreli termal enerji depolama denenmiştir.

4.1. Bazalt Deneyleri

Bazalt dolgu maddesinin üç farklı tanecik boyutunda kuru ve nemli olarak ısı özellikleri incelenmiştir. Ölçümler 13 saat ısıtma ve 12 saat soğutma olmak üzere toplam 25 saattir. Soğutma için ısıtma sistemi kapatılıp oda şartlarında kendi kendine soğumaya bırakılmıştır. Deney ölçümleri için $T_{giriş}$, $T_{çıkış}$, U-boru ve kuyu boru arasındaki dolgu malzemesi içine, kuyu borunun bittiği ve jeolojik formasyonun başladığı yere seziciler konularak sıcaklık ölçer ile veriler 10 dakikada bir toplanmış ve doğrudan bilgisayara kaydedilmiştir. Akış hızı örneğe göre 0,09 l/s, 0,10 l/s ve 0,11 l/s olarak değişmiştir. Bütün sistemler için Q , R_{sistem} , R_{dolgu} ve λ bulunmuştur.

Farklı büyüklüklerdeki bazalt tanecikleri kullanılarak; bazaltın gözenekli yapısına su eklendiğinde kütlece % artışı hesaplanmıştır. Farklı tanecik boyutundaki kütlesi alınmış bazalt örnekleri bir beher içine koyulup üzeri kaplanana kadar su ile doldurulmuştur. Üç saat sonunda bazalt örnekleri beherden çıkartılıp tartılmıştır. Çizelge 4.1.'de su eklenmiş bazaltın kütlece % artışları görülmektedir

Çizelge 4.1. Bazaltın % Kütlece Artışı

Bazalt (Tanecik Boyutu)	% kütle artışı
Doğal Bazalt	20,7
0,0-4 mm Bazalt	18,44
0,0-1 mm Bazalt	-

4.1.1. Doğal Bazalt

Doğal bazalt içinde farklı tanecik boyutu bulunduran bazalt örneğidir. Osmaniye’de bulunan bazalt yataklarından getirilip kullanılarak partikül boyutu değiştirilmeden örnek, dolgu maddesi olarak 25 saat denenmiştir. Kuyu boru içini dolduracak şekilde 2250 g bazalt kullanılmıştır. Akışkan sıcaklığı 42°C ve akışkan hızı 0.1 l/s’dir. Her 10 dakikalık ölçüm için sisteme verilen enerji Q(W); akış hızı $T_{giriş}$ ve $T_{çıkış}$ sıcaklıkları arasındaki farkı (ΔT) bulunarak hesaplanmıştır. Sistemin ısı direnci, R_{sistem} (K/W), dolgu maddesinin ısı direnci R_{dolgu} (K/W) ve sistemin ısı iletkenliği, λ (W/mK) hesaplanmıştır.

Ölçülen sıcaklık verilerinden sistemin sürekli durumuna gelebilmesi için geçen süredeki veriler değerlendirilmemiştir. Her 10 dakikalık ΔT hesaplanarak $Q_{10}(W)$ ve O_{ort} (W) bulunmuştur. Sonuçlar ikiye bölünerek U-borudan x yönünde verilen enerji hesaplanmış ve sürekli durum için Eskilson (1978) tarafından önerilen Eşitlik (12) kullanılarak sistemin ısı iletkenliği (λ) hesaplanmıştır.

$$\Delta T = T_{giriş} - T_{çıkış} \quad \Delta T = 42,34 - 41,95 = 0,39 \text{ K}$$

$$Q_{10} = m \cdot C \cdot \Delta T$$

$$Q_{10} = (100 \text{ g/s}) \times 4,18 \text{ (J/gxK)} \times (0,39 \text{ K})$$

$$Q_{10} = 163,02 \text{ J/s} / 2 = 81,51 \text{ W bulunmuştur.}$$

$R_{sistem10}$ aşağıdaki formülden ve $R_{sistemort}$ ‘da O_{ort} ‘dan hesaplanmıştır.

10’ dakikalık veriler ile;

$$\Delta T = (T_U + T_{ki}) / 2 \quad \Delta T = (33,99 - 24,04) \quad \Delta T = 9,95 \text{ °K bulunmuştur.}$$

$$R_{sistem10} = (T_U - T_{kd}) / Q_{10} \quad R_{sistem10} = 9,95 / 81,51 \text{ W}$$

$$R_{sistem10} = 0,12 \text{ (K/W)}$$

$$R_{dolgu10} = (T_u - T_{ki}) / Q_{10}$$

$$R_{dolgu10} = (33,99 - 26,61) / 81,52 \text{ W}$$

$$R_{dolgu10} = 0,09 \text{ K/W}$$

$$\lambda_{10} = \ln(H/2r_b) / 2 \times \pi \times R_{sistem10} \quad \lambda_{10} = \ln(0,22/2 \times 0,0525) / 2 \times 3,14 \times 0,12$$

$$\lambda_{10} = 0,96 \text{ (W/mK)}$$

O_{ort} , $R_{sistemort}$, $R_{dolgu10}$ ve λ_{ort} aşağıdaki hesaplanmıştır.

N: Ölçüm sayısıdır.

$$O_{ort} = (Q_{10} + Q_{20} + \dots + Q_{son}) / N$$

Gerekten değerler her biri için yazılarak;

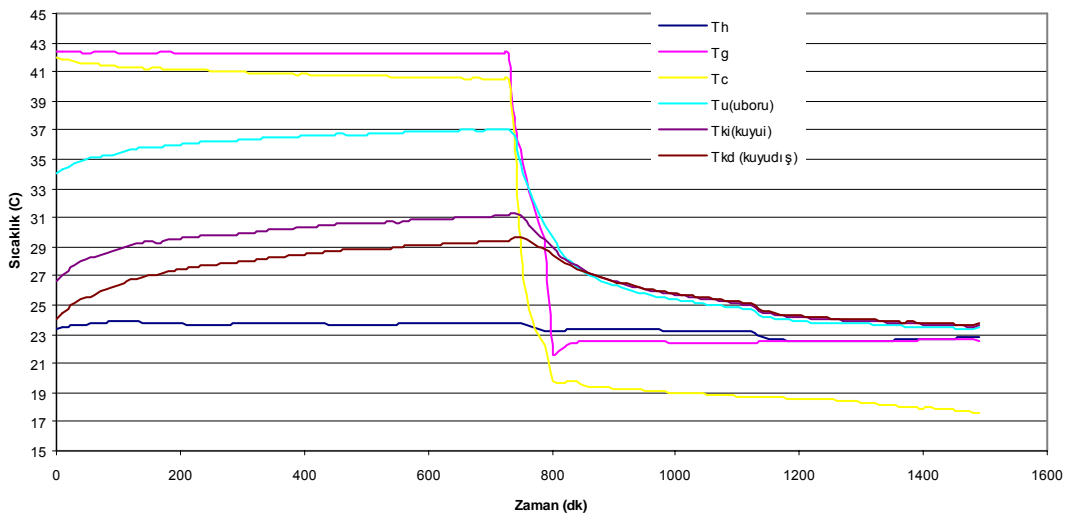
$$O_{ort} = 284,81 \text{ W}$$

$$R_{sistemort} = 0,033 \text{ (K/W)}$$

$$R_{dolgu10} = 0,025 \text{ (K/W)}$$

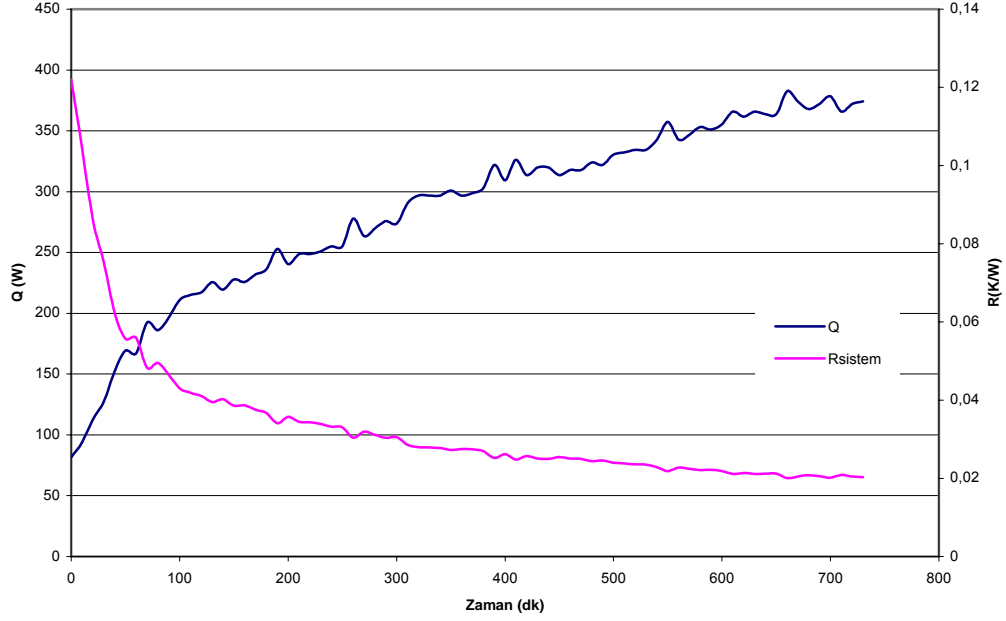
$$\lambda_{ort} = 4,12 \text{ (W/mK) olarak hesaplanmıştır.}$$

Şekil 4.1’de doğal bazalt örneğinin ısınma ve soğuma grafiği verilmiştir. Giriş sıcaklığı, $T_{giriş}$, 42°C ‘de sabit tutulmuştur. Sistem sürekli duruma geldikten sonra elde edilen veriler zamana bağlı çizilmiştir. Sistem soğumaya bırakıldığında zamanla kuyu borunun dışındaki ve jeolojik formasyonun başladığı yüzeydeki T_{kd} sezicisinin en geç soğuduğu gözlenmiştir.



Şekil 4.1. Kuru doğal bazalt'ın ısınma ve soğuma eğrileri

Sekil 4.2’de zamanla R_{sistem} azalmıştır. Isıl iletkenlik ve direnç ters orantılı olduğundan ısı iletkenliğinin (λ) arttığı görülmüştür. Doğal kuru bazalt örneğinde sistem ısıtılırken verilen enerji Q (W) zamanla arttığı görülmektedir.



Şekil 4.2. Doğal bazalt'ın ısınma sırasındaki, Q ve R_{sistem} 'in zamanla değişimi.

Doğal bazalt nemlendirilerek aynı işlemler tekrarlandığında Q_{10} , $R_{\text{sistem}10}$, $R_{\text{dolgu}10}$ ve λ_{10} , Q_{ort} , $R_{\text{sistemort}}$, R_{dolguort} ve λ_{ort} aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$Q_{10} = 280 \text{ W}$$

$$Q_{\text{ort}} = 138 \text{ W}$$

$$R_{\text{sistem}10} = 0,031 \text{ (K/W)}$$

$$R_{\text{sistemort}} = 0,11 \text{ (K/W)}$$

$$R_{\text{dolgu}10} = 0,022 \text{ (K/W)}$$

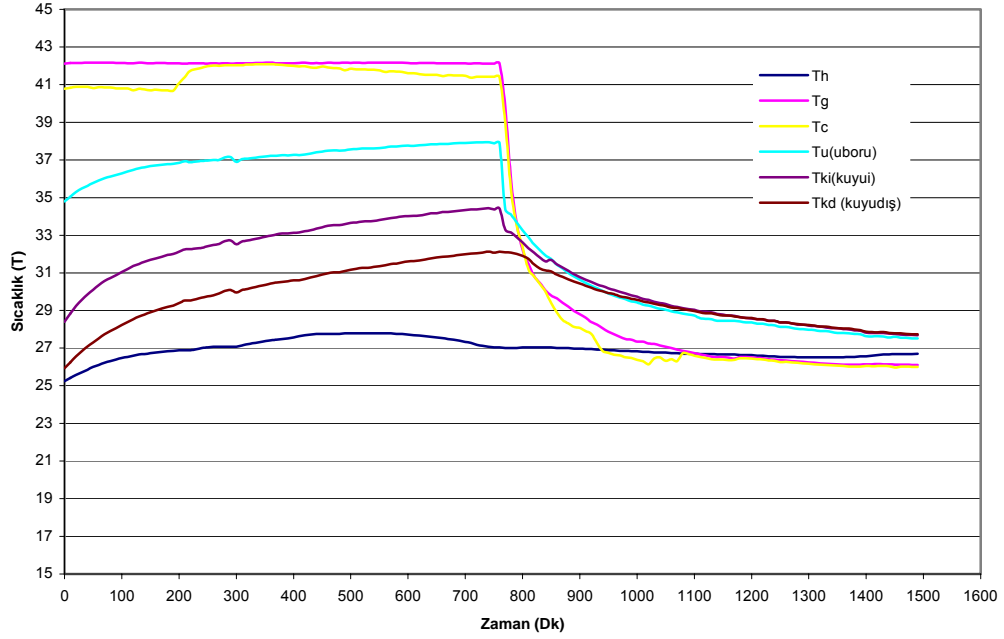
$$R_{\text{dolguort}} = 0,0698 \text{ (K/W)}$$

$$\lambda_{10} = 3,72 \text{ (W/mK)}$$

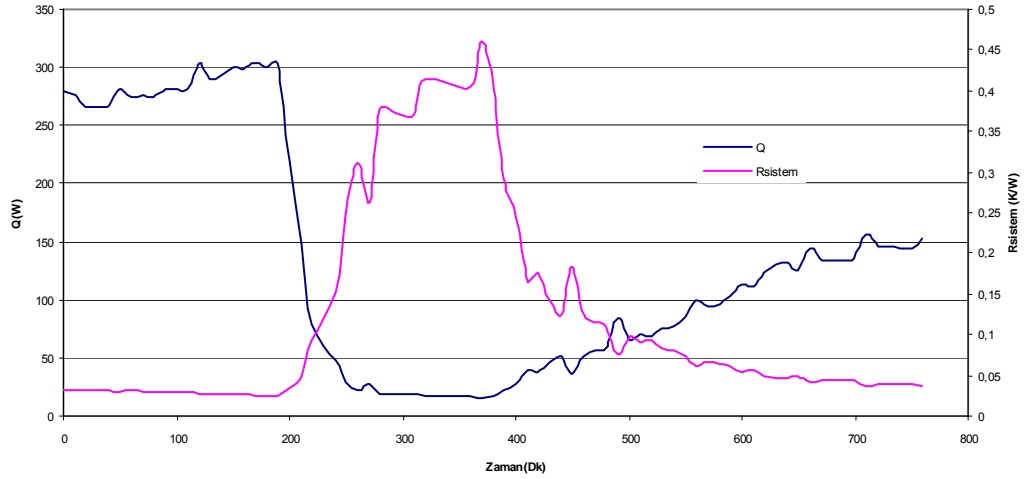
$$\lambda_{\text{ort}} = 2,26 \text{ (W/mK)}$$

Şekil 4.3 incelendiğinde sistem soğumaya bırakılmadan önce T_u , T_{ki} ve T_{kd} kuru haline göre sırası ile 0,85: 3,18:2,45 K daha fazla ısınmıştır. Soğuma sonunda T_{kd} en yüksek sıcaklığa sahiptir. Şekil 4.3 te ilk 200 dakikadaki yüksek ısı transferi bazaltın yapısında bulunan suyun hızlı ısınmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu süreç kuru bazaltta görülmemiştir. Bazaltın tekrar ısınmaya başlaması yaklaşık 500 dakika sonra gerçekleşmiştir. Sisteme verilen enerjinin Q (W) azalmasıyla ısı dirençler artmaktadır (Şekil 4.4). İlk 200 dakikada ısı direnç

çok düşük iken bazalt ısınmaya başlayana kadar direncin yüksek olduğu görülmüştür. Bu sebepten dolayı nemli bazalt örneğinde ortalama ısı iletkenlik λ_{ort} , kuru bazalt örneğinden daha düşük bulunmuştur.



Şekil 4.3. Doğal nemli bazalt'ın ısınma ve soğuma eğrisi



Şekil 4.4. Doğal nemli bazalt'ın ısınma sırasındaki Q ve R_{sistem} 'in zamanla değişimi

4.1.2. 0,0-4 mm tanecik boyutunda bazalt

Doğal bazalt örneğini öğütürerek 0,0-4 mm arası tanecik boyutu büyüklüğündeki dolgu malzemesinin kuru ve nemli olarak ısı özellikleri incelenmiştir. Kuyu içinde kullanılan dolgu malzemesi 4,150 g'dır. Akışkan hızı 0,11 l/s dir. Veriler doğal bazalt örneğinde olduğu gibi her 10 dakika'da alınıp sırasıyla ΔT bulunarak sisteme verilen enerji Q (W) dolayısıyla R_{sistem} , R_{dolgu} ve λ_{sistem} ayrı hesaplanmıştır.

$$\Delta T = T_{\text{giriş}} - T_{\text{çıkış}} \quad \Delta T = 42,38 - 42,18 = 0,20^\circ\text{C}$$

$$Q_{10} = m \cdot C \cdot \Delta T$$

$$Q_{10} = (110 \text{ g/s}) \times 4.18 \text{ (J/gxK)} \times (0,20 \text{ K})$$

$$Q_{10} = 91,96 \text{ J/s} / 2 = 45,98 \text{ W bulunmuştur.}$$

İlk 10'ar dakikalık verileri aynı işlemler uygulanırsa;

$$\Delta T_s = T_U - T_{kd} \quad \Delta T_s = 36,82 - 26,37 \quad \Delta T_s = 10,45^\circ\text{C bulunmuştur.}$$

$$R_{\text{sistem}10} = (T_U - T_{kd}) / Q_{10} \quad R_{\text{sistem}10} = 10,45 / 45,98 \text{ W}$$

$$R_{\text{sistem}10} = 0,227 \text{ (K/W)}$$

$$R_{\text{dolgu}10} = (T_u - T_{ki}) / Q_{10} \quad R_{\text{dolgu}10} = (36,82 - 27,97) / 45,98 \text{ W}$$

$$R_{\text{dolgu}10} = 0,192 \text{ K/W}$$

$$\lambda_{10} = \ln(h/2r_b) / 2 \times \pi \times R_{\text{sistem}10} \quad \lambda_{10} = \ln(0,22/2 \times 0,0525) / 2 \times 3,14 \times 0,227$$

$$\lambda_{10} = 0,518 \text{ (W/mK)}$$

O_{ort} , $R_{\text{sistemort}}$, $R_{\text{dolgu}10}$ ve λ_{ort} aşağıdaki hesaplanmıştır.

N: Ölçüm sayısıdır.

$$O_{\text{ort}} = (Q_{10} + Q_{20} + \dots + Q_{\text{son}}) / N$$

Gerekten değerler her biri için yazılarak;

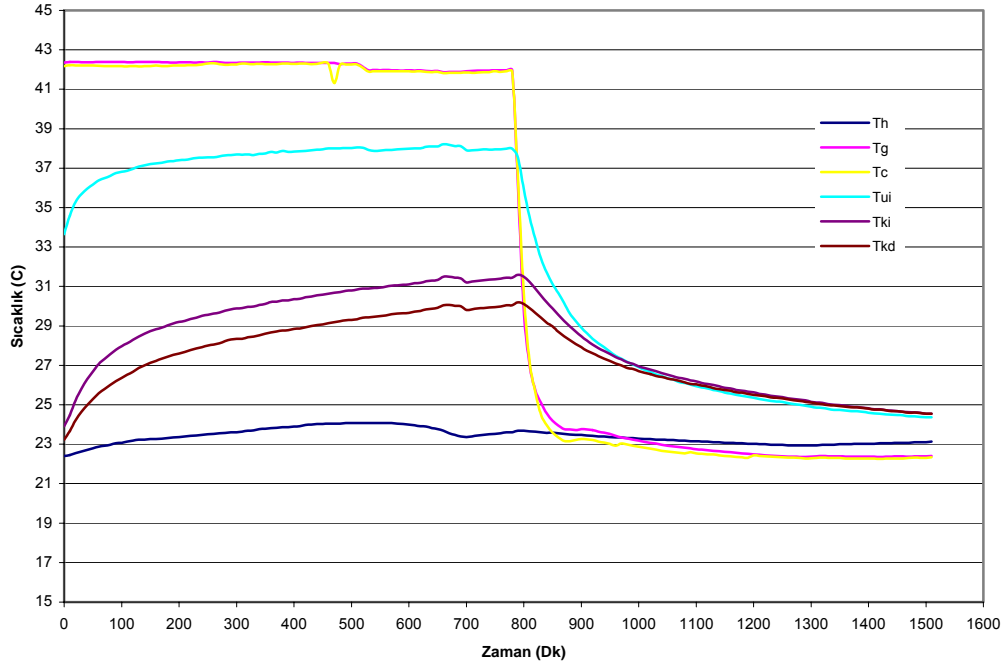
$$O_{\text{ort}} = 21,074$$

$$R_{\text{sistemort}} = 0,53 \text{ (K/W)}$$

$$R_{\text{dolgu}10} = 0,44 \text{ (K/W)}$$

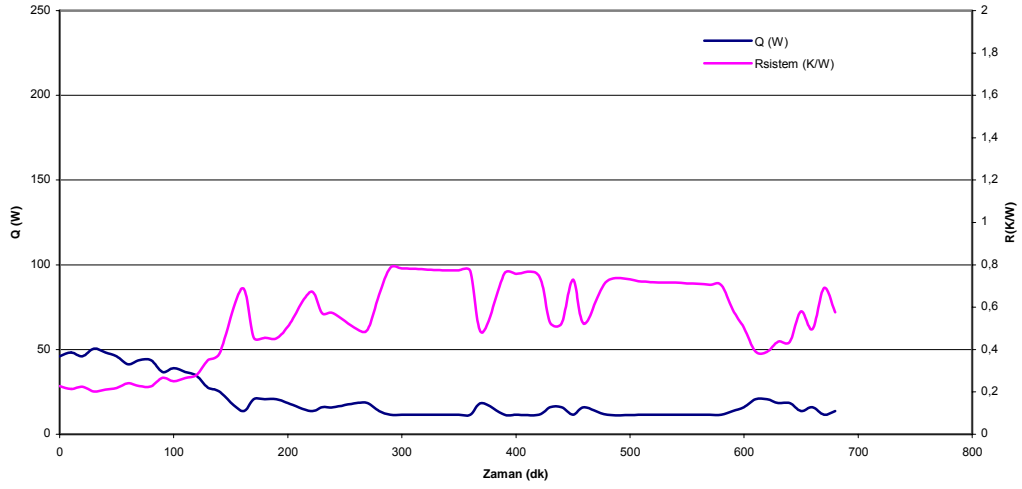
$\lambda_{ort} = 0,27$ (W/mK) bulunmuştur.

Şekil 4.5'te 0,0-4 mm arasındaki bazalt örneğinin ısınma ve soğuma grafiği verilmiştir. T_{kd} sensörü soğuma sırasında T_{ki} sensörü ile aynı sıcaklık değerini göstermiştir.



Şekil 4.5. 0,0-4 mm tanecik boyutunda bazalt örneğinin ısınma ve soğuma eğrileri

Şekil 4.6'da düşen Q değerleriyle R_{sistem} değerleri artmaktadır. Akışkan giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark çok düşük olduğundan aktarılan ısının az olduğu anlaşılmaktadır. Isıl direnç değerleri doğal bazalt kuru ve nemli örneklerinden yüksektir.



Şekil 4.6. 0,0-4 mm tanecik boyutundaki kuru bazalt'ın ısınma sırasında Q ve R_{sistem} 'in zamanla değişimi

0,0-4 mm boyutlarındaki bazalt nemlendirilerek aynı işlemler tekrarlandığında Q_{10} , $R_{sistem10}$, $R_{dolgu10}$ ve λ_{10} , Q_{ort} , $R_{sistemort}$, $R_{dolguort}$ ve λ_{ort} aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$Q_{10} = 170,12$$

$$R_{sistem10} = 0,043 \text{ (K/W)}$$

$$R_{dolgu10} = 0,034 \text{ (K/W)}$$

$$\lambda_{10} = 2,75 \text{ (W/mK)}$$

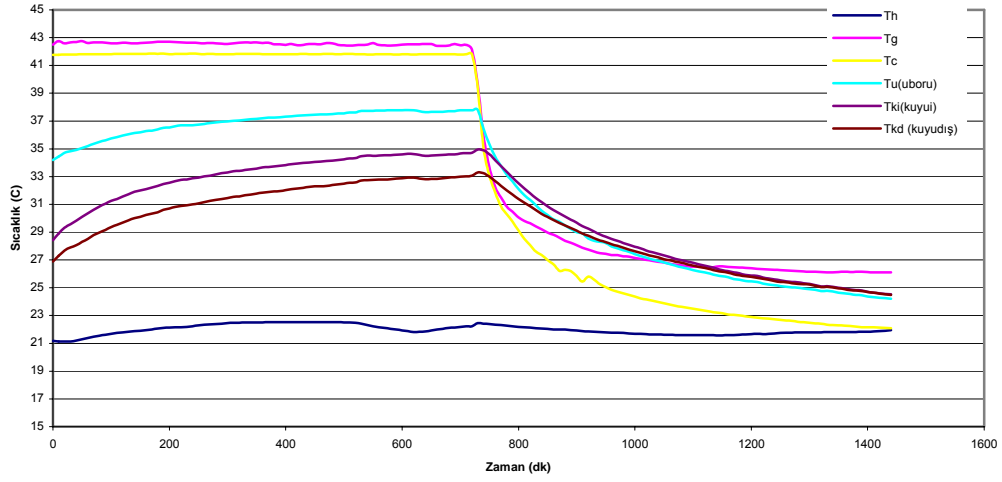
$$Q_{ort} = 172 \text{ W}$$

$$R_{sistemort} = 0,032 \text{ (K/W)}$$

$$R_{dolguort} = 0,02 \text{ (K/W)}$$

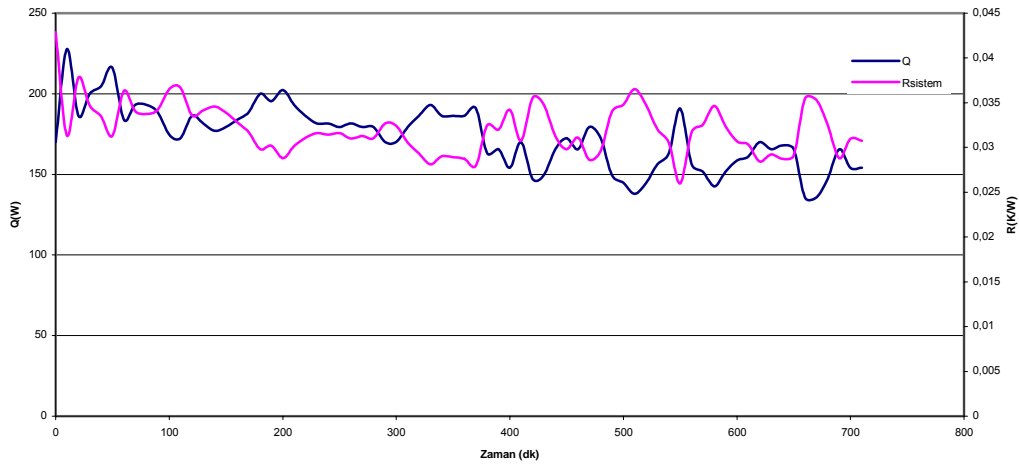
$$\lambda_{ort} = 3,70 \text{ (W/mK)}$$

Şekil 4.7'de 0,0-4 mm arasındaki nemli bazalt örneğinin ısınma ve soğuma grafiği verilmiştir. Dolgu malzemesinin nemli olmasından dolayı T_{ki} sıcaklığı soğuma sununda T_{kd} sıcaklığından $0,05 \text{ }^\circ\text{C}$ daha fazladır. Sistem soğumaya bırakıldıktan bir süre sonra bu sıcaklık farkını soğuma işlemi bitene kadar sürdürülmüştür. Nemli bazalt örneğinde ısınma eğrisinde kuru bazalt örneğine göre T_{ki} ve T_{kd} sıcaklıkları daha yüksektir.



Şekil 4.7. 0,0-4 mm tanecik boyutunda nemli bazalt örneğinin ısınma ve soğuma eğrileri.

Sekil 4.8 sisteme giren ve çıkan akışkan sıcaklık farkı korunduğu için, sürekli enerji aktarımı gerçekleşmiş ve ısıl direnç düşük bulunmuştur.



Şekil 4.8. 0,0-4 mm tanecik boyutundaki nemli bazalt'ın ısınma sırasında Q ve R_{sistem} 'in zamanla değişimi

4.1.3. 0,0-1 mm tanecik boyutundaki bazalt örneği

Doğal bazalt örneğini öğütürerek 0,0-1 mm arası tanecik boyutu büyüklüğündeki dolgu malzemesinin kuru ve nemli olarak ısıl özellikleri incelenmiştir. Kuyu içinde kullanılan dolgu malzemesi 5050 g'dır. Akışkan hızı

0,09 l/s dir. Veriler doğal bazalt örneğinde olduğu gibi her 10 dakika'da alınıp sırasıyla ΔT bulunarak sisteme verilen enerji Q (W) dolayısıyla R_{sistem} , R_{dolgu} ve λ_{sistem} ayrı ayrı hesaplanmıştır.

$$\Delta T = T_{\text{giriş}} - T_{\text{çıkış}} \quad \Delta T = 43,52 - 43,51 \quad \Delta T = 0,01^\circ\text{C}$$

$$Q_{10} = m \cdot C \cdot \Delta T$$

$$Q_{10} = (90 \text{ g/s}) \times 4.18 \text{ (j/gxK)} \times (0,01 \text{ K})$$

$$Q_{10} = 3,76 \text{ j/s} / 2 = 1,81 \text{ W bulunmuştur.}$$

İlk 10'ar dakikalık verileri aynı işlemler uygulanırsa;

$$\Delta T_s = T_U - T_{kd} \quad \Delta T_s = 37,59 - 30,17 \quad \Delta T_s = 7,42^\circ\text{C bulunmuştur.}$$

$$R_{\text{sistem}10} = (T_U - T_{kd}) / Q_{10} \quad R_{\text{sistem}10} = 7,42 \text{ K} / 1,81 \text{ W}$$

$$R_{\text{sistem}10} = 3,94 \text{ (K/W)}$$

$$R_{\text{dolgu}10} = (T_u - T_{ki}) / Q_{10} \quad R_{\text{dolgu}10} = 37,59 - 31,766 / 1,81 \text{ W}$$

$$R_{\text{dolgu}10} = 3,1 \text{ (K/W)}$$

$$\lambda_{10} = \ln(h/2r_b) / 2 \times \pi \times R_{\text{sistem}10} \quad \lambda_{10} = \ln(0,22/2 \times 0,0525) / 2 \times 3,14 \times 3,94$$

$$\lambda_{10} = 0,030 \text{ (W/mK)}$$

O_{ort} , $R_{\text{sistemort}}$, $R_{\text{dolgu}10}$ ve λ_{ort} aşağıdaki hesaplanmıştır.

N: Ölçüm sayısıdır.

$$O_{\text{ort}} = (Q_{10} + Q_{20} + \dots + Q_{\text{son}}) / N$$

Gereken değerler her biri için yazılarak;

$$O_{\text{ort}} = 5,05 \text{ W}$$

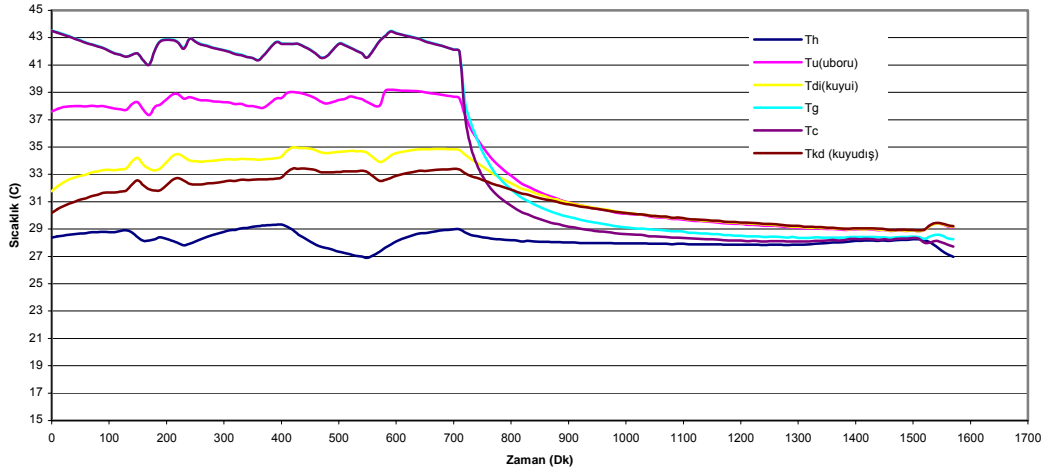
$$R_{\text{sistemort}} = 1,57 \text{ (K/W)}$$

$$R_{\text{dolgu}10} = 1,15 \text{ (K/W)}$$

$$\lambda_{\text{ort}} = 0,1 \text{ (W/mK)} \quad \text{bulunmuştur.}$$

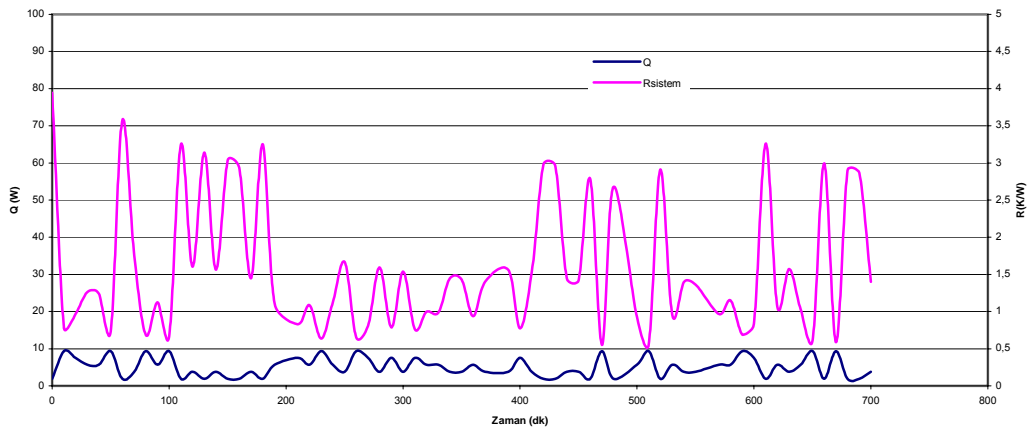
Şekil 9'da 0,0-1 mm arasındaki bazalt örneğinin ısınma ve soğuma grafiği verilmiştir. T_{kd} sıcaklığı soğuma sununda T_{ki} sıcaklığından $0,05^\circ\text{C}$ daha fazladır. Sistem soğumaya bırakıldıktan bir süre sonra bu sıcaklık farkını soğuma işlemi

bitene kadar sürdürülmüştür. T_{ki} sıcaklığı diğer dolgu malzemesi örneklerine göre ısınma sırasında en yüksek değere çıkmıştır.



Şekil 4.9. 0,0-1mm arası tanecik boyutunda bazalt örneğinin ısınma ve soğuma eğrileri

Şekil 4.10'da görüldüğü gibi sisteme verilen enerji çok az ve ısıl dirençler de yüksektir.



Şekil 4.10. 0,0-1 mm tanecik boyutundaki kuru bazalt'ın ısınma sırasında Q ve R_{sistem} 'in zamanla değişimi

0,0-1 mm tanecik boyutundaki bazalt nemlendirilerek aynı işlemler tekrarlandığında Q_{10} , $R_{sistem10}$, $R_{dolgu10}$ ve λ_{10} , Q_{ort} , $R_{sistemort}$, $R_{dolguort}$ ve λ_{ort} aşağıdaki gibi bulunmuştur.

$$Q_{10} = 9,405 \text{ W}$$

$$R_{sistem10} = 0,0,53 \text{ (K/W)}$$

$$R_{dolgu10} = 0,382 \text{ (K/W)}$$

$$\lambda_{10} = 0,22 \text{ (W/mK)}$$

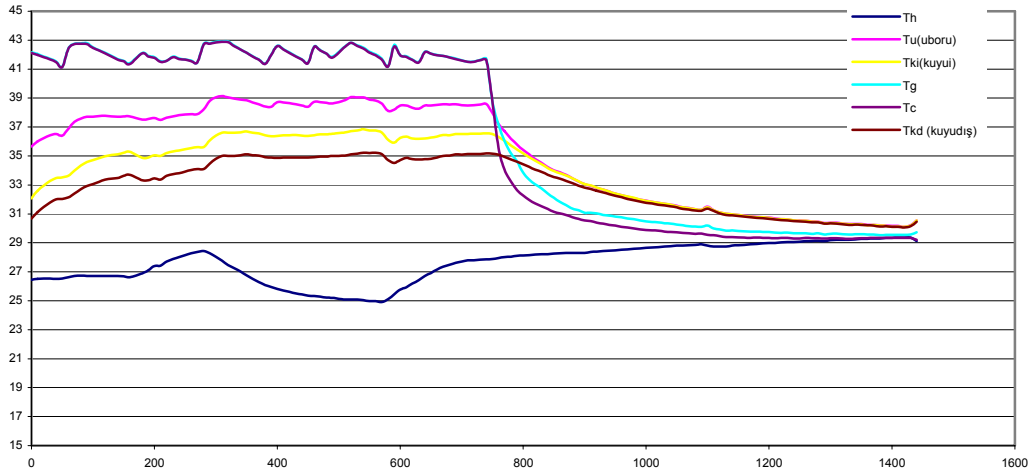
$$Q_{ort} = 7,1 \text{ W}$$

$$R_{sistemort} = 0,68 \text{ (K/W)}$$

$$R_{dolguort} = 0,42 \text{ (K/W)}$$

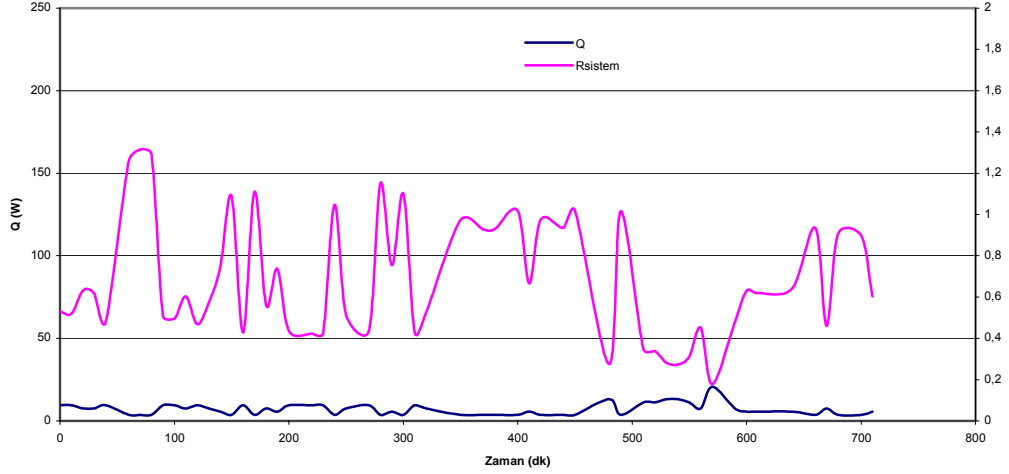
$$\lambda_{ort} = 0,21 \text{ (W/mK)}$$

Şekil 4.11.'de $T_{giriş}$ ve $T_{çıkış}$ sıcaklıklarında 41-43°C arasında ısıtıcının düzensiz çalışmasından dolayı oynamalar meydana gelmiştir. T_{ki} sıcaklığı soğuma esnasında T_{kd} sıcaklığına göre ortalama 0,3°C daha sıcaktır. Sistem soğumaya bırakıldıktan bir süre sonra bu sıcaklık farkın soğuma işlemi bitene kadar 0,5-0,2°C arasında değişmiştir.



Şekil 4.11. 0,0-1 mm arasında tanecik boyutunda bazalt örneğinin nemli ısınma ve soğuma eğrileri

Şekil 4.11 ve Şekil 4.12 'de belirli olarak ΔT 'nin çok küçük oluşu sisteme verilen enerjiyi $Q(W)$ azaltmıştır. Doğal olarak sistem'de ısı direç yüksek bulunmuştur.



Şekil 4.12. 0,0-1 mm tanecik boyutundaki nemli bazalt'ın ısınma sırasında Q ve R_{sistem} 'in zamanla değişimi

4.2. Su

Dolgu malzemesi olarak suyun denenmesi diğer dolgu malzemelerinin ısı iletkenliklerini karşılaştırmak için oldukça önemlidir. Kuyu içine 3,8 kg su koyularak ısıtma ve soğutma işlemleri aynı şartlar altında yapılmıştır. Su için bulunan değerler aşağıdadır.

$$Q_{10} = 16,72 \text{ W}$$

$$R_{sistem10} = 0,197 \text{ (K/W)}$$

$$R_{dolgu10} = 0,172 \text{ (K/W)}$$

$$\lambda_{10} = 0,596 \text{ (W/mK)}$$

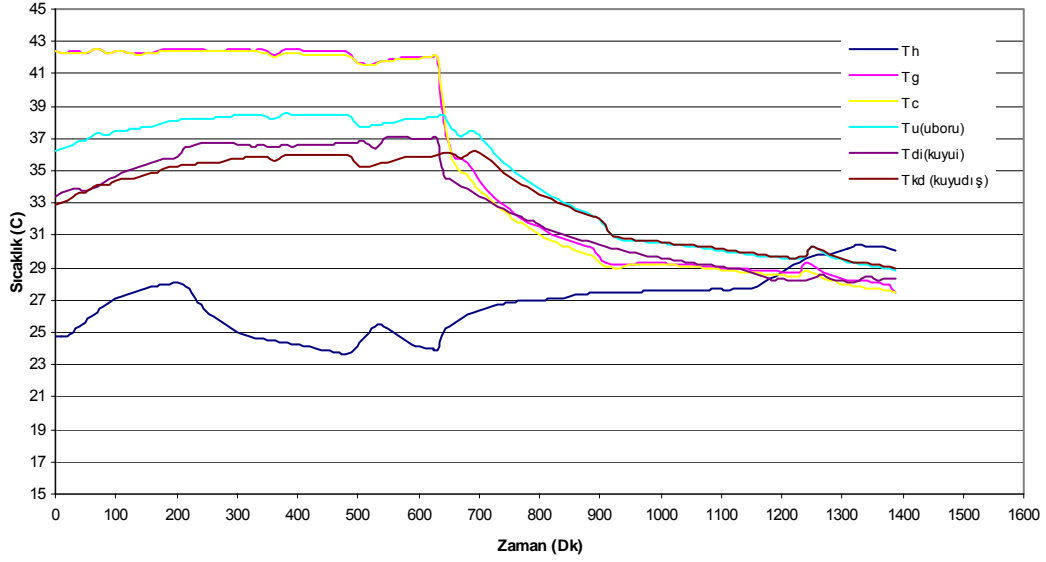
$$Q_{ort} = 19,06 \text{ W}$$

$$R_{sistemort} = 0,24 \text{ (K/W)}$$

$$R_{dolguort} = 0,17 \text{ (K/W)}$$

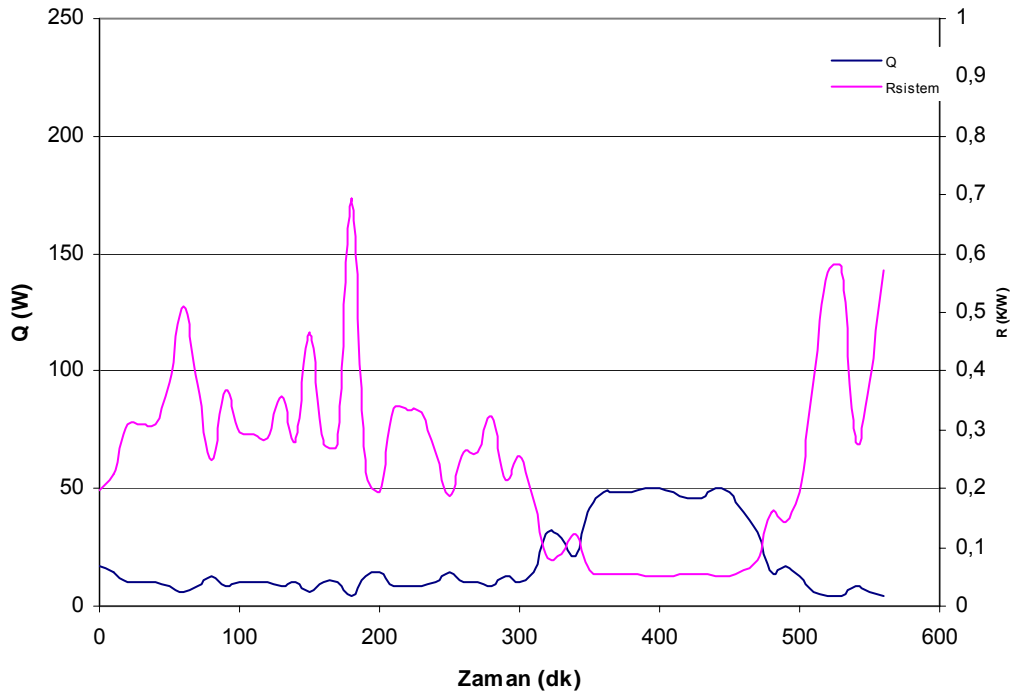
$$\lambda_{ort} = 0,85 \text{ (W/mK)}$$

Şekil 4.13.'da suyun ısınma eğrileri diğer dolgu maddeleriyle karşılaştırsak daha kısadır. Su örneğinde ilk 2 saat atılmıştır. T_{kd} ve T_{ki} arasında soğuma sonunda 2°C dış ortam sıcaklığına bağlı olarak fark bulunmaktadır



Şekil 4.13. Su örneğinin ısınma ve soğuma eğrileri

Şekil 4.14'te görüldüğü üzere kuyudan aktarılan enerji artığında sistemin ısı direncinin azaldığı belirlenmiştir.

Şekil 4.14. Suyun ısınma sırasında Q ve R_{sistem} 'in zamanla değişimi

Kullanılan dolgu malzemelerinde sisteme verilen enerji miktarı $Q(W)$ artığında sistemin ısı direnci azaltmakta ve ısı iletkenliği artmaktadır (Çizelge 4.2.)

Çizelge 4.2. Dolgu Malzemelerinin $T_{giriş}$, $T_{çıkış}$, Q_{ort} , $R_{sistemort}$, $R_{dolguort}$ ve λ_{ort} .

No	Dolgu malzemesi	$T_{giriş}$	$T_{çıkış}$	Q_{ort}	$R_{sistemort}$	$R_{dolguort}$	λ_{ort}
1	Doğal kuru bazalt	42,31	40,95	284,80	0,033	0,025	4,12
2	Doğal nemli bazalt	42,14	41,51	138	0,11	0,069	2,26
3	0,0-4 mm kuru bazalt	42,20	42,11	21,075	0,53	0,44	0,27
4	0,0- 4 mm nemli bazalt	42,56	41,81	172	0,032	0,002	3,70
5	0,0-1 mm kuru bazalt	42,37	42,27	5,05	1,57	1,15	0,10
6	0,0-1 mm nem bazalt	42,04	41,99	7,1	0,68	0,42	0,21
7	su	42,87	42,20	19,06	0,24	0,17	0,85

Çizelge 4.2 'de KTED sisteminde sistemin ısı iletkenliği kullanılan dolgu malzemesinin sırasına göre; 1.nolu 4,12 (W/mK), 2.nolu 2,26 (W/mK) ve 3. nolu örneğinde ise (3,70 W/mK) bulunmuştur. Sisteme verilen enerji ve dolgu maddesinin ısı direnci bakımından 3.nolu bazalt örneği en uygun dolgu maddesi olarak bulunmuştur. Bütün nemli dolgu örneklerinde kuru dolgu örneklerine göre dolgu içi sıcaklıkları daha yüksek bulunmuştur.

4.3. Faz Değiştiren Maddelerin Kullanılması

Faz değiştiren maddeler kullanılarak KTED sistemlerinden kısa süreli termal enerji depolama olanakları araştırılmıştır.

4.3.1. Koko yağı, palm yağı ve parafin karışımı

Koko yağı, palm yağı ve parafin karışım oranları sırası ile hacimce 18.2:70:11,8 dir. Erime sıcaklığı 43-46 °C'dir. Dolgu malzemesi eritildikten sonra

sistem soğuma bırakılmış $T_{giriş}$, $T_{çıkış}$, T_u , T_{pcm} ve T_{kd} sürekli ölçülmüştür. Giriş ve çıkış sıcaklıkları arasındaki fark, ΔT 0,036 l/s akışkan hızında $0,50^\circ C$ ve 0,044 l/s'de ise $0,2^\circ C$ olmuştur. Toplam dolgu örneği 2540 g tartılmıştır. Şekil 4.15 'te donma noktası aralığı $43-47^\circ C$ karışımın DSC analizinden çıkan sonuç ise $30-47^\circ C$ 'dir (EK 2). Sistem soğurken kullanılan dolgu karışımında hacim küçülmesi olduğundan sıcaklık sezicileri yalnız $43-47^\circ C$ arasındaki verileri alabilmiştir. Bu yüzden karışımın gizli ısısından geri kazanım, Q_{geri} , yalnız bu sıcaklık aralığında hesaplanmıştır.

PCM'de depolanan enerji (gizli ısı)

$$Q_{depo} = m_{pcm} \times H$$

$$Q_{depo} = 2540 \text{ g} \times 30,298 \text{ J/g} = 76957 \text{ J}$$

Geri kazanılan enerji

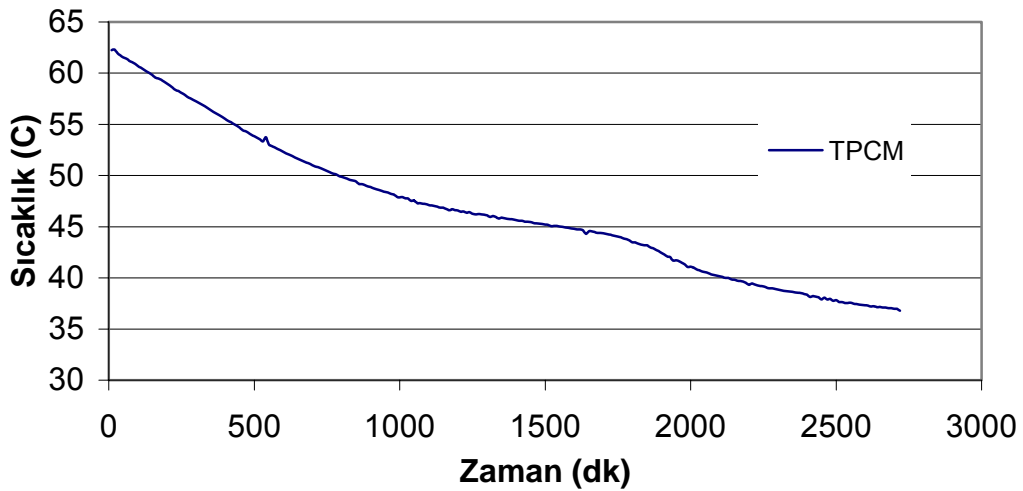
$$Q_{geri} = m_{su} \times C_p \times \Delta T \times \Delta t$$

$$Q_{geri} = 36 \times 4,18 \times 0,5 \times 700$$

$$Q_{geri} = 52668 \text{ J}$$

$$Q_{geri} = \text{Depolama verimi} = (Q_{geri}/Q_{depo}) \times 100 = (52668/76756) \times 100$$

Depolama verimi = % 68,6 bulunmuştur.



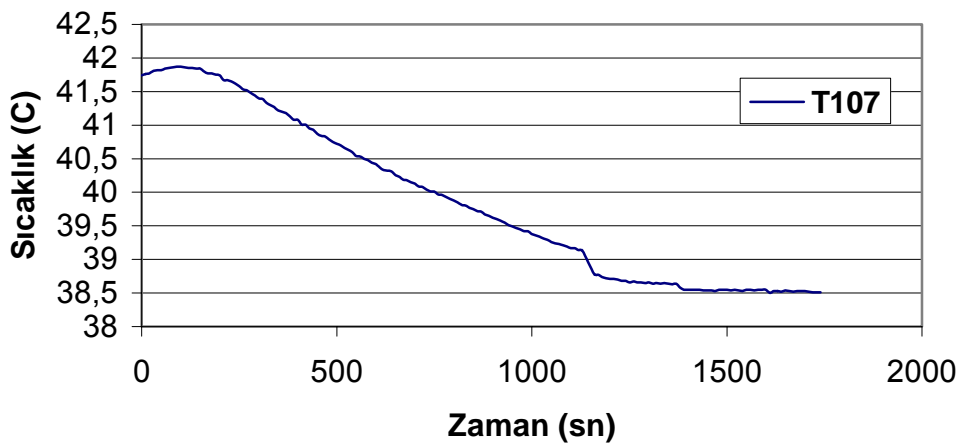
Şekil 4.15. Koko yağı, palm yağı ve parafin karışımının donma grafiği

4.3.2. Laurik asit ve Palmitik asit karışımı

Karışım oranları kütlece %64 laurik asit ve %36 palmitik asittir. Beklenen erime aralığı 33°C. Deney soğuma işlemi sonunda erime noktası DSC analizi ile aynı sıcaklıkta 35,06-40,5°C bulunmuştur (EK 2). Sırasıyla 1420 g laurik asit ve 800 g palmitik asit karıştırılıp eritilmiştir. Karışım sonunda erime ve donma noktası farklı olan yeni bir karışım elde edilmiştir.

Sekil 4.16'da sıcaklık sezicisinin donma esnasında faz değişimi gözlenmektedir. Donma süresi 6500 sn (108 dk) gözlenmiştir. Sistem soğuma bırakıldıktan sonra dolgunun rengi kuyu boru yönünde gittikçe beyazladığı, U_{boru} etrafında sertçe donduğu ve boruyu kuyu boru içinde sağlamlaştırdığı gözlenmiştir. Dolgu malzemesi eritildikten sonra $T_{\text{giriş}}$, $T_{\text{çıkış}}$, T_u , T_{ki} ve T_{kd} sürekli ölçülmüştür. Giriş ve çıkış sıcaklıkları arasında ki fark, ΔT farklı debilerde 0,35 ve 0,25 °C fark etmiştir. Sisteme akış hızı 0,017 l/s ve 0,023 l/s'dir. Akış hızı arttıkça bu tür maddelerin iletkenlikleri az olduğundan sıcaklık farkı, ΔT , azalmıştır.

DSC analizi yapılmış olup erime noktası aynı ve erime entalpisi 179,98 J/g bulunmuştur.



Şekil 4.16. Laurik asit ve palmitik asit karışımının donma eğrisi.

PCM'de depolanan enerji (gizli ısı)

$$Q_{\text{depo}} = m_{\text{pcm}} \times H$$

$$Q_{\text{depo}} = 2220 \text{ g} \times 179,98 \text{ J/g} = 399555,6 \text{ J}$$

Geri kazanılan enerji

$$Q_{\text{geri}} = m_{\text{su}} \times C_p \times \Delta T \times \Delta t$$

$$Q_{\text{geri}} = 18 \times 4,18 \times 0,35 \times 6500$$

$$Q_{\text{geri}} = 171171 \text{ J}$$

$$Q_{\text{geri}} = \text{Depolama verimi} = (Q_{\text{geri}}/Q_{\text{depo}}) \times 100 = (171171 / 399555,6) \times 100$$

Depolama verimi= %42.8 bulunmuştur.

PCM'de depolanan enerji (gizli ısı)

$$Q_{\text{depo}} = m_{\text{pcm}} \times H$$

$$Q_{\text{depo}} = 2220 \text{ g} \times 179,98 \text{ J/g} = 399555,6$$

Geri kazanılan enerji

$$Q_{\text{geri}} = m_{\text{su}} \times C_p \times \Delta T \times \Delta t$$

$$Q_{\text{geri}} = 23 \times 4,18 \times 0,25 \times 6500$$

$$Q_{\text{geri}} = 156227,5 \text{ J}$$

$$\text{Depolama verimi} = (Q_{\text{geri}}/Q_{\text{depo}}) \times 100 = (156227,5 / 399555,6) \times 100$$

Depolama verimi= %39,1 bulunmuştur.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada amaç; Yeraltında Termal Enerji Depolama tekniklerinden Kuyularda Termal Enerji Depolama (KTED) tekniğinin laboratuvar modelini gerçekleştirmek ve KTED sisteminde farklı dolgu malzemesi çeşidi ve bileşimlerinin termal performansa etkisini araştırmaktır. Daha önce denenmemiş olan ve ülkemizde zengin yatakları bulunan bazalt, farklı tanecik büyüklüklerinde dolgu malzemesi olarak denenmiştir. Yapılan ölçümlerden sistemin “ısı iletkenliğı” (W/mK) ve “ısı ı direnci (R_{sistem})” (K/W) hesaplanmıştır. Dolgu malzemesi olarak faz değıştiren maddeler kullanılarak KTED sistemlerinde kısa süreli termal enerji depolama denenmiştir. Yapılan deneyler ve ölçümler sonucunda bu amaca yönelik sonuçlar ve öneriler aşağıda sunulmuştur.

1. Bazaltın farklı tanecik boyutlarında sistemin iletkenlikleri ve direnci, örnek dolgu malzemesi kuru ve nemli iken farklı olmuştur.
2. Sisteme verilen enerji farklı dolgu malzemesi örnekleri için Q (W) 284,8-5,05 W arasındadır.
3. Sistemin iletkenliğı 0,1-4,12 (W/mK) sistemin ısı ı direnci 0,032-1,57 (K/W) arasında değışim göstermiştir.
4. Dolgu malzemesinin ısı ı direnci ise 0,02-1,15 (K/W) arasında bulunmuştur.
5. Jeolojik formasyon içindeki sıcaklık T_{kd} ; kullanılan farklı tanecik boyutundaki bazalt örnekleri için 29,45-35,14 °C arasındadır.
6. Elde edilen sonuçlar Kuyu Termal Enerji Depolamasında dolgu malzemesi olarak 0,0-4 mm tanecik boyutundaki nemli bazalt örneğinin ısı ı performans açısından uygun olduğunu göstermektedir. Gerçek bir KTED çalışmasında uygunluğunun denenmesi önerilir.
7. Koko yağı-palm yağı-parafin karışımı (erime aralığı: 30,65- 47°C) ve laurik asit-palmitik asit karışımı (erime aralığı: 35,04-40,55°C) faz değıştiren maddeler olarak kullanılarak KTED sistemlerinde kısa süreli termal enerji depolama olanakları araştırılmıştır.

8. Koko yağı, palm yağı ve parafin karışımında 52668 J, laurik asit ve palmitik asit karışımında ise 171171 J gizli enerji depolanmıştır.
9. Akışkan hızının azaltılmasıyla sistemden kazanılan enerji artmaktadır. Laurik asit ve palmitik asit karışımında 0,017 l/s akışkan debisinde depolanan enerji 171171 J, 0,023 l/s 'de ise 156227 J bulunmuştur. Geri kazanma verimleri sırasıyla %42,8 ve %39,1 bulunmuştur.
10. Ülkemizde zengin yatakları bulunan bazalt KTED sistemlerinde kullanılan dolgu malzemelerine alternatif olarak önerilebilir. Bazaltın dolgu maddesi olarak değerlendirilmesi hem iç piyasa hem de dış piyasaya yönelik önemli bir gelir kaynağı olabilir.
11. Uygun tanecik boyutundaki bazaltın dolgu maddesi olarak kullanılmasıyla sistemin ısıl iletkenliği ve performansı artmıştır. Bu durumda KTED sistemi için gerekli olan kuyu derinliği daha az olacağından sondaj ve boru maliyeti de azalacak ve sistemin yatırım maliyeti düşecektir.
12. Kullanılan faz değiştiren maddelerden laurik asit ve palmitik asit karışımı KTED sistemlerinde kısa süreli enerji depolama için önerilebilir.
13. Faz değiştiren maddeler KTED sistemlerinde kullanıldıklarında U-boruda dolaştırılan akışkan hızı bu maddelerin iletkenliklerinin az olmasından dolayı en az düzeyde olmalıdır. Bu nedenle karışım malzemelerinin iletkenliklerini arttırıcı grafit gibi katkı maddeleri eklenerek yüksek akışkan hızlarında da sistemden yararlanılması sağlanabilir. Bu şekilde faz değiştiren maddelerinden hızlı şekilde enerji depolayabiliriz.
14. Soğutma yükünün arttığı yaz aylarında veya ısıtma ihtiyacının arttığı kış aylarında gün içinde belli saatlerde ısıtma/soğutma için enerji ihtiyacı ani olarak maksimum düzeye çıkabilmektedir. Bu ani yüke cevap verebilmek için KTED sistemindeki kuyulardan birkaç tanesinde kuyu içindeki dolgu malzemesinin yerine faz değiştiren madde kullanılması bu çalışmada önerilmektedir. Böylece, KTED sisteminden hem kısa süreli hem de mevsimlik depolamada yararlanılacak ve elektriğe talebin en yüksek olduğu saatte tasarruf sağlayarak enerji üretim ve tüketim maliyetlerini azaltacaktır.

15. İleri çalışmalarda KTED sistemleri için faz değiştiren maddeler geliştirilerek saha çalışmasında kısa süreli enerji depolanması hedeflenmektedir.
16. Laboratuar çalışmalarında ileri aşamalarda KTED sistemleri için dolgu maddesi olarak kısa süreli termal enerji depolama için mikrokapsüllenmiş faz değiştiren maddeler ve zeolitler'den yararlanılması düşünölmektedir.

KAYNAKLAR

- ABHAT, A.**, 1983. Low temperature latent heat thermal energy storage materials. *Solar Energy*, 30(4): 313-332.
- ALLAN, M.L.** ve **KAVANAUGH, P.S.**, 1999. Thermal Conductivity of Cementitious Grouts and Impact on Heat Exchanger Length Design for Ground Source Heat Pumps. *Int. J HVAC&R Research* 5(2): 85-97.
- ANDERSSON, O.**, 1994. Aquifer Thermal Energy Storages in Sweden - Experiences so far and Market Potential. Proc. of CALORSTOCK'94, 6th International Conference on Thermal Energy Storage, Espoo, Finland, 22-25 August, 1994, Cilt 2 s. 831-843.
- ANDERSSON, O.**, 1997. ATES Utilization in Sweden- An Overview, Proc. of MEGASTOCK'97 7th International Conference on Thermal Energy Storage, 1997, Sapporo, Japan, 18-21 June 1997, Cilt 2, s. 925-930.
- ANDERSSON, O.**, **HELLSTROM, G.**, ve **NORDELL, B.**, 2000. Recent UTES Development in Sweden. TERRASTOCK 2000 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Stuttgart, Germany, August 28 – September 1, 2000, Cilt 1, s. 75-80.
- ANDERSSON, O.**, **HELLSTRÖM, G.**, **NORDELL, B.**, 2003b. Heating and Cooling with UTES in Sweden-Current Situation and Potential Market Development, FUTURESTOCK 2003 9th International Conference on Thermal Energy Storage, Warsaw, Poland, Cilt 1, s. 209-215.
- ANNEX 17**, <http://www.fskab.com/annex17/>
- BAKEMA, G.**, 1998. Communication at IEA Annex 8 Experts' Meeting in Stockton, USA.
- BAŞTENÇELİK, A.**, **PAKSOY, H.Ö.**, **ÖZTÜRK, H.H.**, 1996. Greenhouse Heating with Solar Energy and PCM Storage. *Acta Horticulturae* 443, 63-70.
- BEIER, R.A.**, ve **SMITH, M.D.**, 2002. Borehole Thermal Resistance from Line-source Model of In-Situ Tests. *Ashrae Transactions*, 4572.

- CARLSON, S.W.**, 2000. GSHP Bore Field Performance Comparison of Standart and Thermally Enhanced Grout. Ashrae Transactions, MN-00-2-3.
- CRUICKSHANKS, F.**, **BARDSLEY, J.** ve **WILLIAMS, H.**, 2000. In-Situ Measurement of Thermal Properties of Cunard Formations in a Borehole, Halifax, NovaScotia. Proc. of TERRASTOCK 2000, 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Stuttgart, Germany, August 28-September 1, Cilt 1, s. 171-175.
- DİKİCİ, D.**, 2004. Doğal Soğuk Kaynaklardan Yararlanan Yer Altı Kanallarında Termal Enerji Depolaması (KTED). Doktora Tezi, Ç.Ü. Fen Bil. Enst., Adana.
- FIEBACK, K.**, ve **GUTBERLET, H.**, 1998. The Use of paraffin Waxes in Thermal Energy Storage Applications. Annex 10 First Workshop, Cukurova University, Adana, Turkey, 16-17 April 1998, s. 111-118.
- GABER, M.S.** ve **FISHER, B.O.**, 1988. Michigan Water Well Grouting Manual. Michigan Dept. of Public Health. Lansing, Michigan, s. 82.
- GEHLIN, S.** ve **HELLSTROM, G.**, 2000. Recent Status of In-situ Thermal Response Tests for BTES Applications in Sweden. Proc. of TERRASTOCK 2000, 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Stuttgart, Germany, August 28-September 1, 2000, Cilt 1, s. 159-165.
- GÖK, Ö.**, 2005. Faz Değiştiren Maddelerin Destekleyici Maddelerde Tutuklanması ve Termal Performansı. Yüksek lisans Tezi, Ç.Ü. Fen Bil. Enst., Adana.
- GU, Y.** ve **O'Neal, D.L.**, 1998. Modeling the Effect of Backfills on U-Tube Ground Coil Performance. Ashrae Transactions, 4215 s. 356-365.
- HE, B.**, **GUSTAFSSON, M.**, ve **SETTERWALL, F.** 1998. Paraffin Waxes and Their Binary Mixture as Phase Change Materials (PCMs) for Cool Storage in District Cooling System. Annex 10 First Workshop, Cukurova University, Adana, Turkey, 16-17 April 1998, s. 45-56.
- HAUER, A.**, 2002. Thermal Energy Storage with Zeolite for Heating and Cooling Application. IEA, ECES IA Annex 17, Advanced Thermal Energy Storage Through Phase Change Materials and Chemical Reactions-Feasibility Studies and Demonstration Projects. 3rd Workshop, 1-2 October 2002, Tokyo, Japan.

- HEINE, D., ABHAT, A., 1978.** Sun:Mankind's Future Source of Energy I, Pergamon Pres, New York.
- HELLSTROM, G. ve KJELLSSON, E., 2000.** Laboratory Measurement of Heat Transfer Properties for Different Types of Borehole Heat Exchangers. Proc. of TERRASTOCK 2000, 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Stuttgart, Germany, August 28-September 1, 2000, Cilt 1, s. 183-185.
- HELLSTROM, G., 1995.** Ground Heat Storage Thermal Analyses of Duct Storage Systems Theory. s, 75-79.
- KABUS, F., SEIBT, P. ve POPPEI, J. 2000,** Aquifer Thermal Energy Stores in Germany. TERRASTOCK 2000, 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Stuttgart, Germany, August 28 – September 1, 2000, Cilt 1, s. 129-134.
- KAKAÇ, S., PAYKOC, E., ve YENER, Y., 1988.** Storage of Solar Thermal Energy, Advanced Study Institute on Energy Storage System Fundamentals and Applications, İzmir/Turkey.
- KAKAÇ, S., Isı Transferine Giriş-I Isı İletimi, 1998.**
- KAREN, R., ve DEN, B., 2000.** Regulations on Grouting for Closed-Loop Ground-Coupled Heat pumps in the United States. Ashrae Transactions, MN-00-2-4.
- KAVANAUGH, S.P. ve ALLAN, M.L., 1999.** Testing of Thermally Enhanced Cement Ground Heat Exchanger Grouts. Ashrae Transactions, CH-99-2-2, s. 446-450.
- KITANO, H., SAGARA K., HADJIEVA M., STOYKOV R., 2002.** Simulation Approach for Applicability of Phase Change Composites in Architectural Field. IEA, ECES IA Annex 17, Advanced Thermal Energy Storage Through Phase Change Materials and Chemical Reactions-Feasibility Studies and Demonstration Projects. 3rd Workshop, 1-2 October 2002, Tokyo, Japan.
- KJELLSSON, E. ve HELLSTROM, G., 1997.** Labotarory Study of Heat Transfer in A Water-Filled Borehole with A Single U-Pipe, MEGASTOCK'97 7th International Conference on Thermal Energy Storage, Sapporo, Japan, Cilt 1, s. 509-514.

- LENARDUZZI, F.J., CRAGG, C.B.H., ve RADHAKRISHNA, H.S., 2000.** The Importance of Grouting to Enhance the Performance of Earth Energy Systems. Ashrae, DA-00-1-3.
- MARTIN, C.A., ve KAVANAUGH, S.P., 2002.** Ground Thermal Conductivity Testing –Controlled Site Analysis. Ashrae Transactions, AC-02-15-3.
- MARTIN, V., RYDSTRAND M., HE B., 2002.** On the Effective Design of a PCM Cool Storage in Comfort Cooling Applications-the Importance of Narrow Phase Change Temperature Ranges. IEA, ECES IA Annex 17, Advanced Thermal Energy Storage Through Phase Change Materials and Chemical Reactions-Feasibility Studies and Demonstration Projects. 3rd Workshop, 1-2 October 2002, Tokyo, Japan.
- MAZMAN, M., 2000.** Güneş Enerjisinin Faz Değiştiren Organik Kimyasallarda Gizli Isı Şeklinde Depolanması. Yüksek lisans Tezi, Ç.Ü. Fen Bil. Enst., Adana.
- MTA, www.mta.gov.tr**
- NORDELL, B., 1994a.** Borehole Heat Storage Optimization Thermal Energy Storage, Doctoral Thesis, ISSN: 0348-8373. Division of Water Resources Engineering, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden.
- NORDELL, B., 1997.** Annex 8, Implementing Underground Thermal energy Storage. Proceedings of MEGASTOCK 1997, 7th International Conference on Thermal Energy Storage, Sapporo, Japan, Cilt 2, s. 1015-1020.
- NORDELL, B., 2000.** Implementing Agreement on Underground Thermal Energy Storage Main Results and Findings of IEA ECES Annex 8. Proceedings of 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Stuttgart, Germany, Cilt 1, s. 7-12.
- NORDELL, B., and SEHLBERG, B., 1994.** Annex 8, Implementing Underground Thermal Storage: IEA Energy Conservation Through Energy Storage (ECES). Proceedings of CALORSTOCK 1994, 6th International Conference on Thermal Energy Storage, Espoo, Finland, Cilt 1, s. 335-340.

- NGWA.**, 1997. Guidelines for the Construction of Vertical Boreholes for Closed-Loop Heat Pump Systems. Columbus, Ohio: National Groundwater Association.
- ÖZONUR, Y.**, 2004. Düşük Sıcaklıkta Termal Enerji Depolanmasına Uygun Faz Değiştiren Maddelerin Mikrokapsüllenmesi. Yüksek lisans Tezi, Ç.Ü. Fen Bil. Enst., Adana.
- PAHUD, D.**, 2001. Two Response Tests of two Identical Boreholes Drilled to a depth of 160 m near Luzern. Proceedings of Workshop on Geothermische Response Tests/Tests de Reponse Geothermique, Lausanne.
- PAKSOY, H.O., ANDERSSON, O., ABACI S., EVLIYA H. and TURGUT B.**, 2000. Heating And Cooling Of A Hospital Using Solar Energy Coupled With Seasonal Thermal Energy Storage in Aquifer. Renewable Energy, (19): 117-122.
- PAKSOY, H.Ö. ve DİKİCİ.D.**, 2002. Adana'da Soğutma Amaçlı Kanalda Termal Enerji Depolama (TED) Uygulaması. 4. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu, İstanbul, 16-18 Ekim 2002, Cilt 2, s. 671-678.
- PAKSOY, H.Ö. ve EVLİYA H.**, 2000. Termal Enerji Depolamanın Hava Kalitesi Yönetimine Katkısı. Türkiye 8. Enerji Kongresi, 8-12 Mayıs, 2000, Cilt 2, s. 235-246.
- REMUND, C.P. ve LUND, J.T.**, 1996. Thermal Enhancement of Bentonite Grouts for Vertical GSHP Systems. AES-vol. 29. Heat pump and Refrigeration Systems, Design, Analysis and Applications. Book No.H00888
- REMUND, C. P.**, 1999. Borehole Thermal Resistance: Laboratory and Field Studies. Ashrae Transactions, CH-99-2-1, pp. 439-445.
- SANNER, B., RESUSS, M., MANDS, E. ve MULLER, J.**, 2000. Thermal Response Test-Experiences in Germany. Proc. of TERRASTOCK 2000, 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Stuttgart, Germany, August 28-September 1, 2000, Cilt 1, s. 177-182.
- SANNER, B. ve MANDS, E.**, 2000. In-Situ-Determination of Underground Thermal Parameters, Summer School in Germany.

- SHONDER, J.A.,** ve **BECK, J.V.,** 2000. Field Test of A New Metod for Determining Soil Formation Thermal Conductivity and Borehole Resistance. Ashrae Transactions, DA-00-13-3.
- SMITH, M.D.,** ve **PERRY, R.L.,** 1999. Borehole Grouting :Field Studies and Thermal Performance Testing. Ashrae Transactions , MN-00-2-4.
- SNIJDERS, A.L.**ve **BAKEMA, G.,** 1997. The Successful Introduction of Aquifer Cold Storage in the Netherland. Proc. of MEGASTOCK'97 7th International Conference on Thermal Energy Storage, Sapporo, Japan, Vol.2, s. 919-924.
- SPILKER, E.H.,** 1998. Ground-Coupled Heat Pump Loop Desing Using Thermal Counductivity Testing and the Effect of Different Backfill Materials on Vertical Bore Length. Ashrae Transactions, 104(1B): 775-779.
- TEĞMEN, A.,** 2005. Kayaçların Fiziksel, Mekanik ve Kimyasal Özellikleri Arasındaki İlişkilerin Belirlenmesi. Yüksek lisans Tezi, Ç.Ü. Fen Bil. Enst., Adana.
- UZ, B.,** 2000. Maden- Jeoloji-Jeofizik Mühendisliğinde Petrografi Prensipleri. 3, s. 121-122.
- WITTE, H.J.L.,** **VAN GELDER, G.J.,** ve **SPITLER, J.D.,** 2002. In-Situ Measurement of Ground Thermal Conductivity: A Duct Perspective. Ashrae Transactions, 4521.
- WU, X.,** **MA, J.,** ve **BİNK, B.** 2000. Chinese ATES Technology and Its Future Development. TERRASTOCK 2000, 8th International Conference on Thermal Energy Storage, Stuttgart, Germany, August 28 – September 1, 2000, Cilt 1, s. 69-74.

ÖZGEÇMİŞ

1979 yılında Adana'da doğdum. İlk, orta ve lise öğrenimlerimi Adananın çeşitli okullarında tamamladım. 1996 yılında Çukurova Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi Kimya Bölümünde lisans eğitimine başladım ve 1 sene hazırlık okuduktan sonra lisans eğitimimi 2001 yılında tamamladım. Aynı yıl Çukurova Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü Kimya Anabilim Dalında yüksek lisan eğitimine başladım. 2001-2002 yılları arasında YADİM (Yabancı Diller Merkezi) 'de İngilizce hazırlık okudum ve 2005 yılında mezun oldum.

EK 1 Data-Logger Programı için DLD Dosyası

```
};CR10X
;tezprog.DLD
;Created by SCWIN (Version 1.2)
;$
;:Batt_Volt:Prog_Sig :ITemp_C :T107_C :T107_C_2
;:Temp_C :Temp_C_2 :Temp_C_3 :Temp_C_4 :Temp_C_5
;:CSI_R :Th :Tg :CSI_1 :Tc
;:T1 :T2 :T3 :T4 :T5

;$
```

```
MODE 1
SCAN RATE 10.0000
```

```
1:P10
1:1
```

```
2:P92
1:0
2:1440
3:30
```

```
3:P19
1:2
```

```
4:P95
```

```
5:P17
1:3
```

```
6:P11
1:1
2:1
3:31
4:4
5:1.0
6:0.0
```

```
7:P11
1:1
2:2
3:31
4:5
5:1.0
6:0.0
```

```
8:P14
1:1
2:32
3:2
4:1
5:3
6:6
7:1
8:0
```

9:P14
1:1
2:32
3:3
4:1
5:3
6:7
7:1
8:0

10:P14
1:1
2:32
3:4
4:1
5:3
6:8
7:1
8:0

11:P14
1:1
2:32
3:5
4:1
5:3
6:9
7:1
8:0

12:P14
1:1
2:32
3:6
4:1
5:3
6:10
7:1
8:0

13:P31
1:3
2:12

14:P31
1:4
2:13

15:P31
1:5
2:14

16:P30
1:1.5
2:0
3:11

17:P35
1:14
2:11
3:15

18:P31
1:6
2:16

19:P31
1:7
2:17

20:P31
1:8
2:18

21:P31
1:9
2:19

22:P31
1:10
2:20

23:P92
1:0--
2:10
3:10

24:P80
1:1
2:101

25:P77
1:1221

26:P71
1:1
2:12

27:P71
1:1
2:15

28:P71
1:1
2:16

29:P71
1:1
2:17

30:P71
1:1
2:18

31:P71
1:1
2:19

32:P71
1:1
2:20

33:P92
1:0
2:1440
3:10

34:P80
1:1
2:102

35:P77
1:1220

36:P74
1:1
2:0
3:1

37:P70
1:1
2:2

MODE 2
SCAN RATE 10.0000
1:P96
1:71

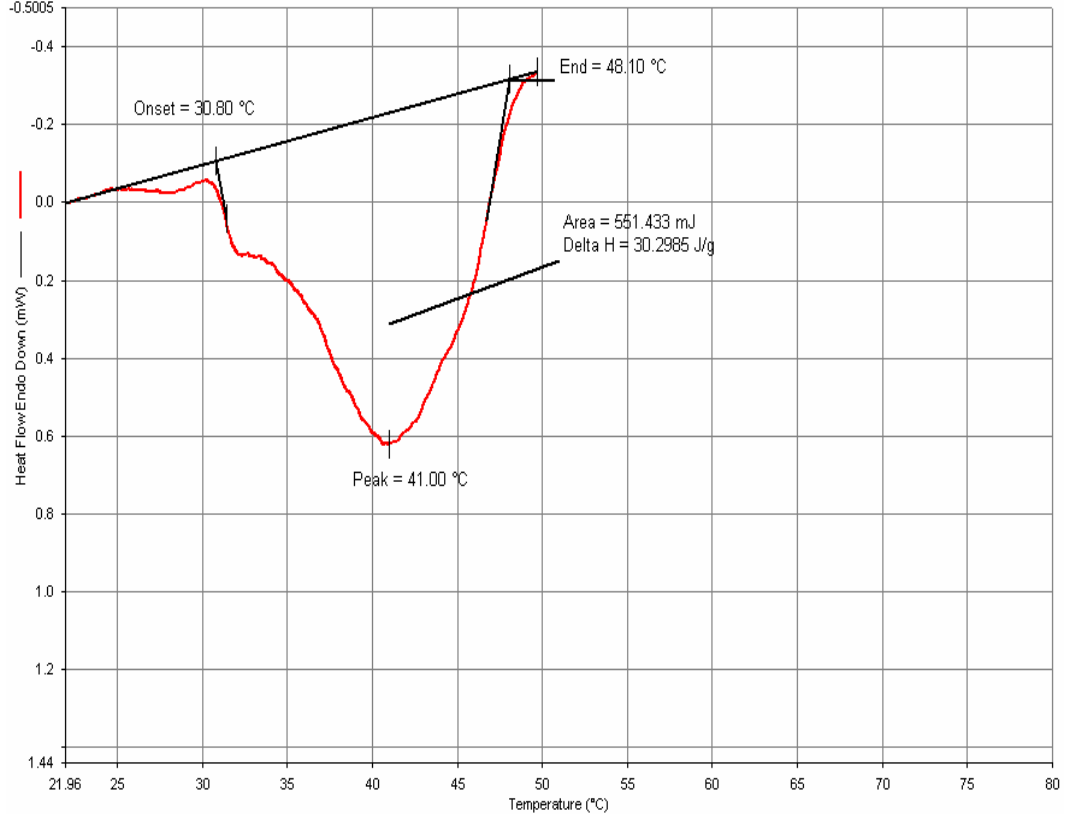
MODE 3

MODE 10
1:28
2:118
3:0

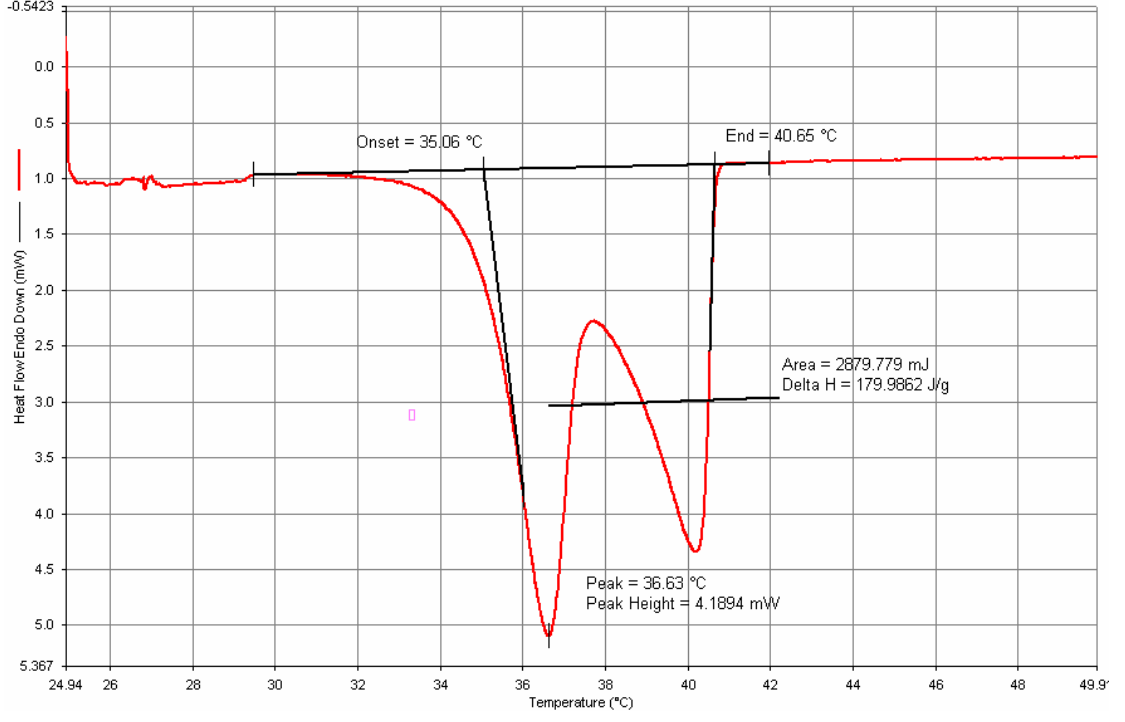
MODE 12
1:0
2:0
3:0

—

EK 2. DSC Analizleri



EK 2. Şekil 1. Koko yağı-palm yağı-parafin karışımına ait DSC grafiği.



EK 2. Şekil 2. Laurik asit-palmitik asit karışımına ait DSC grafiği