

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**PASİF SOĞUTMALI BATARYA MODÜL TASARIMI VE
TERMAL YÖNETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serdar ÇİÇEK

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

**OCAK 2025
İSTANBUL**

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**PASİF SOĞUTMALI BATARYA MODÜL TASARIMI VE
TERMAL YÖNETİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Serdar ÇİÇEK
(221203004)**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Bülent İMAMOĞLU

İstanbul 2025



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü

Jüri Tez Onay Formu

27/01/2025

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Bu çalışma 27/01/2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekatronik Mühendisliği (Tezli Yüksek Lisans) Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Dr. Öğr. Üyesi Bülent İMAMOĞLU

Danışman

İstanbul Nişantaşı Üniversitesi

Doç. Dr. Egemen SULUKAN

Üye (İmza)

İstanbul Gedik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Parisa

HEIDARNEJAD

Üye (İmza)

Yıldız Teknik Üniversitesi

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Pasif Soğutmalı Batarya Modül Tasarımı Ve Termal Yönetimi” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından Sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya ’da gösterilenlerden olduğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve Onurumla beyan ederim.

Serdar ÇİÇEK

Bana destek olan aileme ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.



ÖNSÖZ

Batarya teknolojisi, günümüzde hayatımızın hemen hemen her alanında hızla yaygınlaşan ve kritik bir öneme sahip bir teknoloji haline geldi. Bataryaların düzgün bir şekilde çalışabilmesi için en büyük sorunlarının en başlarında ısınma problemi gelmektedir. Bu sorun genellikle aktif soğutma sistemi dediğimiz, araçlarımızda kullanılan radyatör, fan, pompa, soğutma kanal plakası sistemi ile benzeşen yöntemler ile çözülür. Örneğin, soğutma plakaları, sıvılar, fanlar ve fin'li yapılar gibi sistemler kullanılır. Ancak, bazı durumlarda hacimsel yetersizlikler veya başka sebepler nedeniyle aktif soğutma kullanmak mümkün olmaz. İşte bu noktada, pasif soğutma yöntemleri devreye girer ve batarya modüllerinin daha verimli çalışmasına olanak sağlayarak, ısınma problemine çözüm getirir.

Pasif soğutmalı batarya tasarımı, özel alanlarda ve özel uygulamalarda kullanılır, özellikle havacılık ve uzay sanayinde aktif olarak kullanılmaktadır. Bunun sebebi yeterli hacim olmaması veya başka etkenlerdir. Bu tasarımda, batarya hücresinin yüzeyinden ısı, faz değiştiren malzemeler sayesinde alüminyum modüle aktarılır. Böylece, bataryalar yüksek deşarj oranlarına sahip olsa bile aşırı ısınmanın önüne geçilir. Bu sayede hücre kimyasının bozulması engellenir ve bataryanın ömrü uzar.

Aktif soğutma yapılamadığı durumlar için oldukça etkili bir çözüm sunan pasif soğutma, aynı zamanda bataryaların daha geniş alanlarda kullanılmasını da mümkün kılar. Birleştirilebilir modüller sayesinde daha büyük kapasiteli batarya paketleri üretmek de artık mümkün hale gelmektedir. Batarya teknolojilerindeki bu tür gelişmeler, yalnızca cihazlarımızın performansını artırmakla kalmaz, aynı zamanda günlük yaşamımızda büyük kolaylıklar sağlayarak hayatımıza girmiştir.

Özetle, pasif soğutmalı batarya tasarımı, özellikle aktif soğutmanın mümkün olmadığı uygulamalarda batarya kullanımını sürdürülebilir kılar ve batarya teknolojisinde önemli bir adım olarak karşımıza çıkar.

Bu Tez çalışmasında desteğini esirgemeyen başta Dr. Öğr. Üyesi Bülent İmamoğlu olmak üzere emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Ocak 2025

Serdar ÇİÇEK

Makine Mühendisi



İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
ÖNSÖZ	v
İÇİNDEKİLER	vii
KISALTMALAR	ix
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÖZET	x
ABSTRACT	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışma Konusu.....	1
1.2 Tezin Amacı.....	3
1.3 Literatür Araştırması.....	6
1.4 Hipotez	9
2. LİTERATÜR TARAMASI	13
2.1 Batarya Soğutma Sistemlerinin Önemi	14
2.2 PCM Malzemelerinin Batarya Soğutma Sistemlerindeki Kullanımı	15
2.3. 21700 Tipi Batarya Hücreleri ve Termal Yönetimi	16
2.4. ANSYS Yazılımı ile Termal Analiz ve Simülasyonlar.....	17
3. TEORİK ARKA PLAN	18
3.1 Pil Isı Üretimi	18
3.2 Pillerde Isıl İletkenlik ve Isı Transferi.....	20
3.3 Faz Değişim Malzemeleri (PCM'ler)	22
3.4 Pillerde PCM ile Isı Yönetimi	23
3.5 Pil Soğutma Gereksinimleri ve PCM Tasarımı.....	26
4. METODOLOJİ	28
4.1 PCM Seçim Kriterleri.....	28
4.1.1 Termal Özellikler	28
4.1.2 Faz Değişimi Davranışı	29
4.1.3 Termal İletkenlik.....	29
4.1.4 Maliyet ve Çevresel Etki.....	30

4.2 Deneysel Kurulum.....	30
4.2.1 Pil ve PCM Entegrasyonu.....	30
4.2.2 Sıcaklık Ölçüm Sistemi	30
4.3 Hesaplmalı Modelleme ve Simülasyonlar	30
4.3.1 Sonlu Eleman Analizi (FEA).....	30
4.3.2 Hesaplmalı Akışkanlar Dinamiği (CFD)	31
4.4 Veri Analizi ve Performans Değerlendirmesi	31
4.4.1 Sıcaklık Kararlılığı.....	31
4.4.2 Soğutma Verimliliği	31
4.4.3 Pil Performansı	31
4.4.4 Karşılaştırma Analizleri.....	31
5. BATARYA MODÜL TASARIMI	32
5.1 Hücre Seçimi ve Hesaplamalar	32
5.2 Hücre Dizilimi.....	32
5.3 İzolasyon ve İletken Malzeme Seçimi	33
5.4 Üç Boyutlu Modül Tasarımı	34
5.5 Prototip Üretimi ve Testler.....	37
6. TERMAL ANALİZ.....	39
6.1 Giriş ve Termal Yönetimin Önemi.....	39
6.2. Termal Yönetim Stratejileri.....	39
6.3 Termal Analiz Yöntemleri	40
6.4 Simülasyon Yöntemleri.....	41
6.5 Tasarlanan Batarya Modülünün Ansys Fluent ile analizi	42
6.5 Deneysel Yöntemler	54
6.6 Termal Performansın Değerlendirilmesi.....	55
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	57
7.1 Bulguların Özeti	57
7.2 Alana Katkılar	57
7.3 Gelecekteki Araştırmalar.....	57
7.4 Gelecekteki Araştırma Yönleri.....	58
7.5 Pratik Sonuçlar	59
KAYNAKLAR	60

KISALTMALAR

BMS	: Batarya Yönetim sistemi
CAD	: Bilgisayar destekli tasarım
CFD	: Akışkanlar Mekaniği Analizi
ESS	: Enerji Depolama Sistemleri
EV	: Elektrikli araçlar
FEA	: Sonlu elemanlar Analizi
PCM	: Faz Değiştiren Malzemeler
SOC	: Şarj durumu

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 5.1: Batarya Modül Tasarımı	35
Şekil 5.2: Batarya Modülü PCM yerleşimi	35
Şekil 5.3: Batarya Modülü PCM iç boşluk yapısı	36
Şekil 5.4: Batarya Modül Birleşimi	36
Şekil 5.5: Batarya Oluşturma Modül Birleşimi.....	37
Şekil 6.1: 21700 Hücre ve PCM Analizi Sıcaklık Dağılımı Sonuçları	42
Şekil 6.2: 21700 Hücre ve PCM Analizi Sıcaklık Grafiği	43
Şekil 6.3: 21700 Hücre Analizi Sıcaklık Grafiği	44
Şekil 6.4: 21700 Hücre Analizi Sıcaklık Dağılımı Sonuçları	44
Şekil 6.5: Batarya Modül Tasarımı ve PCM Analizi Sıcaklık Dağılımı Sonuçları Şeffaf Görünüm.....	45
Şekil 6.6: Batarya Modül Tasarımı ve PCM Analizi Sıcaklık Dağılımı Sonuçları ...	45
Şekil 6.7: Batarya Modül Tasarımı Hücre Sıcaklık Dağılımı Sonuçları.....	46
Şekil 6.8: Batarya Modül Tasarımı Sıcaklık Dağılımı Sonuçları Ön Görünüş.....	46
Şekil 6.9: Batarya Modül Tasarımı Alüminyum Dış Yüzey Sıcaklıkları	47
Şekil 6.10: Batarya Modül Tasarımı PCM sıvılaşıma Grafiği	47
Şekil 6.11: Batarya Modül Tasarımı Sıcaklık Grafiği	48
Şekil 6.12: 21700 Hücrelerin sıcaklık Grafiği (PCM Olmadan).....	49
Şekil 6.13: 21700 Hücrelerin sıcaklık Grafiği Ön Görünüş (PCM Olmadan).....	49
Şekil 6.14: 21700 Hücrelerin sıcaklık Grafiği (PCM Olmadan).....	50
Şekil 6.15: 21700 Hücrelerin Sıcaklık İzometri Görünüşü (PCM Katı-Sıvı)	51
Şekil 6.16: 21700 Hücrelerin Sıcaklık Grafiği (PCM: Katı-Sıvı Kullanılmıştır)	51
Şekil 6.17: Batarya Modül Tasarımı PCM Sıvılaşıma Grafiği	52
Şekil 6.18: Batarya Modül Tasarımı Isı Dağılımı Görünüşler PCM Katı-Sıvı.....	52
Şekil 6.19: Batarya Modül Tasarımı Isı Dağılımı Görünüşler PCM Olmadan.....	53
Şekil 6.20: Batarya Modül Tasarımı Isı Grafiği PCM Kullanılmamıştır.....	53
Şekil 6.21: 21700 Hücrelerin Sıcaklık Grafiği (PCM: Katı-Sıvı Kullanılmıştır)	54
Şekil 6.22: Batarya Modül Tasarımı Isı Grafiği - PCM Kullanılmamıştır	54

PASİF SOĞUTMALI BATARYA MODÜL TASARIMI VE TERMAL YÖNETİMİ

ÖZET

Bu tez, batarya modüllerinde ısıl yönetimi sağlamak için Faz Değişim Malzemeleri (PCM) kullanımının etkisini incelemektedir. Elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemlerinde batarya hücrelerinin verimli çalışabilmesi için sıcaklık kontrolü çok önemlidir. Yüksek sıcaklıklar, batarya verimliliğini düşürüp ömrünü kısaltabilir. PCM malzemeleri, faz değişimi sırasında ısı depolayıp serbest bırakarak batarya hücrelerinden çıkan fazla ısıyı dengeleyebilir.

Bu çalışmada, 21700 tip lityum iyon batarya hücrelerinden oluşan bir modül tasarlanmış ve PCM'lerin etkinliği simüle edilmiştir. Sonuçlar, PCM kullanımının batarya sıcaklık profilini iyileştirdiğini ve bataryaların daha verimli çalışmasını sağladığını göstermektedir. PCM'ler, sıcaklık dalgalanmalarını soğurarak ederek bataryaların stabil bir sıcaklıkta çalışmasına yardımcı olur ve bu da bataryaların ömrünü uzatır.

PCM tabanlı soğutma sistemleri, batarya hücrelerini aşırı ısınmadan korur ve bataryaların daha uzun süre verimli çalışmasını sağlar. Bu sistemler, düşük maliyetli ve etkili bir çözüm sunar, ayrıca bataryaların güvenliğini artırır. Gelecekte PCM malzemelerinin daha geniş alanlarda kullanılabilmesi için malzeme bilimi ve üretim teknolojilerindeki gelişmeler önemlidir.

Bu bulgular, PCM tabanlı pasif soğutma sistemlerinin enerji depolama sistemlerinde önemli bir çözüm olabileceğini ve gelecekte elektrikli araçlar ve enerji depolama ünitelerinde daha yaygın bir kullanım potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. PCM malzemelerinin daha geniş bir uygulama yelpazesinde kullanılması için malzeme bilimi ve üretim teknolojilerindeki gelişmelerin önemli bir rol oynayacağı öngörülmektedir.

Sonuç olarak, PCM tabanlı sistemler, batarya verimliliğini artırır, ömrünü uzatır ve güvenliğini sağlar. Bu tez, PCM teknolojisinin gelecekteki batarya sistemlerinde önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: *PCM (Phase Change Material), Pasif Soğutma, Batarya Modülü Tasarımı, 21700 Silindirik Batarya Hücreleri*

BATTERY MODUL DESIGN WITH PASSIVE COOLING AND ITS THERMAL MANAGEMENT

ABSTRACT

This thesis investigates the effectiveness of using Phase Change Materials (PCM) for thermal management in battery modules. Temperature control is crucial for the efficient operation of battery cells in electric vehicles (EVs) and energy storage systems (ESS). High temperatures can reduce battery efficiency and shorten their lifespan. PCM materials can balance excess heat generated by battery cells by storing and releasing heat during phase changes.

In this study, a module consisting of 21700-type lithium-ion battery cells was designed, and the effectiveness of PCM was simulated. The results demonstrate that PCM usage improves the battery temperature profile and enables more efficient operation. By absorbing temperature fluctuations, PCM helps maintain a stable temperature, which in turn extends the lifespan of the batteries.

PCM-based cooling systems protect battery cells from overheating and ensure that the batteries remain efficient for a longer period. These systems offer a low-cost and effective solution while also enhancing battery safety. The future potential for broader application of PCM materials depends on advancements in material science and manufacturing technologies.

These findings suggest that PCM-based passive cooling systems could be an important solution for energy storage systems and have the potential for more widespread use in future electric vehicles and energy storage units. Developments in material science and production technologies are expected to play a significant role in expanding the use of PCM materials across various applications.

In conclusion, PCM-based systems enhance battery efficiency, extend their lifespan, and improve safety. This thesis demonstrates that PCM technology could play a significant role in future battery systems.

Keywords: *PCM (Phase Change Material), Passive Cooling, Battery Module Design, 21700 Cylindrical Battery Cells*

1. GİRİŞ

1.1 Çalışma Konusu

Günümüzde enerji depolama sistemleri, daha önce hiç olmadığı kadar önemli hale gelmiştir. Elektrikli araçların artan popülaritesi ile birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının daha fazla kullanılmaya başlanması ve mikro şebekelerin yaygınlaşması mümkün hale gelirken, enerji depolama çözümlerine olan ihtiyacı her geçen gün artırıyor. Bu bağlamda, lityum iyon bataryalar en yaygın kullanılan enerji depolama teknolojilerinden biri olarak öne çıkıyor. Ancak bu bataryaların verimli bir şekilde çalışabilmesi ve uzun ömürlü olabilmesi için sıcaklık yönetimi büyük bir önem taşıyor. Bataryalar aşırı ısındığında hem verimlilik kayıpları yaşanabilir hem de erken arızalanmalar meydana gelebilir. İşte bu yüzden batarya sistemlerinde etkili bir ısı yönetim stratejisi geliştirilmesi gerekiyor.

Bataryaların verimli bir şekilde çalışabilmesi için sıcaklık yönetimi oldukça önemlidir. Çünkü batarya sıcaklığı, performansı, ömrü ve güvenliği üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle, batarya termal yönetim yöntemleri, bataryaların ideal çalışma sıcaklığında kalmasını sağlamak için farklı stratejiler kullanır.

Başlıca termal yönetim yöntemleri şunlardır:

Doğal Soğutma Sistemleri: Bu yöntem, bataryanın doğal ısısını yaymasına dayanır. Genellikle, ısıyı yavaşça dışarı atmak için iletken malzemeler veya ısı levhaları kullanılır. Pasif sistemler enerji tüketimini en aza indirger ancak düşük verimliliğe sahip olabilir.

Aktif Soğutma Sistemleri: Aktif sistemlerde, bataryanın sıcaklık seviyesini düzenlemek için soğutucu sıvılar veya hava akışları kullanılır. Örneğin, hava kanalları veya sıvı soğutma sistemleri bataryaların daha hızlı soğumasını sağlar. Bu sistemler daha yüksek verimlilik sunar ancak daha fazla enerji tüketebilir.

Pasif soğutma- Isı Yönetim Sistemleri (PCM- Phase Change Materials): Bu yöntem, belirli sıcaklık aralıklarında ısıyı emen veya bırakan malzemeler kullanarak

sıcaklık dalgalanmalarını dengelemeyi amaçlar. PCM'ler, bataryaların aşırı ısınmasını engellerken, bataryanın daha uzun süre verimli çalışmasına olanak tanır.

Isı Boruları ve Soğutma Yatakları: Bu teknik, bataryanın sıcaklığını homojen şekilde dağıtmak amacıyla ısıyı ileten borular kullanır. Soğutma yatakları ise bataryaların çevresine yerleştirilen ve ısının dışarıya transfer edilmesini sağlayan sistemlerdir. Bu yöntemler özellikle daha büyük batarya sistemlerinde etkilidir.

Bu yöntemler, batarya sistemlerinin sıcaklıklarını optimum seviyede tutmak için çeşitli kombinasyonlar halinde kullanılabilir. Doğru sıcaklık yönetimi, bataryaların daha uzun ömürlü, güvenli ve verimli olmasını sağlar.

Isıl Yönetimin önemi, batarya performansını artırmak için sıcaklık yönetimi kritik bir rol oynuyor. Yüksek sıcaklıklar, bataryaların kimyasal reaksiyonlarını etkiler, iç dirençlerini artırır ve genel performanslarını düşürür. Özellikle elektrikli araçlarda, bataryalar yoğun enerji kullanımı nedeniyle ısınır. Bu ısının doğru bir şekilde dağıtılması ve yönetilmesi gereklidir. Geleneksel aktif soğutma sistemleri bu konuda etkili olsa da yüksek enerji tüketimi ve karmaşık yapıları, her zaman istenilen verimliliği sağlamaz. Bu da daha sürdürülebilir ve enerji verimli çözümler arayışını zorunlu kılıyor.

Faz Değişim Malzemeleri (PCM) Çözümü, işte burada faz değişim malzemeleri (PCM) devreye giriyor. PCM'ler, belirli sıcaklıklarda eriyip donarak ısıyı depolayabilen malzemelerdir. Bu malzemeler, sıcaklık yükseldiğinde ısıyı emer ve sıcaklık düştüğünde depoladığı ısıyı serbest bırakarak çevresindeki sıcaklıkları düzenler. Bu özellikleri sayesinde, PCM'ler bataryaların sıcaklıklarını pasif bir şekilde kontrol edebilir, bu da onları daha verimli ve güvenli hale getirir. PCM tabanlı sistemler, enerji harcamadan sıcaklık dengesini sağlayarak, bataryaların verimli çalışmasını ve güvenliğini artırır.

Geleneksel Soğutma Yöntemlerinin Zorlukları, geleneksel aktif soğutma sistemleri, batarya modüllerinin sıcaklıklarını yönetmek için yaygın olarak kullanılır. Ancak bu sistemler, genellikle yüksek enerji tüketimi ve karmaşık altyapı gereksinimleri ile birlikte gelir. Elektrikli araçlarda, her ek enerji tüketimi bataryanın verimliliğini olumsuz etkiler, bu nedenle bu tür sistemler verimlilik açısından sorun yaratabilir. Ayrıca, soğutma pompaları, kompresörler ve radyatörler gibi bileşenlerin eklenmesi, bataryanın maliyetini ve bakım gereksinimlerini artırır.

PCM'nin Avantajları, faz değişim malzemelerinin batarya sistemlerine entegrasyonu, geleneksel soğutma yöntemlerine göre birçok avantaja sahip. İlk olarak, PCM'ler pasif sistemler oldukları için enerji harcamazlar ve bu da bataryaların enerji verimliliğini artırır. Ayrıca, PCM tabanlı sistemler daha basit ve düşük maliyetli kurulumu sahiptir. Ekstra bileşenlere ihtiyaç duymadıkları için bakım gereksinimleri de daha düşüktür. PCM malzemeleri, batarya hücrelerinin etrafına yerleştirildiğinde, ısının emilmesini ve serbest bırakılmasını sağlayarak bataryaların aşırı ısınmasını engeller. Bu, bataryaların daha güvenli bir şekilde çalışmasına yardımcı olur.

Gelecekte PCM'nin Rolü, enerji depolama sistemlerine olan talebin arttığı bu dönemde, PCM teknolojilerinin önemi giderek daha fazla artacak. Elektrikli araçlar ve yenilenebilir enerji sistemlerinin yaygınlaşmasıyla birlikte, sürdürülebilir ve düşük maliyetli soğutma çözümlerine olan ihtiyaç da artacak. PCM'ler, daha uygun fiyatlı ve verimli hale geldikçe, batarya teknolojilerinin geleceğinde önemli bir yer tutacak.

Sonuç Olarak, sonuç olarak, enerji depolama sistemlerinde verimli ısı yönetim çözümlerinin geliştirilmesi, teknolojilerin geleceği için kritik bir öneme sahip. PCM tabanlı soğutma sistemleri, geleneksel aktif soğutma yöntemlerine kıyasla daha ekonomik, verimli ve güvenli bir alternatif sunuyor. Batarya modüllerine PCM malzemelerinin entegrasyonu, sadece verimliliği artırmakla kalmaz, aynı zamanda bataryaların ömrünü uzatır ve güvenli bir şekilde çalışmalarını sağlar. PCM'ler, enerji depolama sistemlerinin geleceğinde önemli bir rol oynayarak, daha sürdürülebilir ve verimli çözümler sunacak.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezde, 21700 tipi silindirik lityum iyon batarya hücrelerinden oluşan bir batarya modülü tasarlanarak, modülün soğutma performansı faz değişim malzemeleri (PCM) ile iyileştirilmiştir. Batarya modülünün tasarımında, PCM malzemelerinin termal özellikleri dikkate alınarak, bataryaların sıcaklık profilinin daha homojen bir hale getirilmesi hedeflenmiştir. Isıl analizler, ANSYS yazılımı kullanılarak yapılmış ve batarya modülünün çeşitli çalışma koşullarında sergilediği sıcaklık davranışları simüle edilmiştir. Bu sayede, PCM malzemelerinin batarya hücrelerinin aşırı

ısınmasını engelleyerek, bataryaların ömrünü uzatma ve verimliliği artırma potansiyeli değerlendirilmiştir.

Çalışmanın ana amacı, PCM malzemelerinin batarya modüllerindeki rolünü ve bu malzemelerin termal yönetim üzerindeki etkilerini incelemektir. Aynı zamanda, batarya modüllerinin termal davranışlarını simüle etmek için kullanılan ANSYS yazılımının etkinliğini vurgulamak da bu çalışmanın bir diğer amacıdır. Tezde, PCM malzemelerinin termal yönetimde sağladığı avantajlar, yapılan simülasyon sonuçları ve bu sonuçların batarya teknolojilerindeki uygulamaları ayrıntılı bir şekilde ele alınacaktır.

Pil çalışma sıcaklıklarının optimum bir aralıkta tutulması çok önemlidir. Hava ve sıvı soğutma gibi geleneksel yöntemler yaygın olarak kullanılsa da bu yöntemlerin verimliliği, karmaşıklığı ve enerji tüketimi gibi sınırlamaları vardır. Buna karşılık, PCM'ler daha verimli ve pasif bir soğutma çözümü sunar. Yüksek sıcaklık dönemlerinde aşırı ısıyı emerek ve soğutma aşamalarında serbest bırakarak PCM'ler sıcaklık dalgalanmalarını dengeleyebilir ve batarya hücrelerinin termal bozulmasını engelleyebilir. Bai vd., (2017) çalışmalarında farklı soğutma sistemlerinin etkinliklerini karşılaştırmıştır.

PCM'lerin Avantajları: PCM'lerin batarya soğutma sistemlerinde kullanılması, birçok avantaj sağlar:

Enerji Verimliliği: PCM sistemleri, aktif soğutma yöntemlerinin aksine sürekli enerji girişi gerektirmez.

Maliyet Etkinliği: PCM'ler, batarya sistemine fazla ağırlık veya karmaşıklık eklemekten nispeten düşük maliyetlidir.

Gelişmiş Pil Ömrü: PCM'ler, sıcaklık düzenlemeleri yaparak bataryaların performansının daha uzun süre korunmasına yardımcı olur.

Çevresel Faydalar: PCM tabanlı sistemler, enerji yoğun ve karmaşık mekanik sistemlere olan ihtiyacı azaltır.

Günümüzde, özellikle elektrikli araçlar (EV'ler), yenilenebilir enerji sistemleri ve mikro şebekeler gibi yüksek enerji depolama kapasitesi gerektiren uygulamalarda bataryaların performansı ve güvenliği önemli bir araştırma konusu olmuştur. Bataryaların verimli çalışabilmesi ve ömürlerinin uzatılabilmesi için

sıcaklık yönetimi kritik bir rol oynamaktadır. Bataryaların çalışma sırasında ürettiği ısı uygun şekilde yönetilmediğinde, batarya hücrelerinin ömrü kısılabılır, verimlilik düşebilir ve ciddi güvenlik riskleri ortaya çıkabilir. Bu nedenle, batarya hücrelerinden oluşan batarya modüllerinin verimli ve güvenli çalışabilmesi için etkili ısı yönetim stratejilerinin geliştirilmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu tezde, 21700 tipi silindirik lityum iyon batarya hücrelerinden oluşan bir batarya modülünün tasarımı gerçekleştirilmiş ve batarya modülünün ısı yönetimi için PCM malzemelerinin potansiyeli incelenmiştir. Batarya modülünün ısı performansı, PCM malzemelerinin soğutma sistemlerine entegrasyonu ile iyileştirilmiştir. PCM'ler, belirli sıcaklık aralıklarında eriyerek ısıyı depolar ve sıcaklık düştüğünde bu depoladığı ısıyı serbest bırakır. Bu özelliklerinden faydalanarak batarya hücrelerinin sıcaklık dalgalanmalarını dengelemek ve aşırı ısınmayı engellemek amaçlanmıştır.

PCM'lerin Isıl Yönetimdeki Rolü:

PCM'ler, batarya modüllerinde sıcaklık dengesini sağlamak için son derece etkili araçlardır. PCM'lerin başlıca avantajı, faz değişim süreçlerinde büyük miktarda ısıyı depolama ve gerektiğinde serbest bırakma yetenekleridir. Bu özellik, batarya hücrelerinin aşırı ısınmasını engelleyerek bataryaların daha uzun süre ve verimli çalışmasını sağlar. PCM'lerin kullanımı, batarya modülünün sıcaklık profilini dengelemekte ve sıcaklık dalgalanmalarını azaltmakta önemli bir rol oynar.

Bu çalışmanın bir diğer amacı, PCM'lerin batarya hücrelerinin çevresine yerleştirildiğinde sıcaklık dağılımının daha homojen hale gelip gelmediğini incelemektir. PCM'lerin faz değişim sürecinde depoladıkları ısıyı serbest bırakması, bataryaların sıcaklıklarının fazla artmasını önler. Böylece bataryalar daha verimli çalışabilir ve ömürleri uzar. Ayrıca, PCM malzemelerinin termal yönetimdeki etkinliğinin simülasyonlarla test edilmesi, bu malzemelerin batarya teknolojilerindeki potansiyel kullanımını doğrulamaktadır.

ANSYS Yazılımı ile Yapılan Termal Simülasyonlar:

Tezde kullanılan ANSYS yazılımı, batarya modülünün sıcaklık dağılımını simüle etmek ve PCM malzemelerinin etkisini analiz etmek için güçlü bir araçtır. Batarya hücrelerinin çalışma koşullarındaki sıcaklık davranışlarını modellemek amacıyla yapılan termal analizlerde, batarya hücrelerinin her birinde oluşan ısı

yükler ve bu yüklerin PCM malzemeleriyle nasıl dengeye getirilebileceği araştırılmıştır. Simülasyonlar, batarya modülünün farklı çalışma koşullarındaki sıcaklık dağılımını gösteren sonuçlar elde edilmiştir. Bu sonuçlar, PCM malzemelerinin batarya hücrelerinin etrafına yerleştirildiğinde, bataryaların daha sabit bir sıcaklık seviyesinde çalıştığını ve aşırı ısınmanın engellendiğini ortaya koymuştur.

Simülasyonlar ayrıca, PCM malzemelerinin sıcaklık dalgalanmalarını dengeleme yeteneğini de göstermektedir. Özellikle yüksek sıcaklık koşullarında, PCM malzemeleri faz değişim süreçleriyle ısıyı emerek sıcaklık artışını yavaşlatırken, soğuma sürecinde depoladıkları ısıyı serbest bırakarak sıcaklığın hızlı bir şekilde düşmesini sağlar. Bu durum, bataryaların optimum sıcaklık aralığında çalışmasını sağlayarak ömrünün uzamasına ve verimliliğin artmasına olanak tanır.

PCM Sistemlerinin Avantajları:

PCM tabanlı batarya soğutma sistemleri, enerji verimliliği, maliyet etkinliği, sistem basitliği ve çevresel faydalar açısından önemli avantajlar sunar. Geleneksel aktif soğutma sistemlerinin aksine, PCM sistemleri enerji tüketimi gerektirmez. Ayrıca, PCM malzemelerinin maliyeti geleneksel soğutma sistemlerine göre daha düşüktür ve sistemin karmaşıklığını artırmaz.

Batarya sistemlerinde PCM tabanlı çözümler kullanıldığında, bataryaların ömrü artar, verimlilik yükselir ve çevresel etkiler azalır. PCM malzemelerinin çevre dostu özellikleri ve düşük maliyetleri, bu teknolojilerin batarya soğutma sistemlerinde yaygın bir şekilde kullanılmasını teşvik etmektedir.

1.3 Literatür Araştırması

Batarya Sistemlerinde Termal Yönetim Gereksinimi

Elektrikli araçlar (EV'ler) ve enerji depolama sistemleri gibi uygulamalarda batarya sistemlerinin verimli çalışabilmesi, termal yönetim ile doğrudan ilişkilidir. Aswin , Pradeep , Krishnaswamy, ve Karunamurthy EV araçlarda PCM ile soğutulan araçta bataryalarının etkinliğini çalışmışlardır (Aswin vd., 2017). Batarya modülleri, yüksek enerji yoğunluklarına sahip olduklarında, şarj ve deşarj süreçlerinde önemli miktarda ısı üretirler. Bu ısı, batarya hücrelerinde sıcaklık artışına yol açarak, performans kaybı, kapasite azalma ve hatta güvenlik sorunlarına neden olabilir.

Batarya ömrünü uzatmak ve güvenliğini artırmak amacıyla termal yönetim, modern batarya teknolojilerinin önemli bir bileşeni haline gelmiştir. Bu literatür araştırmasında, termal yönetim çözümleri olarak faz değişim malzemeleri (PCM) kullanımının önemi ve ANSYS yazılımı ile yapılan termal analizler ele alınacaktır.

Batarya modüllerindeki ısı yönetim, bataryaların performansını, güvenliğini ve ömrünü etkileyen kritik bir faktördür. Batarya hücreleri şarj ve deşarj sırasında ısı üretir ve bu ısı birikimi, sıcaklık dalgalanmalarına yol açar. Aşırı ısınma durumunda, bataryaların kimyasal ve yapısal bütünlüğü bozulabilir. Batarya modüllerinin termal yönetimi genellikle aktif ve pasif yöntemler olmak üzere iki ana kategoride incelenebilir. Choudhari ve Panchal (2022) çalışmalarında Batarya termal yönetiminin numerik analizlerini yapmışlardır.

Aktif Soğutma Sistemleri: Bu sistemler, genellikle sıvı veya hava kullanarak batarya hücrelerinden ısıyı aktif bir şekilde uzaklaştırır. Aktif soğutma sistemleri, yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilse de, enerji tüketimi, bakım gereksinimi ve sistem karmaşıklığı gibi dezavantajlara sahiptir.

Sabbah, vd. (2008) çalışmalarında Aktif soğutma sistemleri ile farklı soğutma sistemlerinin karşılaştırmıştır.

Pasif Soğutma Sistemleri: Bu sistemler, ısıyı depolamak ve serbest bırakmak için uygun malzemeler kullanır. Bu malzemelerin başında faz değişim malzemeleri (PCM) gelir. PCM'ler, belirli sıcaklık aralıklarında ısıyı absorbe eder ve faz değişimi ile serbest bırakır, böylece batarya sıcaklıklarının denetlenmesine yardımcı olur.

Faz değişim malzemeleri (PCM), belirli sıcaklık aralıklarında ısı depolayabilen ve serbest bırakabilen malzemelerdir. PCM'ler, katıdan sıvıya ya da sıvıdan gaz haline geçiş sırasında ısıyı depolar ve bu ısıyı belirli sıcaklık aralıklarında serbest bırakır. Bu özellik, PCM'leri, batarya modüllerinin termal yönetimi için etkili bir pasif soğutma çözümü haline getirir. Chen vd, (2016) çalışmalarında farklı soğutma sistemlerinin etkinliğini araştırmışlardır. PCM'lerin batarya sistemlerinde kullanımı, bataryaların aşırı ısınmasını engellemeye yardımcı olarak, batarya ömrünü uzatır ve verimliliğini artırır.

Literatürde PCM kullanımı ile ilgili yapılan çalışmalarda, özellikle batarya modüllerinin çevresinde PCM malzemelerinin yerleştirilmesinin, bataryaların çalışma sıcaklıklarının daha dengeli bir şekilde kontrol edilmesine yardımcı olduğu

vurgulanmıştır. PCM'lerin etkinliği, malzemenin faz geçiş sıcaklığı, ısı depolama kapasitesi ve çevresel koşullarla doğru orantılıdır. PCM'lerin sağladığı termal dengeleme, batarya hücrelerinin daha verimli bir şekilde çalışmasını sağlar ve böylece bataryaların sıcaklık dalgalanmalarına karşı daha dirençli hale gelmesini temin eder.

Fakat PCM kullanımının tasarımı, dikkatli bir şekilde optimize edilmelidir. PCM malzemelerinin batarya hücreleri ile uyumlu şekilde seçilmesi ve yerleştirilmesi, termal yönetim performansını doğrudan etkilemektedir. PCM'nin termal iletkenlik özellikleri, bataryanın şarj-deşarj döngülerinde ürettiği ısının etkin bir şekilde dağıtılması açısından önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır.

Batarya modüllerinin tasarımında PCM kullanımı, genellikle bataryaların etrafına yerleştirilen PCM levhaları ya da sıvı PCM sistemleri ile yapılmaktadır. Bu tasarımlar, bataryaların sıcaklıklarını belirli bir aralıkta tutmak amacıyla çeşitli yapılandırmalar kullanmaktadır. PCM kullanımı, bataryaların şarj ve deşarj süreçlerinde üretilen ısının etkin bir şekilde depolanmasını ve zaman içinde serbest bırakılmasını sağlar. Böylece batarya modülünün i sıcaklıkları dengelenir ve aşırı ısınma engellenmiş olur.

PCM'lerin verimli bir şekilde entegre edilmesi, batarya modüllerinin ömrünü artırır ve aynı zamanda bataryaların daha verimli çalışmasını sağlar. Bununla birlikte, PCM malzemelerinin geçiş sıcaklıkları, bataryaların çalışma koşullarına göre optimize edilmelidir. Bu noktada, PCM tabanlı sistemlerin tasarımında kullanılan malzeme seçimleri, bataryaların kullanım amacına ve çevresel koşullara göre belirlenmelidir .

Faz değişim malzemelerinin batarya modüllerinde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için, bu sistemlerin performansının doğru bir şekilde analiz edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, ANSYS gibi mühendislik simülasyon yazılımları, batarya modüllerinin termal analizlerini gerçekleştirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. ANSYS, batarya hücrelerinin sıcaklık profilini simüle edebilir ve PCM'lerin bu profilde nasıl bir etki yaratacağını değerlendirebilir.

Simülasyonlar, PCM'lerin batarya modüllerinin çevresindeki sıcaklık dağılımına olan etkisini inceleyerek, bataryaların çalışma sıcaklıklarının nasıl dengelendiğini ve PCM'lerin ne kadar etkin olduğunu ortaya koyar. Ayrıca, PCM

kullanımı ile batarya modüllerinin ömrü üzerindeki etkiler de simülasyonlar ile test edilebilir. ANSYS, batarya sistemlerinin termal yönetimini optimize etmek için gereken verileri sağlamak adına güçlü bir araçtır

Gelecek Yönelimleri ve Araştırma Alanları:

PCM'lerin batarya modüllerinde kullanımı, özellikle elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemlerinde büyük bir potansiyel taşımaktadır. Ancak, bu sistemlerin etkinliği, malzeme seçiminden tasarıma, entegrasyondan simülasyona kadar birçok faktöre bağlıdır. Gelecekteki çalışmalar, PCM malzemelerinin daha verimli hale gelmesini sağlayacak yeni malzeme kombinasyonları ve hibrit soğutma sistemlerini incelemelidir. Ayrıca, batarya sistemlerinin termal yönetimi için PCM'lerin diğer soğutma yöntemleriyle entegrasyonu da araştırılması gereken önemli bir konu olarak öne çıkmaktadır.

Bunlara ek olarak, ANSYS gibi ileri düzey simülasyon yazılımlarının kullanımı, batarya modüllerinin tasarımının optimize edilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Gelecekteki araştırmalar, PCM'lerin batarya modüllerine entegrasyonunu daha verimli hale getirecek, batarya sistemlerinin performansını ve ömrünü artıracak stratejilerin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır.

1.4 Hipotez

Bu tezde öne sürülen ana hipotez, Faz Değişim Malzemeleri (PCM) tabanlı pasif soğutma sistemlerinin batarya ısı yönetim sistemlerine entegrasyonunun, bataryaların sıcaklık düzenlemeleri ve genel performansını önemli ölçüde iyileştirebileceğidir. Lityum iyon bataryalar gibi yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryalar, özellikle şarj ve deşarj süreçlerinde yüksek miktarda ısı üretir. Bu ısı birikimi, bataryaların çalışma sıcaklıklarını istenmeyen seviyelere çıkartarak, verimlilik kayıplarına, aşırı ısınmaya ve daha ciddi güvenlik sorunlarına yol açabilir. Bu tür olumsuzlukların önüne geçebilmek için ısı yönetim stratejileri kritik bir öneme sahiptir. Özellikle, batarya hücrelerinin termal yönetiminin daha verimli hale getirilmesi, batarya teknolojilerinin gelişmesinde önemli bir faktördür.

Faz Değişim Malzemeleri (PCM), belirli sıcaklık aralıklarında faz değişimi yapabilen malzemelerdir. PCM'ler, erime ve donma süreçlerinde ısı enerji depolayabilir ve gerektiğinde bu enerjiyi serbest bırakabilir. Bu özellikleri sayesinde,

batarya hücrelerinin çevresindeki sıcaklık dengesini sağlamak ve aşırı ısınma gibi olumsuz durumları önlemek mümkündür. PCM'lerin ısı enerjisi depolama kapasitesinin, bataryaların sıcaklıklarını optimum seviyelerde tutmayı başararak, bataryaların verimliliğini artırmakta, ömrünü uzatmakta ve güvenliğini sağlamakta önemli rol oynayabilir. Bu tezde önerilen hipotez, PCM malzemelerinin batarya modüllerine entegre edilmesinin, ısı yönetim sistemlerini daha verimli ve güvenli hale getireceği, ayrıca bataryaların performansını iyileştireceği şeklinde özetlenebilir.

Sıcaklık Dalgalanmalarının Azaltılması ve Termal Yönetimdeki İyileşme

Faz Değişim Malzemeleri (PCM) kullanılarak yapılan ısı yönetim sistemlerinde, batarya hücrelerinin sıcaklık dalgalanmaları önemli ölçüde azaltılabilir. Bataryaların şarj ve deşarj sırasında ürettiği ısı, sistemin iç sıcaklığında dalgalanmalara yol açar. Bu dalgalanmalar, bataryaların verimli çalışmasını engelleyebilir, zamanla kapasite kaybına neden olabilir ve hücrelerin kimyasal bileşenlerinde bozulmalara yol açabilir. PCM malzemeleri, faz değişimi sırasında ısıyı emerek bu sıcaklık dalgalanmalarını dengelemeye yardımcı olur. Bu sayede, batarya hücrelerinin sıcaklıkları daha sabit ve homojen hale gelir. PCM'ler, aşırı sıcaklıkların hızla birikmesini engelleyerek, sistemin genel ısı davranışını stabilize eder. Isı birikimi sırasında faz değiştiren PCM'ler, sıcaklıkların hızla yükselmesini engeller ve bataryaların optimal çalışma sıcaklıklarında kalmasına yardımcı olur.

Termal Kaçak Risklerinin Minimize Edilmesi:

Batarya sistemlerinde en büyük güvenlik risklerinden biri, termal kaçak adı verilen olgudur. Bu durum, bataryaların aşırı ısındığı ve kimyasal reaksiyonların hızlandığı, dolayısıyla bataryaların kontrolsüz bir şekilde ısındığı ve patlama ya da yangın riski taşıdığı bir durumdur. Kshetrimayum vd. (2019) çalışmalarında hücrelerde oluşan aşırı ısınmanın termal kaçak etkilerini araştırmışlardır. Özellikle elektrikli araçlar gibi yüksek enerji yoğunluğuna sahip sistemlerde, bu tür termal kaçaklar büyük tehlikelere yol açabilir. PCM malzemeleri, ısının kontrolsüz bir şekilde artmasını engellemek için önemli bir çözüm sunar. PCM'ler, belirli bir sıcaklık seviyesinde ısının depolanmasını sağlar ve sıcaklık bu seviyenin üzerine çıkmaya başladığında faz değişimi başlar, böylece bataryanın sıcaklığı dengelenmiş olur. PCM malzemeleri sayesinde, batarya hücrelerinin etrafındaki sıcaklık dalgalanmaları minimize edilir ve termal kaçak riski önemli ölçüde azaltılır. Hallaj,

vd. (2005) çalışmalarında PCM ile bataryaların termal yönetim etkinliğini ispatlamışlardır.

Bu mekanizma, bataryaların daha güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayarak, özellikle elektrikli araçların bataryalarında olası yangın veya patlama risklerinin önlenmesine yardımcı olabilir. PCM tabanlı soğutma sistemleri, aktif soğutma sistemlerine göre daha güvenli ve enerji verimli bir alternatif sunar. Ayrıca, PCM'lerin basit ve güvenli yapısı, sistemin karmaşıklığını ve olası arıza durumlarını azaltarak daha sağlam bir yapı ortaya koyar.

Batarya Döngü Ömrünün Uzatılması:

Batarya teknolojilerinde önemli bir hedef, bataryaların ömrünü mümkün olduğunca uzatmaktır. Bataryaların ömrü, ısı yönetimle doğrudan ilişkilidir. Yüksek sıcaklıklar, bataryaların kimyasal reaksiyonlarını hızlandırarak elektrotların bozulmasına ve elektrolitlerin aşırı reaksiyona girmesine neden olur. Bu, bataryanın kapasitesinin zamanla azalmasına ve sonunda bataryanın tamamen verimsiz hale gelmesine yol açar. PCM tabanlı soğutma sistemleri, bataryaların sıcaklıklarını dengeleyerek, bu tür olumsuz etkilerin önüne geçebilir. PCM'ler, batarya hücrelerinin sıcaklıklarının sabit tutulmasına yardımcı olarak, hücrelerin kimyasal bileşimlerinin korunmasına olanak tanır. Bu da bataryaların döngü ömrünü uzatır.

Isı birikimi, batarya sistemlerinin verimliliğini de doğrudan etkiler. PCM malzemelerinin ısıyı dengeleyebilme özelliği sayesinde, batarya hücrelerinin daha verimli çalışması sağlanır. Bataryaların daha düşük iç dirençle çalışması, genel verimliliği artırır ve bu da bataryaların daha uzun süre yüksek performansla çalışmasına yardımcı olur. Ayrıca, sıcaklıkların sabit tutulması, bataryaların şarj-deşarj döngülerinin daha verimli bir şekilde yapılmasını sağlar.

Yüksek Güç Talepleri Altında Stabil Performans:

Elektrikli araçlar ve diğer enerji depolama sistemleri, yüksek güç talepleri altında batarya hücrelerinin verimli çalışmasını gerektirir. Yüksek güç çıkışı, batarya hücrelerinde ısı üretiminin artmasına yol açar. PCM malzemeleri, özellikle bataryaların yüksek güç talepleri altında çalıştığı durumlarda büyük avantajlar sunar. PCM malzemelerinin faz değişimi sırasında ısıyı depolama yeteneği, bataryaların sıcaklıklarının hızla yükselmesini engeller ve bataryaların daha stabil bir performans sergilemesini sağlar. Bu özellik, bataryaların yüksek güç tüketimi ve uzun süreli

kullanım gibi zorlu koşullar altında bile daha verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasına yardımcı olur.

Ayrıca, PCM malzemelerinin enerji depolama kapasitesinin yüksek olması, özellikle elektrikli araçlarda bataryaların uzun süreli şarj/deşarj döngülerini daha stabil bir şekilde geçirmesine olanak tanır. Yüksek güç talepleri ve uzun yolculuklar gibi zorlu koşullarda bataryaların sıcaklıkları daha az dalgalanır, bu da hem bataryaların ömrünü uzatır hem de araçların genel performansını artırır.

Bu hipotez doğrultusunda yapılan araştırmalar, PCM tabanlı soğutma sistemlerinin batarya ısı yönetimi üzerinde önemli iyileştirmeler sağlayabileceğini göstermektedir. PCM'lerin kullanımı, bataryaların sıcaklıklarını optimum seviyelerde tutarak, bataryaların verimliliğini, ömrünü ve güvenliğini artırabilir. PCM malzemeleri, sıcaklık dalgalanmalarını dengeleyerek, termal kaçak risklerini azaltır ve batarya sisteminin daha stabil bir performans sergilemesini sağlar. Ayrıca, bataryaların daha uzun süre verimli bir şekilde çalışmasını sağlayarak, döngü ömrünü uzatır.

Batarya teknolojilerinin geleceği, daha verimli, daha güvenli ve uzun ömürlü sistemler geliştirmeye odaklanmaktadır. Bu bağlamda, PCM tabanlı soğutma çözümleri, bataryaların yüksek güç talepleri altında bile stabil performans göstermelerini sağlayarak, batarya sistemlerinin sürdürülebilirliğini artırabilir. Gelecekteki araştırmalar, PCM malzemelerinin farklı batarya sistemlerine entegrasyonunu ve bu sistemlerin performanslarını daha detaylı bir şekilde incelemeye devam edecektir. Huang vd. (2018) çalışmalarında Çeşitli PCM uygulamalarını deneysel olarak incelemişlerdir.

2. LİTERATÜR TARAMASI

Faz Değişim Malzemeleri (PCM) kullanarak batarya modüllerinin termal yönetimi ve ANSYS ile yapılan termal analizler üzerine yapılan literatür taramaları, bu alandaki gelişmeleri ve uygulamaları anlamak açısından önemlidir. çalışmalarında li-on bataryaların termal davranışlarını incelemişlerdir (Bandhauer vd., 2011).

Aşağıda, bu konudaki önemli çalışmaları ve kaynakları sıralanmıştır:

Kaba vd. (2021) çalışmalarında, elektrikli araçlarda kullanılan batarya türlerini ve bu bataryaların termal yönetim sistemlerini inceleyerek, CM kullanımının potansiyel faydalarını doğrulamışlardır.

Peneklioğlu ve Bilen (2024) araştırmalarında, elektrikli araç batarya modüllerinin su ile soğutulmasını ve bu süreçteki termal dirençleri ANSYS Fluent yazılımı kullanarak analiz etmektedir.

Şefkat ve Özel (2020) çalışmalarında, elektrikli araç batarya hücrelerinin elektriksel ve termal modellerini MATLAB & SIMULINK ve ANSYS programları kullanarak oluşturmuş ve doğrulamıştır.

Kaya ve Kılıç (2024) çalışmalarında, sıvı soğutma sistemleri için batarya modüllerinde soğutma bloklarının termal tasarımını ve performansını karşılaştırarak, PCM kullanımının etkilerini incelemektedir.

Göçmen (t.y.) araştırmasında, hava soğutmalı batarya termal yönetim sistemlerini inceleyerek, batarya modüllerinin termal yönetiminde PCM'lerin potansiyel kullanımını tartışmaktadır.

Özbektaş vd. (2024) Kaleli çalışmalarında, zorlanmış hava soğutma esaslı batarya hücrelerinin ısı dağılım performansını inceleyerek, PCM'lerin termal yönetimdeki rolünü değerlendirmektedir.

Weng vd. (2019) araştırmalarında, batarya termal yönetimi için PCM modüllerinde iç kanatçıkların optimizasyonunu ele alarak, termal performansı artırmayı hedeflemektedir.

Bozorg ve Torres (2025). çalışmalarında, elektrokimyasal bataryalarda soğutma kanalları ve köpükle entegre edilmiş PCM'ler kullanarak çok yönlü termal düzenlemeyi incelemektedir.

Rai vd., (2023) bu makalede, faz değişim malzemeleri kullanarak termal enerji depolamanın sayısal simülasyonunu yaparak, batarya termal yönetiminde PCM kullanımının etkinliğini araştırmaktadır.

Naghdbishi vd., (t.y) bu çalışmada, faz değişim malzemeleri ile entegre edilmiş bir fotovoltaik termal sistemin performansını sayısal olarak inceleyerek, PCM kullanımının termal yönetimdeki rolünü değerlendirmektedir.

Ling vd., (2013) bu makalede, lityum-iyon bataryaların termal yönetimi için faz değişim malzemelerinin kullanımını ele alarak, batarya ömrünü uzatma ve güvenliği artırma konularını tartışmaktadır. Batarya termal yönetimi için faz değişim malzemeleri tabanlı ısı emicilerin termal performansını değerlendirerek, PCM kullanımının etkinliğini araştırmaktadır.

2.1 Batarya Soğutma Sistemlerinin Önemi

Bataryaların verimli çalışabilmesi, özellikle yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryaların kullanıldığı durumlarda sıcaklık yönetimiyle doğrudan bağlantılıdır. Batarya hücreleri, şarj ve deşarj döngüleri sırasında iç direnç nedeniyle ısı üretir. Bu ısının birikmesi, bataryaların aşırı ısınmasına ve dolayısıyla hücrelerin kimyasal yapılarında bozulmalara, kapasite kayıplarına ve hatta güvenlik sorunlarına yol açabilir. Bu yüzden batarya sistemlerinin uzun süre verimli ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için ısı yönetim sistemlerinin doğru bir şekilde tasarlanması büyük önem taşır.

Batarya soğutma sistemleri, bataryaların çalışma sıcaklıklarını ideal seviyelerde tutmak için çeşitli teknolojiler kullanır. Bu sistemler genellikle iki ana kategoriye ayrılır: aktif soğutma ve pasif soğutma sistemleri.

Aktif soğutma sistemleri, ıyıyı dışarı atmak için sıvı veya hava kullanır. Bu tür sistemler, genellikle yüksek performans gerektiren uygulamalarda tercih edilir, örneğin elektrikli araçlar ya da büyük enerji depolama sistemlerinde. Ancak aktif soğutma sistemlerinin daha karmaşık altyapılar gerektirdiği ve yüksek enerji tüketimi

yaptığı unutulmamalıdır. Bu yüzden küçük ve orta ölçekli uygulamalarda kullanımı sınırlı olabilir.

Pasif soğutma sistemleri ise daha basit yapılar olup, düşük enerji tüketimi gerektiren ve çevre dostu çözümler sunar. Bu sistemler, fanlar, soğutucu sıvılar ya da çevresel faktörlerden yararlanarak ısıyı dışarı atar. Pasif soğutma sistemleri daha maliyet etkin olup çevreye zarar vermez. Ancak bu tür sistemlerin verimliliği genellikle daha sınırlıdır ve aşırı ısınma gibi problemleri tamamen engellemeyebilir.

Bu noktada, Faz Değişim Malzemeleri (PCM) tabanlı pasif soğutma sistemleri, önemli bir alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır. PCM'ler, düşük enerji tüketimi ile yüksek verimlilik sağlar ve batarya sıcaklıklarını dengede tutmaya yardımcı olur. Bu tür malzemeler, aşırı ısınmayı engelleyebilir ve bataryaların daha verimli ve uzun ömürlü olmasına katkı sağlar.

2.2 PCM Malzemelerinin Batarya Soğutma Sistemlerindeki Kullanımı

Faz Değişim Malzemeleri (PCM), batarya sıcaklık yönetimi için gerçekten etkili bir çözüm sunar. PCM'ler, belirli bir sıcaklık aralığında faz değiştirerek ısının depolanmasını ve serbest bırakılmasını sağlar. Yani, bu malzemeler bir faz değişimi sırasında ısıyı emebilir ya da serbest bırakabilir, böylece çevresindeki sıcaklıkları düzenleyebilir. Bu özellik, bataryaların aşırı ısınmasını engellemeye yardımcı olur ve bataryaların daha verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasına olanak tanır. PCM'ler, bataryaların sıcaklık dalgalanmalarını dengeleyerek, sabit bir sıcaklık seviyesinin korunmasını sağlar. Bu da bataryaların daha uzun süre verimli bir şekilde çalışmasını mümkün kılar. Luo vd., (2022) çalışmalarında PCM ile termal yönetim sistemleri etkinliklerini araştırmışlardır.

Lityum iyon bataryalar gibi yüksek enerji yoğunluğuna sahip bataryalar, genellikle fazla ısı üretirler. Bu ısı birikimi, bataryaların hızla ısınmasına ve hücrelerin aşırı ısınarak zarar görmesine yol açabilir. İşte tam bu noktada, PCM malzemelerinin kullanımı devreye girer. PCM'ler, bataryaların sıcaklıklarını optimum seviyede tutarak kapasite kayıplarını engeller, verimliliği artırır ve bataryaların ömrünü uzatır.

PCM'lerin en büyük avantajlarından biri, faz değişimi sırasında yüksek miktarda ısıyı depolayabilmeleridir. Bataryaların şarj ve deşarj döngüleri sırasında

oluşan fazla ısı, PCM'ler tarafından emilir ve sonradan bu ısı gerektiğinde serbest bırakılır. Bu da bataryaların sıcaklıklarının sabit kalmasını sağlar ve aşırı ısınmayı engeller. PCM'ler, üç ana kategoride incelenebilir: Organik PCM'ler, İnorganik PCM'ler, Ötektik PCM'ler.

PCM seçimi, batarya hücrelerinin çalışma koşullarına ve sıcaklık gereksinimlerine göre yapılmalıdır. PCM'nin faz değişim sıcaklığı, bataryaların güvenli çalışma sıcaklıklarıyla uyumlu olmalıdır. Bu, bataryaların güvenli ve verimli çalışabilmesi için oldukça önemlidir. Ayrıca, PCM'lerin düşük enerji tüketimi, kolay entegrasyonu ve çevre dostu olmaları, onları batarya soğutma sistemlerinde tercih edilen bir seçenek haline getirmektedir.

2.3. 21700 Tipi Batarya Hücreleri ve Termal Yönetimi

Son yıllarda, özellikle elektrikli araçlar ve enerji depolama sistemlerinde 21700 tipi batarya hücreleri daha sık kullanılmaya başlandı. Bu batarya türü, yüksek enerji yoğunluğu ve uzun ömrü sayesinde batarya modülleri için oldukça tercih edilen bir seçenek . Ancak, bu hücrelerin sağladığı yüksek enerji yoğunluğu, şarj ve deşarj döngüleri sırasında fazla ısı üretir. Bu ısı birikimi, batarya hücrelerinin sıcaklıklarını hızla artırarak aşırı ısınmalarına neden olabilir. Dolayısıyla, 21700 tipi batarya hücrelerinin termal yönetimi için etkili bir soğutma çözümü gereklidir.

Bataryaların aşırı ısınmasını engellemek için pek çok farklı soğutma yöntemi önerilmiştir. Bunlar arasında aktif soğutma sistemleri (örneğin sıvı soğutma) ve pasif soğutma sistemleri bulunmaktadır. Özellikle PCM (Faz Değişim Malzemeleri) tabanlı pasif soğutma yöntemleri, 21700 tipi batarya hücreleri için oldukça etkili bir çözüm sunar. PCM'lerin yüksek ısı depolama kapasitesi, bataryaların sıcaklıklarını dengede tutarak aşırı ısınmayı engeller. Bu sayede bataryaların ömrü uzar ve performansları daha stabil hale gelir.

Bataryaların ısı yönetimi, birkaç önemli faktöre dayanır. Bu faktörler arasında akım akışı, iç direnç, şarj durumu (SOC) ve pil kimyası gibi unsurlar yer alır. Şarj ve deşarj döngüleri sırasında iç direnç nedeniyle ısı üretimi artar ve bataryalar daha fazla ısınır. PCM'ler ise bu ısıyı emerek sıcaklıkların düzenlenmesine yardımcı olur, böylece bataryaların verimli ve güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar.

2.4. ANSYS Yazılımı ile Termal Analiz ve Simülasyonlar

Batarya modüllerinin termal yönetim sistemlerini tasarlarırken, termal analizler ve simülasyonlar oldukça önemli bir rol oynamaktadır. Bu süreç, bataryaların ısıl davranışlarını anlamak ve soğutma sistemlerinin etkinliğini değerlendirmek için gereklidir. ANSYS yazılımı, batarya modüllerinin termal simülasyonlarını yapmak için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. ANSYS, ısı akışı, sıcaklık dağılımı ve zamanla değişen sıcaklık profillerini simüle edebilir, bu da bataryaların termal performansı hakkında önemli bilgiler sağlar.

PCM tabanlı soğutma sistemlerinin batarya hücrelerine entegrasyonunu simüle etmek için ANSYS kullanımı, batarya modülündeki sıcaklık dağılımını ve soğutma etkisini daha iyi anlamaya yardımcı olur. ANSYS, PCM'nin faz değişim sıcaklıklarını dikkate alarak, batarya hücrelerinin çevresindeki ısıl davranışları ayrıntılı bir şekilde inceleyebilir. Bu tür analizler, tasarım sürecini optimize etmeye ve bataryaların daha verimli çalışmasını sağlamaya yardımcı olur.

Yapılan literatür taramaları, PCM malzemelerinin batarya soğutma sistemlerinde oldukça etkili bir çözüm sunduğunu ve batarya ömrünü uzatmaya yardımcı olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca, 21700 tipi batarya hücrelerinin yüksek enerji yoğunluğunun, gelişmiş soğutma yöntemlerine olan ihtiyacı artırdığı vurgulanmıştır. ANSYS gibi termal simülasyon araçları, batarya modüllerindeki soğutma sistemlerinin etkinliğini değerlendirirken büyük bir rol oynamaktadır. Bu tezde, PCM malzemelerinin batarya modüllerine entegrasyonunun ve termal analizlerin, batarya sistemlerinin verimliliğini nasıl artırabileceği araştırılmaktadır.

Son zamanlarda, PCM tabanlı termal yönetim sistemlerindeki gelişmeler arasında, PCM'nin performansını iyileştirmek amacıyla sıvı veya hava soğutmasıyla birleştirilen hibrit soğutma sistemlerinin kullanımı dikkat çekmektedir. Gelecekteki araştırmalar, daha yüksek termal iletkenliğe, geliştirilmiş kararlılığa ve pil malzemeleriyle daha iyi uyumluluğa sahip gelişmiş PCM'lerin tasarımına odaklanabilir.

Ayrıca, akıllı sensörlerin ve kontrol sistemlerinin PCM soğutma sistemlerine entegre edilmesi, batarya performansına dayalı dinamik termal yönetim sistemlerinin gerçek zamanlı izlenmesine ve ayarlanmasına imkân tanıyacak önemli bir gelişme olarak öne çıkmaktadır.

3. TEORİK ARKA PLAN

3.1 Pil Isı Üretimi

Bir pilin ısısı, elektriksel enerjinin ısı enerjisine dönüşmesiyle ilgili olarak hesaplanabilir. Bu dönüşüm genellikle aşağıdaki formüllerle yapılır:

$$\text{Joule Isısı (} P = I^2R \text{)} \quad (3.1)$$

En yaygın ısı üretimi kaynağı, pilin iç direncinden kaynaklanan Joule ısısidir. Bu, bir pilin iç direncinde bir akım geçtiğinde, direnç nedeniyle ısı üretmesini ifade eder.

Formül:

$$Q = I^2 R \quad (3.2)$$

Q = Isı miktarı (Joule cinsinden)

I = Pilin akımı (Amper cinsinden)

R = Pilin iç direnci (Ohm cinsinden)

Bu formülde, pilin iç direncinden dolayı geçen elektrik akımı ısıya dönüşür. Isı miktarı, akımın karesi ile iç dirençle orantılıdır. Bu, pilin verimliliğini etkileyen önemli bir faktördür, çünkü pilin iç direnci ne kadar yüksekse, o kadar fazla ısı üretir.

$$\text{Isı Enerjisi (} Q = C \times \Delta T \text{)} \quad (3.3)$$

Pil ısısı, aynı zamanda pilin sıcaklık değişimiyle de ilişkilidir. Eğer pilin sıcaklığı zaman içinde değişiyorsa, bu değişim, pilin ısısının bir göstergesi olabilir.

Formül:

$$Q = C \times \Delta T$$

Q = Isı miktarı (Joule cinsinden)

C = Pilin ısı kapasitesi (Joule/°C cinsinden)

ΔT = Sıcaklık değişimi (°C cinsinden)

Bu formülde, pilin ısı kapasitesi (C), pilin iç yapısına bağlı olarak belirlenen bir özelliktir ve sıcaklık değişimi (ΔT) ile çarpılarak ısı miktarı hesaplanır.

Elektriksel Enerjinin Isıya Dönüşümü ($P = V \times I$)

Pil çalışırken, elektriksel enerji üretilir ve bu enerji ısıya dönüşebilir. Pilin gerilmesi (V) ve akımı (I) ile ilişkili bir formüle sahip olabiliriz.

Formül:

$$P=V \times I \quad (3.4)$$

P = Güç (Watt cinsinden)

V = Pilin çıkış gerilmesi (Volt cinsinden)

I = Pilin akımı (Amper cinsinden)

Bu formül, pilin dışarıya sağladığı elektriksel gücü verir. Ancak, pilin verimliliği ile ilgili olarak, bu güçten bazı kısımlarının ısıya dönüştüğü unutulmamalıdır.

Bir pilin toplam ısı üretimi, bu farklı faktörlerin birleşiminden hesaplanabilir. Bir pilin çalışması sırasında hem iç dirençten hem de akım miktarından kaynaklanan ısılar vardır. Bu ısılar genellikle Joule ısısı ile ilişkili olup pilin verimli çalışmadığı durumlarda fazla ısı üretir.

Toplam Isı Hesaplama:

$$Q_{\text{toplam}}=I^2R \times \Delta t \quad (3.5)$$

Q = Toplam ısı (Joule cinsinden)

I = Akım (Amper)

R = İç direnç (Ohm)

Δt = Zaman (saniye)

Pildeki sıcaklık artışı, pilin performansı üzerinde etkili olabilir. Bu nedenle pilin sıcaklık değişimini ve ısı üretimi göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, pilin çevresel faktörlerden etkilenmesi (örneğin ortam sıcaklığı) de ısı üretimini değiştirebilir. Weng., vd. (2019) çalışmalarında fin yapıların PCM ile termal yönetim etkilerini göstermişlerdir.

3.2 Pillerde Isıl İletkenlik ve Isı Transferi

Isıl iletkenlik, bir maddenin ısıyı ne kadar iyi iletmediğini gösteren bir özelliktir. Pillerde, ısının pilin bir kısmından diğerk kısmına veya dış ortama nasıl iletildiğini anlamak önemlidir. Isıl iletkenlik, genellikle k ile gösterilir ve $W/(m \cdot K)$ (watt/metre-kelvin) biriminde ölçülür.

Isıl iletkenlik formülü:

$$Q=k \cdot A \cdot \Delta T/L \quad (3.6)$$

Q = Isı transferi (Watt)

k = Isıl iletkenlik ($W/m \cdot K$)

A = Isı iletimi yapılan yüzey alanı (m^2)

ΔT = Sıcaklık farkı (Kelvin veya $^{\circ}C$)

L = Isının iletildiği mesafe (metre cinsinden)

Bu formül, pillerde ısının, pilin iç yapısından dış yüzeyine nasıl iletildiğini tanımlar. Burada, k (ısııl iletkenlik) pilin malzemesine bağlıdır ve pilin yapısında kullanılan maddelerin ısııl iletkenlik özelliklerini bilmek gereklidir.

Pilde Isıl İletkenlik Hesaplaması:

Eğer bir pilin iç kısmındaki ısının dış yüzeye doğru iletilmesini incelemek istiyorsak, pilin sıcaklık farkını (ΔT) ve malzeme özelliklerini (k) dikkate alarak ısının iletildiği mesafeyi (L) göz önünde bulundurabiliriz. Bu sayede, pilin sıcaklık artışı ve yönetimi hakkında bilgi sahibi olabiliriz.

Isı transferi, ısının bir yerden başka bir yere hareket etmesidir. Üç ana ısı transfer mekanizması vardır: iletim (konduksiyon), konveksiyon ve ışıınım (radyasyon). Pillerde en yaygın olan ısı transferi mekanizması iletimdir, ancak konveksiyon ve ışıınım da göz önünde bulundurulabilir. Duan ve Naterer (2010) çalışmalarında batarya sistemlerinde PCM ile termal yönetimde ısı transferi hesaplamalarını detaylandırmışlardır.

Isı iletimi, ısının bir madde içinde, moleküllerin çarpışarak yayılması yoluyla transfer edilmesidir. Bu, özellikle pilin iç yapısındaki ısıyı pilin dış kısmına iletmek için önemlidir. Isıl iletkenlik formülü burada da geçerlidir.

Formül:

$$Q=k \cdot A \cdot \Delta T L Q$$

Bu formülde, ısının pilin iç kısmından dış yüzeye doğru iletimi gözlemlenir.

Isı konveksiyonu, bir sıvı veya gazın hareketi ile ısının taşınmasıdır. Eğer pilin çevresinde bir hava akışı varsa (örneğin, aktif soğutma sistemleri kullanılıyorsa), bu durumda ısı, hava ile transfer edilir.

Isı transferinin konveksiyon yoluyla gerçekleştiği formül:

$$Q=h \cdot A \cdot \Delta T \quad (3.7)$$

h = Konveksiyon ısı iletkenlik katsayısı ($W/m^2 \cdot K$)

A = Isı iletimi yapılan yüzey alanı (m^2)

ΔT = Sıcaklık farkı (Kelvin veya $^{\circ}C$)

Konveksiyon ısı iletkenlik katsayısı h , genellikle pilin çevresindeki ortam koşullarına (örneğin hava hızına, sıcaklık farkına) ve ortamın özelliklerine bağlıdır.

Isı Işınımı (Radiation)

Isı ışınımı, ısının elektromanyetik dalgalarla (genellikle kızılötesi ışınım) transfer edilmesidir. Pillerin dış yüzeyinden çevreye doğru yayılan ısı, ışınım yoluyla da olabilir. Işınımın hesaplanması, Stefan-Boltzmann yasasına dayanır.

Isı ışınımı formülü:

$$Q=\sigma \cdot A \cdot \epsilon \cdot (T_{pil}^4 - T_{çevre}^4) \quad (3.8)$$

σ = Stefan-Boltzmann sabiti ($5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$)

A = Yüzey alanı (m^2)

ϵ = Emisyon katsayısı (pilin yüzey malzemesine bağlı olarak değişir, genellikle 0 ile 1 arasında bir değere sahiptir)

T_{pil} = Pilin yüzey sıcaklığı (Kelvin cinsinden)

$T_{çevre}$ = Çevre sıcaklığı (Kelvin cinsinden)

Toplam Isı Transferi (Q)

Bir pilin toplam ısı transferi, ısı iletimi, konveksiyonu ve ışınımı birleştirilerek hesaplanabilir. Bu durumda:

$$Q_{\text{toplam}}=Q_{\text{iletim}}+Q_{\text{konveksiyon}}+Q_{\text{ışınım}}$$

Pilin Sıcaklık Profili ve Isı Yönetimi

Pilin iç sıcaklık dağılımı, pilin çalışma koşullarına bağlı olarak değişir. Eğer pilin içinde ısı birikiyorsa, pilin sıcaklık artışı çok fazla olabilir ve bu durum pilin ömrünü kısaltabilir. Bu yüzden pilin iç sıcaklıklarının izlenmesi ve uygun soğutma yöntemlerinin uygulanması önemlidir.

Pilin sıcaklık profili, özellikle yoğun akım çeken uygulamalarda dikkatle izlenmeli ve gerekli ısı yönetim teknikleri (örneğin aktif soğutma sistemleri) kullanılmalıdır.

3.3 Faz Değişim Malzemeleri (PCM'ler)

Faz Değişim Malzemeleri (PCM'ler), faz değişimi sırasında ısıyı emen veya serbest bırakan malzemelerdir. Bir PCM, ısıyı emdiğinde erir ve ısıyı serbest bıraktığında katılaşır. Bu özellik, PCM'lerin sıcaklıklarını neredeyse sabit tutmalarını sağlar ve bu da onları bataryalar gibi sistemlerin sıcaklık dengesini sağlamak için ideal hale getirir.

PCM'ler üç farklı türde sınıflandırılabilir:

Organik PCM'ler: Bunlar parafin mumu ve yağ asitleri gibi maddeleri içerir. Organik PCM'ler, yüksek bir füzyon gizli ısısına sahiptir, bu da onları büyük miktarda enerji depolayabilen malzemeler yapar. Ancak, genellikle daha düşük termal iletkenliklere sahip oldukları için, hızlı ısı transferi gerektiren uygulamalarda etkinlikleri sınırlıdır.

İnorganik PCM'ler: Tuz hidratları ve metalleri içerir. İnorganik PCM'ler, genellikle daha yüksek termal iletkenlik ve daha fazla gizli ısı kapasitesine sahiptir, bu da onları termal yönetim açısından daha verimli hale getirir. Ancak, bu tür PCM'ler aşırı soğuma veya faz ayrımı gibi sorunlarla karşılaşabilirler.

Ötektik PCM'ler: Bu tür malzemeler, belirli bir sıcaklıkta eriyen ve donan organik veya inorganik madde karışımlarından oluşur. Ötektik PCM'ler, saf PCM'lere göre daha iyi termal özelliklere ve faz kararlılığına sahiptir, bu yüzden daha zorlu ve kritik uygulamalarda tercih edilir.

Bu farklı PCM türleri, çeşitli termal yönetim ihtiyaçlarına çözüm sunarak, sistemlerin daha verimli ve güvenli çalışmasına yardımcı olur.

3.4 Pillerde PCM ile Isı Yönetimi

PCM'lerin pil termal yönetimindeki en büyük avantajı, yüksek ısı yük dönemlerinde aşırı ısıyı emerek sıcaklığın fazla yükselmesini engellemeleri ve pilin sıcaklığı düştüğünde bu ısıyı serbest bırakarak dengeyi sağlamalarıdır. Ancak PCM'lerin soğutma verimliliği, birkaç önemli faktöre bağlıdır:

Erime Noktası: PCM'nin erime noktası, pilin çalışma sıcaklık aralığına uyum sağlamalıdır. Eğer PCM çok erken erirse, pilin aşırı ısınmasını engelleyemez, çok geç erirse de etkin bir soğutma sağlayamaz. Bu yüzden, doğru erime noktası seçimi oldukça önemlidir.

Füzyon Gizli Isısı: Bir PCM'nin emebileceği veya serbest bırakabileceği ısı miktarı, gizli ısıyla doğrudan ilişkilidir. Daha yüksek gizli ısıya sahip bir PCM, ısıyı daha verimli bir şekilde yönetebilir ve böylece termal denetimi daha etkili hale getirir.

Isıl İletkenlik: PCM'nin ısıyı hızlı bir şekilde emip salabilmesi için yeterli ısı iletkenliğe sahip olması gerekir. Birçok PCM, ısı iletkenliğini artırmak için grafit veya metal köpükler gibi katkı maddeleriyle desteklenir. Bu katkılar, ısının hızla yayılmasını ve düzenli bir şekilde dağılmasını sağlar.

PCM'ler, sıcaklık değişimleri sırasında faz değişimi (katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya) gerçekleşen malzemelerdir. Bu malzemeler, faz değişimi sırasında ısıyı emerek veya serbest bırakarak sıcaklık dalgalanmalarını azaltır.

Faz geçişi sırasında depolanan enerji (faz değişimi ısı): Bu, PCM'nin katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya geçerken depoladığı veya saldığı ısıyı ifade eder.

Faz geçişi sıcaklığı: PCM'nin faz değiştirirken (katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya) sıcaklığının sabit kaldığı sıcaklık.

Faz Değişim Malzemesi (PCM) ile Isı Depolama ve Soğutma

Bataryalarda PCM kullanımı, batarya sıcaklıklarının belirli bir seviyede tutulmasını sağlar. Bataryanın ısınmaya başladığı noktada PCM sıvı hale geçer ve ısıyı depolar. Bu süreç, batarya sıcaklıklarının aşırı yükselmesini engeller.

Isı Depolama Kapasitesi

Faz Değişim Malzemesinin depoladığı ısı, faz değişimi ısısı (latent heat) olarak bilinir ve genellikle J/kg (Joule kilogram başına) cinsinden ifade edilir.

Formül:

$$Q=m \cdot LQ \quad (3.9)$$

Q = Depolanan ısı (Joule cinsinden)

m = PCM'nin kütlesi (kg cinsinden)

L = PCM'nin faz değişimi latent ısısı (J/kg)

Burada L, PCM'nin katıdan sıvıya geçerken veya sıvıdan katıya geçerken depolayabileceği veya serbest bırakabileceği ısıyı ifade eder.

Bir bataryada PCM'lerin ısıyı depolama ve serbest bırakma süreci, bataryanın sıcaklığının sabit kalmasına yardımcı olur. PCM, belirli bir sıcaklığa ulaşıncaya kadar ısıyı emmeye başlar ve bu sıcaklık noktasında faz değişimi başlar. Bu sayede batarya, aşırı ısınmadan korunur.

Batarya soğutma sistemlerinde PCM kullanımı için, bataryanın üretmesi beklenen ısı miktarını ve bu ısının PCM tarafından nasıl yönetileceğini bilmek gerekir. Bataryadaki ısıyı dengelemek için kullanılan PCM'nin miktarını belirlemek, sistem tasarımında önemli bir adımdır.

Bir batarya, genellikle iç direnç ve akım nedeniyle ısı üretir. Bataryanın ürettiği ısıyı hesaplamak için, iç direnç ve akımın karelerinin çarpımı kullanılır.

Formül:

$$Q_{\text{batarya}}=I^2 R \quad (3.10)$$

Q batarya = Bataryanın ürettiği ısı (Watt)

I = Batarya akımı (Amper)

R = Batarya iç direnci (Ohm)

PCM'nin Soğutma Kapasitesinin Hesaplanması

PCM'nin batarya tarafından üretilen ısıyı absorbe edebilmesi için yeterli miktarda olması gerekir. PCM'nin ısının depolama kapasitesini belirlemek için önce bataryanın ürettiği ısı miktarını ve PCM'nin latent ısısını bilmek gerekir.

Formül:

$$m_{PCM} = Q_{batarya} / L \quad (3.11)$$

m_{PCM} = PCM'nin kütlesi (kg)

$Q_{batarya}$ = Bataryanın ürettiği ısı (Joule)

L = PCM'nin latent ısısı (J/kg)

Burada, bataryanın ürettiği ısıyı emebilmesi için gereken PCM kütlesi hesaplanır. Bu kütle, bataryanın belirli bir süre boyunca ürettiği ısıyı depolamak için yeterli olmalıdır.

Isı Depolama Süresi

PCM'nin ne kadar süreyle soğutma yapabileceğini hesaplamak için, bataryanın ürettiği ısı miktarı ile PCM'nin depolama kapasitesinin ilişkisini göz önünde bulundurmak gerekir.

Formül:

$$t_{soğutma} = Q_{batarya} / (m_{PCM} \cdot L_{soğutma}) \quad (3.12)$$

$t_{soğutma}$ = PCM'nin bataryayı soğutma süresi (saniye)

$Q_{batarya}$ = Bataryanın ürettiği ısı (Joule)

M_{PCM} = PCM'nin kütlesi (kg)

L = PCM'nin latent ısısı (J/kg)

Bu formüle göre, bataryanın ürettiği ısıyı depolayabilecek kadar PCM kullanılması ve bu malzemenin faz değişim süresi, bataryanın sıcaklık artışını kontrol altında tutacak kadar uzun olmalıdır.

PCM'nin Faz Geçişi ve Termal Performans

PCM'ler, sıcaklık yönetimi sırasında sadece ısıyı depolamakla kalmaz, aynı zamanda faz geçişi sırasında büyük miktarda ısıyı (latent heat) emerek bataryanın sıcaklık değişimini engellerler. Chen vd., (2016) çalışmalarında farklı soğutma sistemlerinin etkinliğini araştırmışlardır. PCM'nin sıcaklık geçişi noktası, bataryanın çalışma sıcaklığına yakın olmalıdır, böylece faz değişimi başlar ve bataryanın sıcaklığı yükselmeden önce ısıyı emer.

Faz Değişim Malzemeleri (PCM'ler), batarya sistemlerinde sıcaklık kontrolünü sağlamak için oldukça etkili bir yöntemdir. Batarya tarafından üretilen ısıyı emmek ve serbest bırakmak için gereken PCM miktarı, bataryanın akımı, iç direnci ve PCM'nin özellikleri ile hesaplanabilir. Bu hesaplamalar, batarya soğutma sistemlerinin tasarımında kritik bir rol oynar, çünkü doğru miktarda PCM kullanılması, bataryanın aşırı ısınmasını engeller ve verimliliğini artırır. Li., vd. (2018) çalışmalarında PCM ile termal yönetim optimizasyonu ispatlamışlardır.

3.5 Pil Soğutma Gereksinimleri ve PCM Tasarımı

Bir pilin soğutma sistemine PCM (Faz Değişim Malzemeleri) entegre etmek, dikkat edilmesi gereken birkaç önemli faktörü içerir:

PCM Kapsülleme: PCM'ler, genellikle sızıntıyı önlemek ve dayanıklılığını artırmak amacıyla plastik veya metal gibi malzemelerle kapsülendir. Bu kapsüller, malzemenin etkinliğini artırarak daha verimli bir soğutma sağlar.

Geometri ve Düzen: PCM'lerin pil sistemindeki yerleşimi, soğutma verimliliğini doğrudan etkiler. PCM, pil hücrelerinin etrafına yerleştirilebileceği gibi, pil paketleri arasına da entegre edilebilir. Ayrıca, PCM'nin şekli ve düzeni de termal yönetimin etkinliği üzerinde belirleyici bir rol oynar.

Isı Yönetim Sistemi Tasarımı: Soğutma sisteminin genel düzeni de büyük önem taşır. Soğutma kanalları, ısı emiciler ve hava akış yolları gibi unsurların doğru şekilde tasarlanması, pilin verimli bir şekilde soğutulmasına yardımcı olur.

Pil Isı Üretimi: Pilin çalışma sırasında ısı üretimi, şarj ve deşarj döngülerinde elektrokimyasal reaksiyonlar sonucu oluşur. Bu ısı, pilin iç yapısı ve kimyası gibi faktörlere bağlı olarak değişiklik gösterir, bu yüzden ısının etkili bir şekilde yönetilmesi gereklidir.

Isıl İletkenlik ve Isı Transferi: Pilde ısı transferi, iletim, taşınım ve radyasyon gibi üç temel mekanizma ile gerçekleşir. Katı ve sıvı fazlardaki ısı transferi, soğutma verimliliğini artırmak için dikkate alınması gereken önemli unsurlardır.

Faz Değişim Malzemeleri (PCM'ler): PCM'ler, katıdan sıvıya veya sıvıdan katıya geçerken ısıyı emip serbest bırakabilen malzemelerdir. Bu özellikleri, pilin

sıcaklığını sabit tutmaya yardımcı olur ve aşırı ısınmayı engeller. Bu nedenle, PCM'ler, pilin sıcaklığını dengede tutmak için ideal bir soğutma çözümü sunar.

Pil Teknolojisi ve Termal Yönetim İhtiyacı: Pil teknolojisi, elektrikli araçlar (EV), taşınabilir elektronik cihazlar ve enerji depolama sistemleri gibi modern yaşamın önemli parçaları haline gelmiştir. Yüksek performanslı pillere olan talep arttıkça, etkili termal yönetim sistemlerine olan gereksinim de artmaktadır. Aşırı ısı, pil performansını düşürebilir, ömrünü kısaltabilir ve güvenlik risklerine yol açabilir. Bu yüzden, pil sıcaklıklarını etkin bir şekilde yönetebilecek soğutma sistemlerinin geliştirilmesi oldukça önemlidir.

PCM'lerin Avantajları: PCM'ler, faz geçişi sırasında ısıyı emip serbest bırakarak, pilin sıcaklıklarını dengeleyecek şekilde çalışır. Bu pasif soğutma yöntemi, pilin verimli bir şekilde çalışmasını sağlar, ömrünü uzatır ve performansını artırır. Bu çalışma, PCM'lerin pil termal yönetiminde nasıl kullanılabileceğine ve özellikle lityum iyon pillerdeki uygulamalarına odaklanmaktadır.

4. METODOLOJİ

Bu çalışmanın metodolojisi, lityum-iyon piller için faz değişim malzemeleri (PCM) tabanlı termal yönetim sistemlerinin tasarımını, simülasyonunu ve performans değerlendirmesini kapsamaktadır. İlk adımda, uygun PCM malzemelerinin seçilmesi için belirli kriterler belirlenmiştir. Bu kriterler, malzemelerin erime noktası, gizli ısı kapasitesi ve termal iletkenlik gibi faktörlere dayanmaktadır. Seçilen PCM'lerin pil sistemine entegrasyonu, bu tasarım parametrelerinin dikkate alınarak yapılmıştır.

Sonraki aşamada, PCM tabanlı soğutma sisteminin etkinliğini değerlendirebilmek için simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Bu simülasyonlar, genellikle ANSYS gibi yazılımlar kullanılarak yapılmış ve PCM'nin pil hücreleriyle olan etkileşiminden doğan ısıyı emme ve serbest bırakma süreçleri gözlemlenmiştir. Böylece, sistemin sıcaklık dağılımı ve zamanla değişen sıcaklık profilleri gibi parametreler analiz edilmiştir.

Ayrıca, deneysel çalışmalar da simülasyonlarla paralel olarak yürütülmüştür. Deneysel veriler ile simülasyon sonuçları karşılaştırılarak modelin doğruluğu ve güvenilirliği test edilmiştir. Son olarak, pilin şarj ve deşarj döngüleri sırasında termal yönetim sisteminin performansı değerlendirilmiş ve aşırı ısınmayı önleme, sıcaklık dalgalanmalarını dengeleme ve pil ömrünü uzatma gibi kriterler üzerinden analizler yapılmıştır. Bu metodoloji, tasarımın her aşamasında kapsamlı bir yaklaşım benimseyerek, PCM tabanlı termal yönetim sistemlerinin etkinliğini detaylı bir şekilde incelemektedir.

4.1 PCM Seçim Kriterleri

PCM'nin uygunluğu, çeşitli parametreler doğrultusunda değerlendirilmiştir:

4.1.1 Termal Özellikler

PCM'nin termal özellikleri, lityum-iyon pil sisteminin verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için belirli aralıklarla sınırlandırılmıştır.

Erime Noktası: Lityum-iyon pillerin optimum çalışma sıcaklığı aralığı genellikle 25°C ile 60°C arasındadır. PCM'nin erime noktası, bu sıcaklık aralığına uygun olarak seçilmelidir. PCM'nin erime noktası T_f , genellikle şu formülle belirlenir:

$$T_f = mQ_{lat} \quad (4.1)$$

Burada Q_{lat} gizli ısı kapasitesini, m ise PCM'nin kütlesini ifade eder.

Gizli Isı Kapasitesi: Gizli ısı kapasitesi, PCM'nin faz değişimi sırasında depoladığı enerjiyi ifade eder. Bu değer yüksek olmalıdır, çünkü pilin ısısını etkin şekilde dengelemek için daha fazla enerji depolama kapasitesine sahip olması gerekir.

4.1.2 Faz Değişimi Davranışı

PCM'nin faz geçişi sırasında sıcaklık sabit tutulmaya çalışılmalıdır. PCM'nin termal kararlılığı şu kriterlere göre belirlenir:

Sürekli faz değişimi: PCM'nin faz geçişi sırasında sıcaklık sabit kalmalıdır. Bu özellik, faz değişim sıcaklık aralığındaki daralma ile sağlanabilir. Liu., vd. (2020) çalışmalarında PCM ile batarya termal yönetim sistemlerini araştırmışlardır.

4.1.3 Termal İletkenlik

PCM'nin termal iletkenliği, ısıyı etkin bir şekilde taşıyabilmesi için önemlidir. Termal iletkenlik, aşağıdaki formülle hesaplanabilir:

$$Q = k \cdot A \cdot \Delta T / L \quad (4.2)$$

Burada:

Q: Isı akışı (W)

k: Malzemenin termal iletkenliği (W/m·K)

A: Isı iletim yüzeyi alanı (m²)

ΔT : Sıcaklık farkı (°C)

L: Isı iletim mesafesi (m)

Düşük termal iletkenlikli PCM'ler için, ısı iletim hızını artırmak amacıyla grafit, bakır veya alüminyum gibi iletken katkıları kullanılabilir.

4.1.4 Maliyet ve Çevresel Etki

PCM'nin maliyet verimliliği ve çevresel etkisi de göz önünde bulundurulmalıdır. Bu bağlamda, tercih edilen PCM malzemeleri arasında parafin mumları gibi düşük maliyetli, toksik olmayan ve çevre dostu malzemeler bulunmalıdır.

4.2 Deneysel Kurulum

Deneysel çalışmalar, PCM'nin etkili bir şekilde termal yönetim sağlama kapasitesini test etmek için gerçekleştirilmiştir.

4.2.1 Pil ve PCM Entegrasyonu

Deneysel düzende lityum-iyon pil modülleri ile PCM arasındaki etkileşim gözlemlenmiştir. PCM, iki farklı yöntemle entegrasyon sağlanmıştır:

Kapsüllüme: PCM, kapsül içinde yer alarak fiziksel deformasyona uğramadan çalışmaktadır.

Hücreler Arası Yerleştirme: PCM, pil hücrelerinin arasına dağıtılarak eşit ısı dağılımı sağlanmıştır.

4.2.2 Sıcaklık Ölçüm Sistemi

Sıcaklık değişimlerinin izlenmesi amacıyla termokupl sensörleri kullanılmıştır. Bu sensörler, PCM'nin pil hücreleriyle etkileşimini ve soğutma etkisini değerlendirebilmek için şarj ve deşarj döngülerindeki sıcaklık değişimlerini ölçmüştür.

4.3 Hesaplamalı Modelleme ve Simülasyonlar

Hesaplamalı modelleme, PCM'nin termal performansını simüle edebilmek için kullanılmıştır.

4.3.1 Sonlu Eleman Analizi (FEA)

FEA, pil-PCM sistemindeki ısı transferini analiz etmek için kullanılmıştır. Bu yöntemde aşağıdaki parametreler dikkate alınmıştır:

PCM'nin termal iletkenlik ve gizli ısı değerleri.

Pil yapısının ısı yayılım davranışı.

FEA modelinde, PCM'nin ısıyı emme kapasitesi ve çevresine yayma etkinliği hesaplanmıştır.

4.3.2 Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (CFD)

CFD simülasyonları, sıvı soğutma veya hava akışının bulunduğu sistemlerde ısı transferini daha ayrıntılı incelemek için kullanılmıştır. Bu simülasyonlar, PCM'nin soğutma etkisini ve ısı akışını modellemeye olanak tanımaktadır.

4.4 Veri Analizi ve Performans Değerlendirmesi

Deneysel ve hesaplamalı analizlerden elde edilen veriler aşağıdaki kriterlere göre değerlendirilmiştir.

4.4.1 Sıcaklık Kararlılığı

PCM'nin, pilin sıcaklığını çalışma aralığında tutma kapasitesi, sıcaklık profilleri analiz edilerek değerlendirilmiştir.

4.4.2 Soğutma Verimliliği

PCM'nin ısı emme ve yayma etkinliği, enerji verimliliği açısından değerlendirilmiştir. Bu, geleneksel soğutma sistemleriyle karşılaştırılarak analiz edilmiştir. Lin., vd., (2021) çalışmalarında soğutma sistemlerinin verimliliklerini kıyaslamışlardır.

4.4.3 Pil Performansı

PCM'nin pilin kapasitesi, enerji verimliliği ve döngü ömrü üzerindeki etkileri kantitatif olarak incelenmiştir. Li., (2018) çalışmalarında PCM ile soğutulan bataryaların verimliliklerini incelemişlerdir.

4.4.4 Karşılaştırma Analizleri

Geleneksel hava ve sıvı soğutma yöntemleriyle karşılaştırmalar yapılmış ve PCM tabanlı sistemlerin avantajları analiz edilmiştir.

5. BATARYA MODÜL TASARIMI

5.1 Hücre Seçimi ve Hesaplamalar

Batarya modülünün tasarımına başlamadan önce, kullanılacak hücrelerin özelliklerini dikkatlice incelemek önemlidir. Bu çalışmada, 21700 tipindeki lityum-iyon hücreler tercih edilmiştir. Çünkü bu hücreler, yüksek enerji yoğunluğu, uzun ömürleri ve güvenli çalışma kapasiteleri ile öne çıkar. Genellikle 21700 hücrelerinin kapasitesi 4000 mAh ile 5000 mAh arasında değişmektedir ve nominal voltajı ise 3.7V civarındadır.

Batarya modülünün tasarımında, hedeflenen voltaj ve kapasiteye ulaşabilmek için hücre sayısını doğru bir şekilde belirlemek önemlidir. Hücreler seri ve paralel bağlanarak modülün voltajı ve kapasitesi ayarlanır. Örneğin, 48V'luk bir batarya modülü tasarlamak istiyorsak, her bir hücrenin nominal voltajı 3.7V olduğundan, voltajı artırmak için hücreleri seri bağlamak gerekir. Bu durumda, 48V'a ulaşabilmek için yaklaşık 13 hücre seri bağlanmalıdır. Daha yüksek kapasite isteniyorsa, hücre sayısı paralel bağlantılarla artırılabilir.

Bu tasarımda, 21700-5A-3.6V hücreleri seçilmiş ve 24S 1P konfigürasyonu kullanılmıştır. Bu konfigürasyon, 24 hücrenin seri bağlanarak gerekli voltajı sağlar, ancak daha fazla kapasite elde etmek için paralel bağlantılar kullanılmaz. Bu sayede, batarya modülünün tasarımı hem verimli hem de güvenli bir şekilde yapılabilir. Rao , Wang , ve Huang çalışmalarında micro tüp yapılarda PCM uygulaması ile batarya termal yönetimi üstüne etkinliği ispatlamışlardır (Rao vd., 2016).

5.2 Hücre Dizilimi

Hücrelerin dizilimi, bataryanın voltajını ve kapasitesini belirlemenin yanı sıra, güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için de oldukça önemlidir. Batarya modülünü tasarlarken hücrelerin doğru bir şekilde seri ve paralel bağlanması, hem istenen enerji çıkışını elde etmemize yardımcı olur hem de bataryanın güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar.

Seri bağlantı, hücrelerin voltajını artırmak için kullanılır. Bu bağlantıda, her bir hücrenin pozitif ve negatif uçları birbirine bağlanır. Bu sayede, voltaj her eklenen hücre ile artar. Örneğin, her biri 3.6V olan 10 hücreyi seri bağladığınızda, toplamda 36V'luk bir voltaj elde edersiniz. Zhao., vd., (2015) çalışmalarında termal yönetim ile batarya ömrünü uzatma üstüne katkı sunmuşlardır.

Paralel bağlantı ise kapasiteyi artırmak için tercih edilir. Burada her bir paralel grup, toplam kapasiteye katkı sağlar. Örneğin, her biri 5000 mAh kapasitesine sahip olan 5 hücreyi paralel bağlarsanız, toplam kapasite 25,000 mAh (veya 25 Ah) olur. Bu da bataryanın daha uzun süre enerji verebilmesini sağlar.

Bu tasarımda, hücrelerin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için BMS (Battery Management System) kullanılacaktır. BMS, her bir hücrenin voltajını izler ve gerekirse dengeleme yaparak bataryanın düzgün çalışmasını sağlar. Ayrıca, bataryanın aşırı şarj olmasını ya da aşırı deşarj olmasını engelleyerek güvenliğini artırır.

Sonuç olarak, hücrelerin doğru şekilde dizilmesi ve bağlanması, bataryanın hem verimli çalışmasını hem de uzun ömürlü olmasını sağlar. Bu, yüksek performanslı ve güvenli bir batarya modülünün temelini oluşturur.

5.3 İzolasyon ve İletken Malzeme Seçimi

Batarya hücreleri arasında güvenli bir elektriksel bağlantı ve ısı yönetiminin sağlanabilmesi için doğru izolasyon malzemeleri kullanmak çok önemlidir. Hücreler arasındaki kısa devre riskini azaltmak amacıyla, polyester filmleri veya selüloz bazlı kaplamalar gibi izolasyon malzemeleri tercih edilebilir. Bu tür malzemeler, hücrelerin güvenli bir şekilde çalışmasını sağlayacak şekilde elektriksel izolasyon sunar.

İletken malzemeler ise batarya hücreleri arasındaki bağlantıların verimli bir şekilde yapılabilmesi için kritik rol oynar. Yüksek iletkenliğe sahip metaller, özellikle bakır ve alüminyum, bu bağlantılar için yaygın olarak kullanılır. Bu malzemeler, elektrik akımını etkili bir şekilde ileterek bataryanın enerji verimliliğini artırır. Ayrıca, bağlantılar için sıklıkla bakır busbar'lar tercih edilir. Busbar'lar, hücreler arasında güvenli ve verimli bir iletim sağlamak için kaynak yöntemiyle yapılır.

Son olarak hem iletken malzemeler hem de izolasyon malzemeleri, bataryadaki ısı kayıplarını minimize eder ve ısı yönetimini iyileştirir. Bu sayede batarya daha verimli çalışır, aşırı ısınma engellenir ve bataryanın ömrü uzar.

5.4 Üç Boyutlu Modül Tasarımı

Batarya modülünün fiziksel tasarımı, enerji verimliliği ve güvenli kullanım açısından son derece önemlidir. Bu süreç, genellikle bilgisayar destekli tasarım (CAD) yazılımları kullanılarak yapılır. CAD yazılımları sayesinde batarya modülünün hücre yerleşimi, soğutma sistemleri ve mekanik yapısı detaylı bir şekilde planlanabilir.

Hücreler, ısının düzgün bir şekilde dağılmasını sağlamak için modülde dikkatlice yerleştirilir. Hücrelerin her biri, ısının eşit bir şekilde yayılmasını sağlayacak şekilde yerleştirilir, böylece bataryanın verimli çalışması sağlanır.

Batarya modülüne entegre edilen soğutma sistemi de oldukça büyük bir öneme sahiptir. Bu aşamada, soğutma plakaları veya hava kanalları gibi sistem bileşenleri, hücrelerin sıcaklık dengesini korumak amacıyla tasarıma dahil edilir. Böylece bataryanın sıcaklık aralığı kontrol altında tutulur ve batarya yüksek performansla çalışabilir.

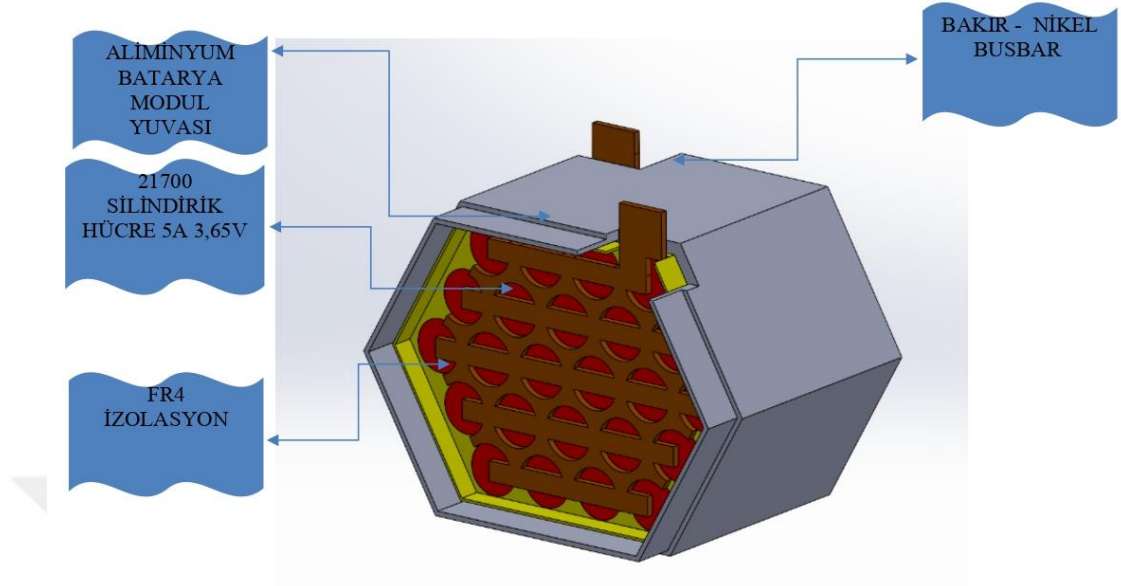
Termal Yönetim:

Isı dağılım plakaları veya termo-pads (termo iletken pedler) kullanılarak, hücrelerden gelen ısı etkin bir şekilde dışarıya atılır. Ayrıca, soğutma malzemelerinin yerleşimi de özenle optimize edilir, böylece bataryanın aşırı ısınması engellenmiş olur.

Bu tasarım aşamasında, modüler yapı ve BMS entegrasyonu da dikkate alınır. Modüler yapı, bataryanın montajını kolaylaştırır ve gerektiğinde bakımını hızlandırır. BMS (Battery Management System) ise her hücrenin voltaj ve sıcaklık değerlerini izler, böylece bataryanın güvenli bir şekilde çalışmasını sağlar.

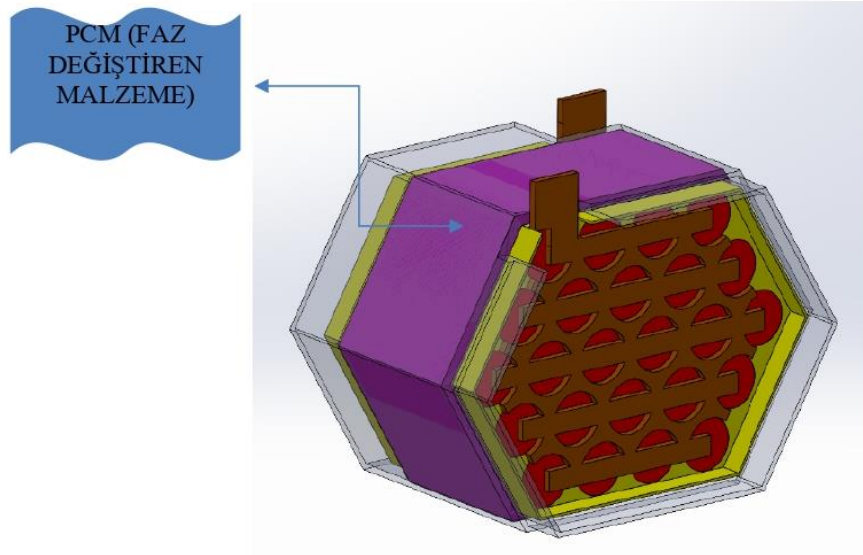
Bu projede ayrıca, pasif soğutma sistemi olarak PCM (Phase Change Material) kullanımı tercih edilmiştir. PCM, bataryanın sıcaklık dengesini sağlamak için etkin bir çözüm sunar ve modül tasarımı bu sisteme göre yapılmıştır. Böylece

batarya daha verimli ve güvenli bir şekilde çalışacak şekilde optimize edilmiştir. Liu., vd. (2022) çalışmalarında fin yapıları ile PCM etkinliğini kanıtlamışlardır.



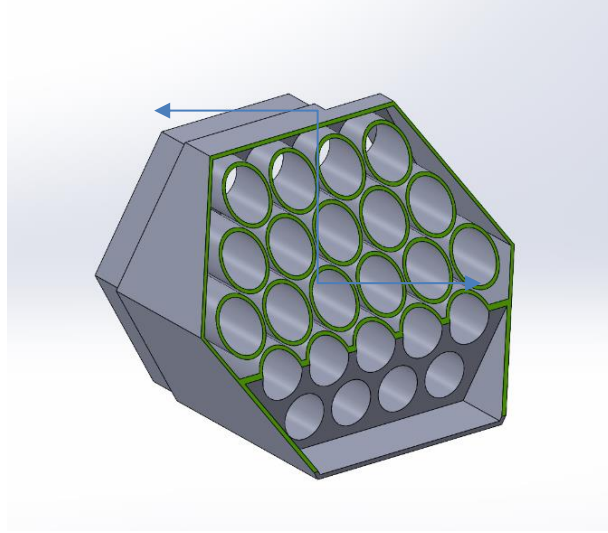
Şekil 5.1: Batarya Modül Tasarımı

Bu modül yapısı içindeki boşluklara PCM doldurulmaktadır.



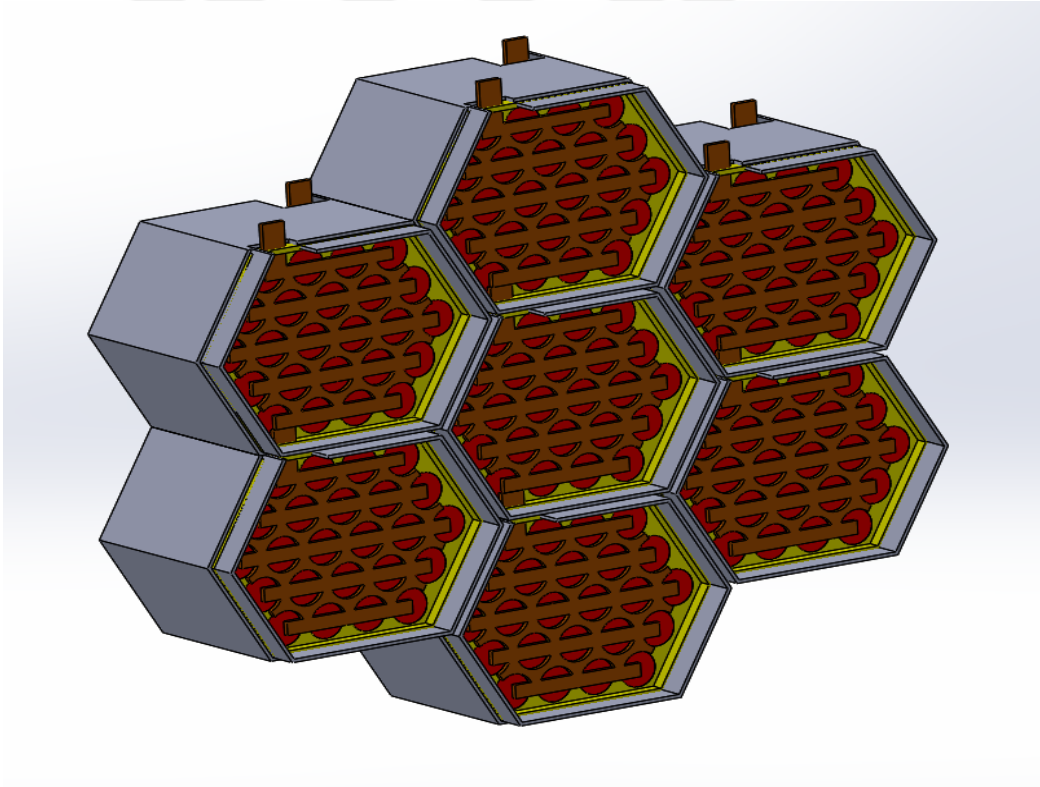
Şekil 5.2: Batarya Modülü PCM yerleşimi

Modül yapısı içindeki pcm boşlukları bırakılmıştır. 3D Metal printer ile elde edilecektir. Weng., vd. (2019) Wang çalışmalarında PCM ile batarya termal yönetimi etkinliğini ispatlamışlardır.



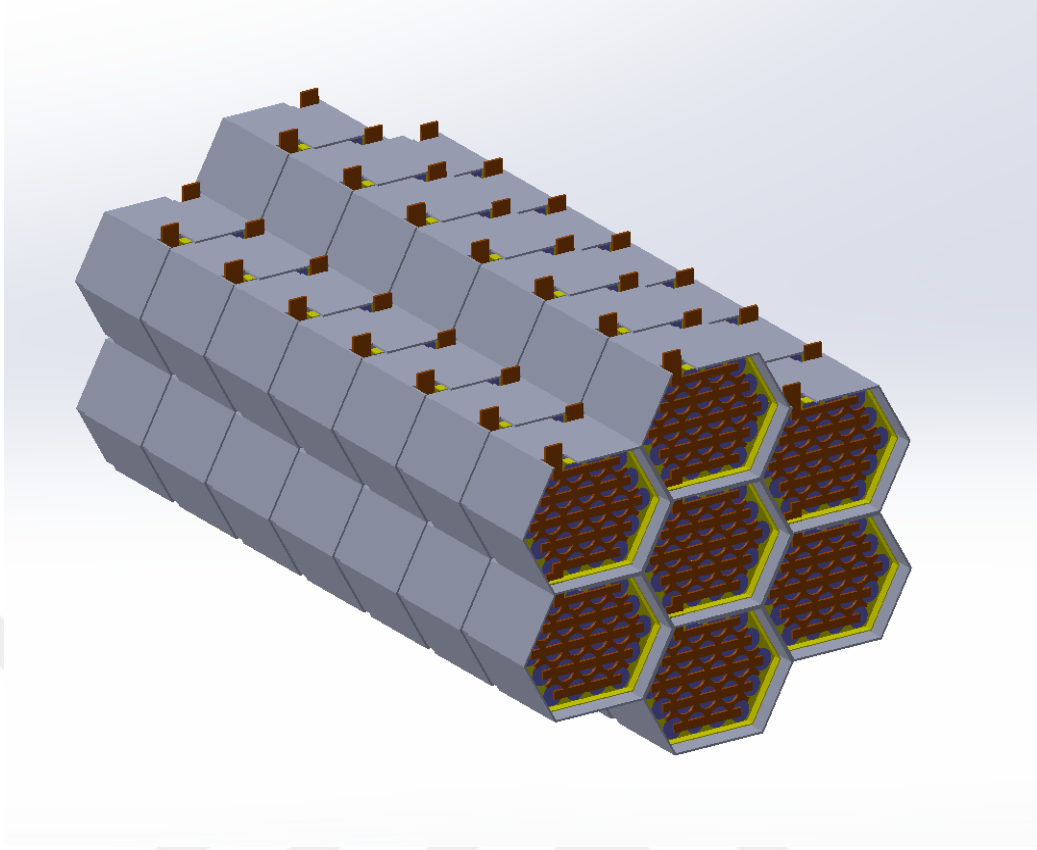
Şekil 5.3: Batarya Modülü PCM iç boşluk yapısı

Bu batarya modül yapısı daha yüksek akım ve voltage isterlerine göre düzenlenip birleştirme imkanına olanak sağlar.



Şekil 5.4: Batarya Modül Birleşimi

Büyük kapasitelerdeki güç ihtiyaçları için modüler bir yapı tasarlanmıştır.



Şekil 5.5: Batarya Oluşturma Modül Birleşimi

5.5 Prototip Üretimi ve Testler

Tasarım tamamlandığında, batarya modülünün ilk prototipi üretilir. Üretim aşamasında, tüm bağlantı elemanları, izolasyon malzemeleri ve soğutma sistemleri dikkatlice yerleştirilir. Her şeyin doğru şekilde monte edilmesi sağlanır. Prototip üretildikten sonra, bataryanın performansını, güvenliğini ve verimliliğini ölçmek için çeşitli testlere tabi tutulur.

Bu testler arasında ısı testleri, şarj ve deşarj döngüleri testleri ve güvenlik testleri yer alır. Güvenlik testlerinde, aşırı şarj, aşırı deşarj ve kısa devre gibi durumlar simüle edilerek bataryanın bu tür tehlikelere karşı ne kadar güvenli olduğu kontrol edilir. Ayrıca, bataryanın sıcaklık yönetimi de önemli bir test alanıdır. Termal analizler yapılarak, bataryanın içindeki ısının nasıl dağıldığı ve ısının verimli bir şekilde kontrol edilip edilmediği gözlemlenir. Eğer bu testlerde ısıyla ilgili sorunlar ya da tasarımla ilgili eksiklikler tespit edilirse, gerekli iyileştirmeler yapılır. Yan., vd. (2016) çalışmalarında deneysel olarak PCM ile termal yönetim etkinliğini göstermişlerdir.

Tüm bu aşamalar, bataryanın hem verimli hem de güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamak için önemlidir ve ürünün son kullanıcıya sunulmadan önce her türlü olumsuz durumdan arındırılmasını garanti eder.



6. TERMAL ANALİZ

6.1 Giriş ve Termal Yönetimin Önemi

Batarya modüllerinin güvenli ve verimli bir şekilde çalışabilmesi için termal yönetim büyük bir öneme sahiptir. Lityum-iyon bataryalar, şarj ve deşarj işlemleri sırasında ısı üretir ve bu ısı, hücrelerin sıcaklıklarının artmasına yol açabilir. Aşırı ısınma, bataryanın performansını düşürebilir, ömrünü kısaltabilir ve hatta güvenlik sorunlarına neden olabilir. Bu yüzden, batarya modüllerindeki ısının doğru bir şekilde yönetilmesi oldukça önemlidir. Safdari., vd. (2020) çalışmalarında farklı yapılarda PCM termal yönetim etkinliğini göstermişlerdir.

Bu tezde, 21700 lityum-iyon hücreleri kullanılarak tasarlanan batarya modülünün termal analizini yaparken, ısının düzgün bir şekilde dağılmasını sağlamak ve hücrelerin aşırı ısınmasını engellemek için farklı soğutma sistemleri ve termal yönetim çözümleri üzerinde durulmuştur. Isı dağılımını optimize etmek için soğutma plakaları, hava kanalları ve termo-pads gibi çözümler incelenmiştir.

Bu tür termal yönetim çözümleri, bataryaların daha verimli çalışmasını sağlarken aşırı ısınmayı engeller ve bataryaların ömrünü uzatarak güvenli bir kullanım sunar. Rajan., vd. (2022) çalışmalarında EV’de PCM ile soğutma sistemleri etkinliğini ispatlamışlardır.

6.2. Termal Yönetim Stratejileri

Termal yönetim, bataryaların verimli bir şekilde çalışabilmesi için sadece ısının uzaklaştırılmasından ibaret değildir; aynı zamanda ısının düzgün bir şekilde dağıtılmasını da sağlamalıdır. Batarya modülünde kullanılan başlıca termal yönetim stratejileri şunlardır:

Isı dağılımı ve izolasyonu:

Hücreler arasındaki ısının düzgün bir şekilde yayılması, her hücrenin sıcaklığını belirli bir aralıkta tutarak bataryanın verimli çalışmasını sağlar. Bu, ısının

daha düşük sıcaklıklarda tutulmasına yardımcı olmak için termo-iletken pedler ve ısı dağılım plakaları gibi malzemelerle yapılır. Bu sayede ısının hızlı bir şekilde dağılması sağlanır ve bataryanın genel sıcaklık dengesi korunur.

Soğutma Sistemleri:

Bataryada biriken ısının dağıtılabilmesi için çeşitli soğutma çözümleri kullanılır. Soğutma plakaları, hava kanalları ya da sıvı soğutma sistemleri gibi yöntemler, bataryanın çalışma sıcaklığını güvenli seviyelerde tutmaya yardımcı olur. Bu sistemler, bataryanın performansını artırır ve aşırı ısınmayı engeller.

Faz Değişim Malzemeleri (PCM):

PCM'ler, belirli bir sıcaklık seviyesinde eriyip katılaşıp ısıyı depolar. Bu özellikleri sayesinde aşırı ısınmayı engeller ve sıcaklığın daha stabil bir seviyede tutulmasına yardımcı olur. PCM'ler, özellikle bataryanın yoğun kullanımda olduğu durumlarda çok faydalıdır ve bataryanın sıcaklık dengesini sağlayarak verimliliğini artırır.

Bu stratejiler, bataryaların güvenli bir şekilde çalışabilmesi ve verimli bir şekilde enerji depolayabilmesi için kritik öneme sahiptir. Her biri, bataryaların aşırı ısınmasını engelleyerek daha uzun süreli ve güvenli bir kullanım sağlar. Mousavi., (2021) çalışmalarında PCM ile hibrit soğutma sistemlerin soğutma plakaları ile uygulamalarını araştırmışlardır.

6.3 Termal Analiz Yöntemleri

Batarya modülünde termal yönetim çözümlerinin etkinliğini değerlendirmek için farklı analiz yöntemleri kullanılır. Bu analizler hem teorik hem de deneysel olarak yapılır ve her iki yöntem de bataryanın çalışma koşullarında sıcaklık dağılımını gözlemlemek açısından oldukça önemlidir.

Teorik analizler genellikle bilgisayar destekli simülasyonlar ve matematiksel modellemelerle yapılır. Bu yöntemler, bataryanın içindeki ısı akışını, sıcaklık farklarını ve ısı dağılımını tahmin etmeye yardımcı olur. Böylece farklı soğutma çözümleri ve termal yönetim stratejilerinin performansı önceden değerlendirilebilir.

Deneysel analizler ise gerçek batarya modüllerinin test edilmesiyle gerçekleştirilir. Bu testlerde, bataryanın farklı çalışma koşullarında ısının nasıl

dağıldığı gözlemlenir. Termal kameralar ve sıcaklık sensörleri gibi araçlar kullanılarak sıcaklık profilleri çıkarılır. Bu yöntem, teorik analizlerin doğruluğunu test etmek ve olası ısı problemlerini daha doğru bir şekilde tespit etmek için önemlidir.

Hem teorik hem de deneysel analizler, batarya modülünün termal yönetimini optimize etmek ve bataryanın güvenli ve verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak için gereklidir.

6.4 Simülasyon Yöntemleri

Termal analizlerde kullanılan simülasyonlar, batarya modülündeki sıcaklık değişimlerini modelleyerek ısı davranışı daha iyi anlamamıza yardımcı olur. Özellikle CFD (Hesaplamalı Akışkan Dinamiği) yazılımları, batarya modülündeki hava akışı ve sıvı soğutma sistemlerinin etkinliğini simüle etmek için kullanılır. Bu yazılımlar, ısının nasıl dağıldığını ve soğutma sistemlerinin ne kadar verimli olduğunu analiz etmek açısından oldukça faydalıdır.

Örneğin, ANSYS Fluent gibi yazılımlar, bataryadaki sıcaklık ile akışkan dinamiği arasındaki etkileşimi modelleyerek, soğutma sisteminin başarısını test etmemizi sağlar. Bu yazılım, bataryadaki ısı ve akışkan hareketlerini gerçekçi bir şekilde simüle eder ve soğutma sistemlerinin ne kadar etkili olduğunu görmek için kullanılır. Zhu., vd. (2016) çalışmalarında li-on bataryaların termal analizini yapmışlardır.

COMSOL Multiphysics ise daha geniş bir termal analiz yelpazesi sunarak, ısı transferini, sıcaklık dengelemesini ve PCM'lerin (Faz Değişim Malzemeleri) faz değişim süreçlerini simüle eder. Bu yazılım sayesinde, bataryadaki ısı yönetimini daha iyi anlayabilir ve PCM'lerin aşırı ısınmayı nasıl engelleyebileceğini gözlemleyebiliriz.

Bu tür simülasyonlar, batarya modülündeki aşırı ısınma riski taşıyan bölgeleri belirlememizi sağlar ve tasarımdaki olası iyileştirmeler için önemli veriler sunar. Bu sayede bataryanın güvenli ve verimli çalışması sağlanabilir. Zhang., vd. (2019) çalışmalarında PCM ile soğutma plakasını hibrit kullanarak verimliliğini ortaya koymuşlardır.

6.5 Tasarılan Batarya Modülünün Ansys Fluent ile analizi

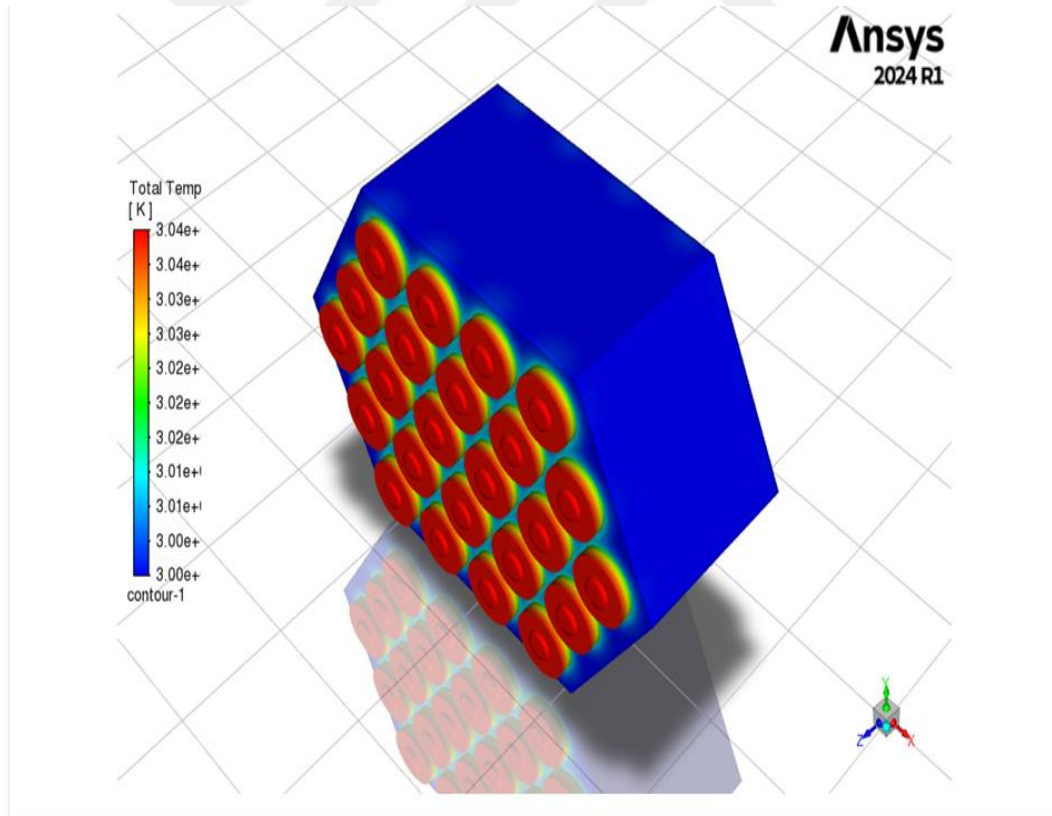
Bu tez kapsamında analizler ANSYS Fluent ile yapılmıştır. Huang., vd. (2020) çalışmalarında li-on bataryaların termal yönetiminin numerik analizini yapmışlardır.

1. Analiz PCM malzeme ve 24 adet 21700 hücre ile yapılmıştır.

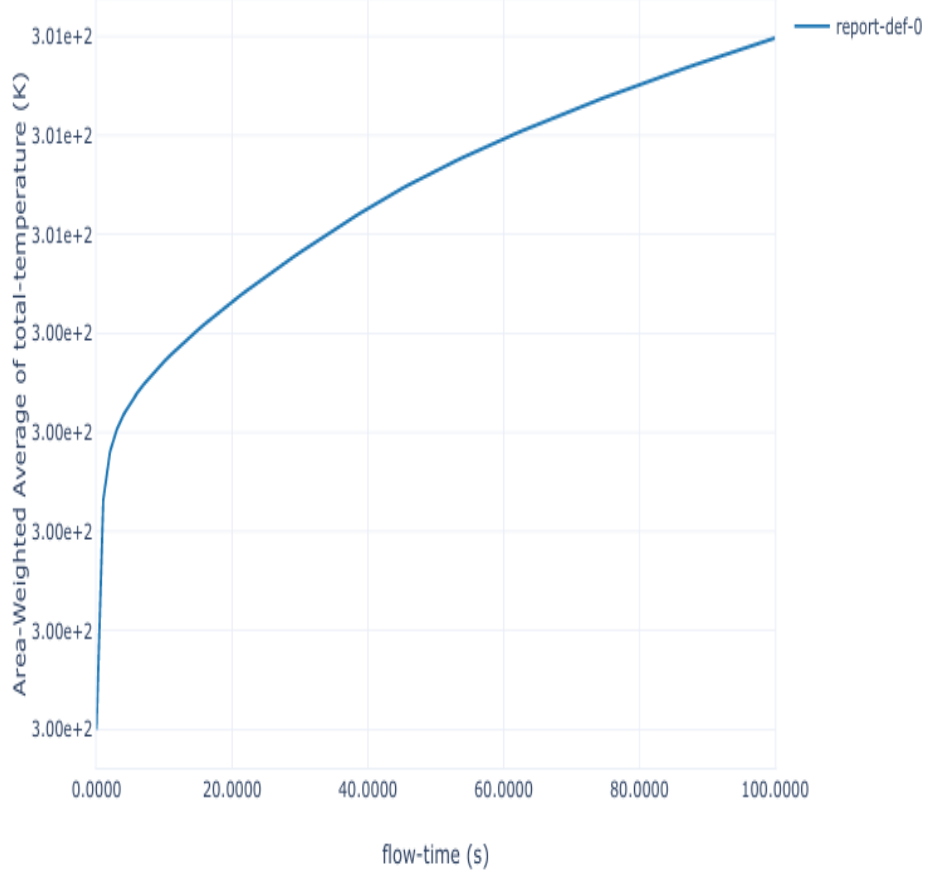
PCM Material Properties:

Fluid n-octadecen Density 724 kg/m^3 Cp (Specific Heat) 2180 J/(kg K)
Thermal Conductivity 0.15 W/(m K) Viscosity 0.035 kg/(m s) Molecular Weight
 28.966 kg/kmol Pure Solvent Melting Heat 244000 J/kg Solidus Temperature 301 K
Liquidus Temperature 304 K Solid nocta-solid Densty 814 kg/m^3 Cp (Specific
Heat) 2150 J/(kg K) Thermal Conductivity 0.35 W/(m K)

Lithumion-cell Density 2604.92 kg/m^3 Cp (Specific Heat) 894 J/(kg K)
Thermal Conductivity 1.035 W/(m K)



Şekil 6.1: 21700 Hücre ve PCM Analizi Sıcaklık Dağılımı Sonuçları



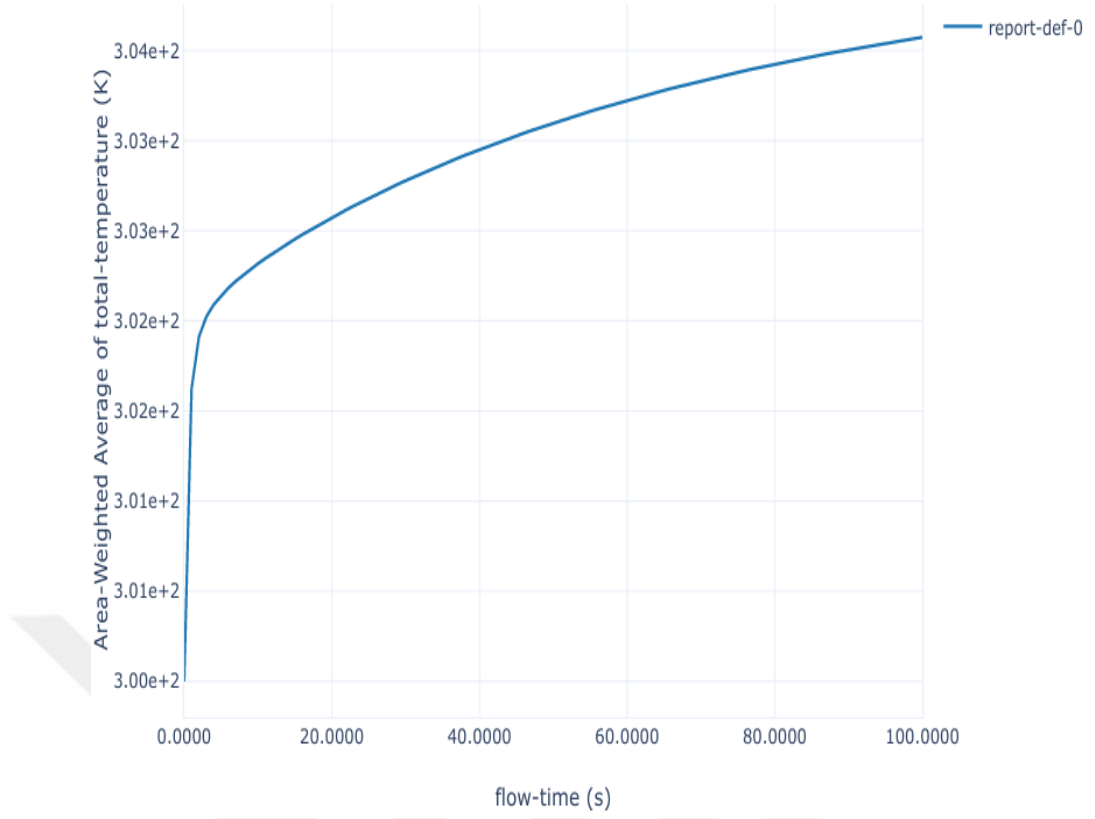
Şekil 6.2: 21700 Hücre ve PCM Analizi Sıcaklık Grafiği

PCM in erime sıcaklığına geldiğinde Orta'mdan ısı alıp dış alüminyum yuvaya iletmesi ile, hücre yüzey sıcaklığının 301 K de kalarak yatay seyretmeye başladığını, görebilmekteyiz. PCM kullanmadan yapılan 2. Analizde sıcaklığın 304 K 'e çıktığı görülmektedir.

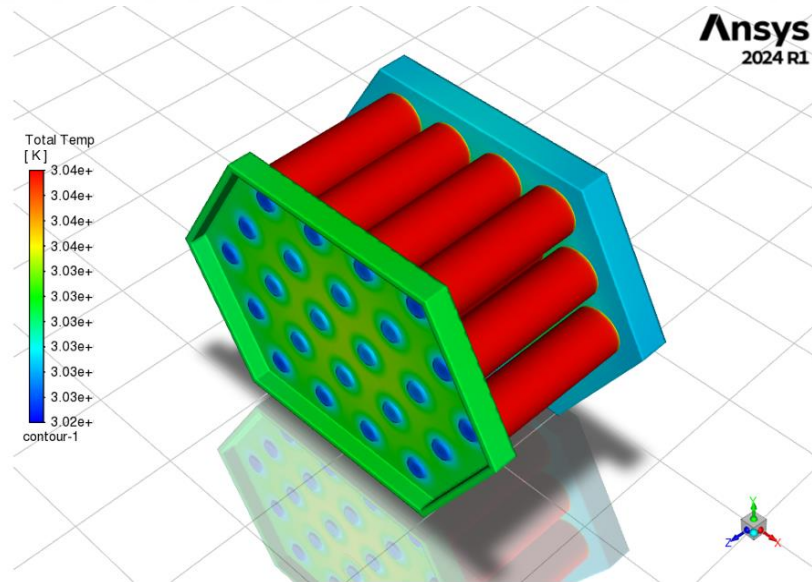
2.Analiz PCM malzeme olmadan 24 adet 21700 hücre ile yapılmıştır.

Air Density 1.225 kg/m³ Cp (Specific Heat) 1006.43 J/(kg K) Thermal Conductivity 0.0242 W/(m K) Viscosity 1.7894e-05 kg/(m s) Molecular Weight 28.966 kg/kmol Aluminum Density 2719 kg/m³ Cp (Specific Heat) 871 J/(kg K) Thermal Conductivity 202.4 W/(m K)

Lioncell Density 2694.2 kg/m³ Cp (Specific Heat) 894 J/(kg K) Thermal Conductivity 1.035 W/(m K)



Şekil 6.3: 21700 Hücre Analizi Sıcaklık Grafiği



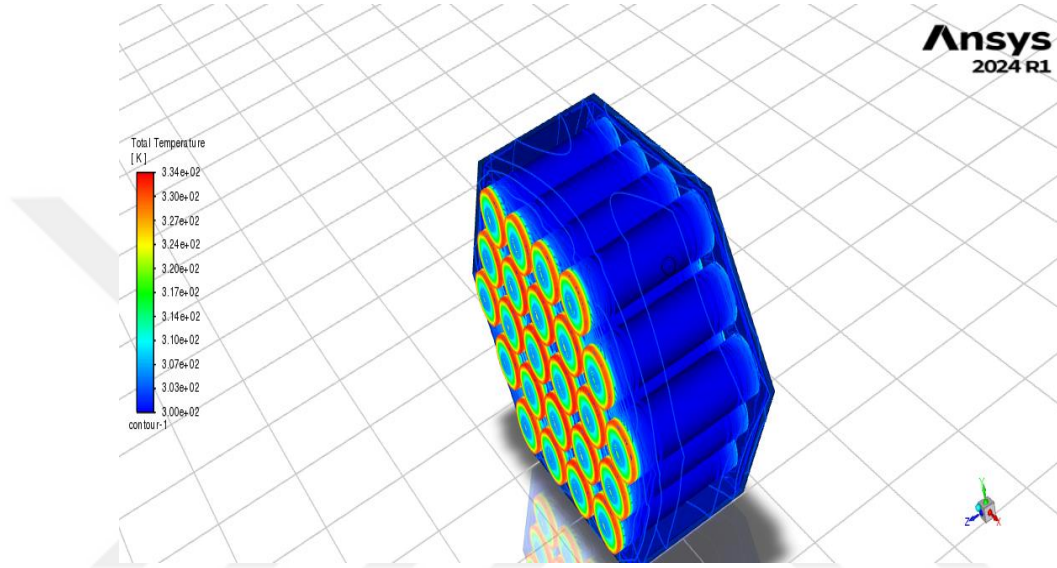
Şekil 6.4: 21700 Hücre Analizi Sıcaklık Dağılımı Sonuçları

3. Analiz PCM malzeme ve 24 adet 21700 hücre ile yapılmıştır.

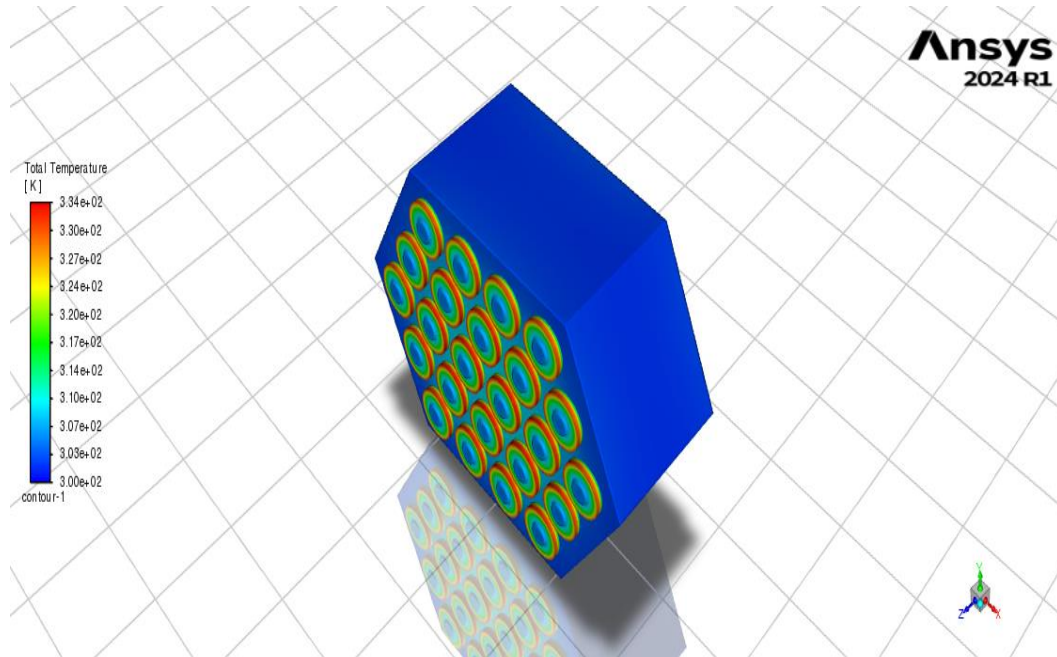
PCM Material Properties:

Fluid n-octadecen Density 724 kg/m³ Cp (Specific Heat) 2180 J/(kg K)
Thermal Conductivity 0.15 W/(m K) Viscosity 0.035 kg/(m s) Molecular Weight
28.966 kg/kmol Pure Solvent Melting Heat 244000 J/kg Solidus Temperature 301 K
Liquidus Temperature 304 K Solid nocta-solid Densty 814 kg/m³ Cp (Specific
Heat) 2150 J/(kg K) Thermal Conductivity 0.35 W/(m K)

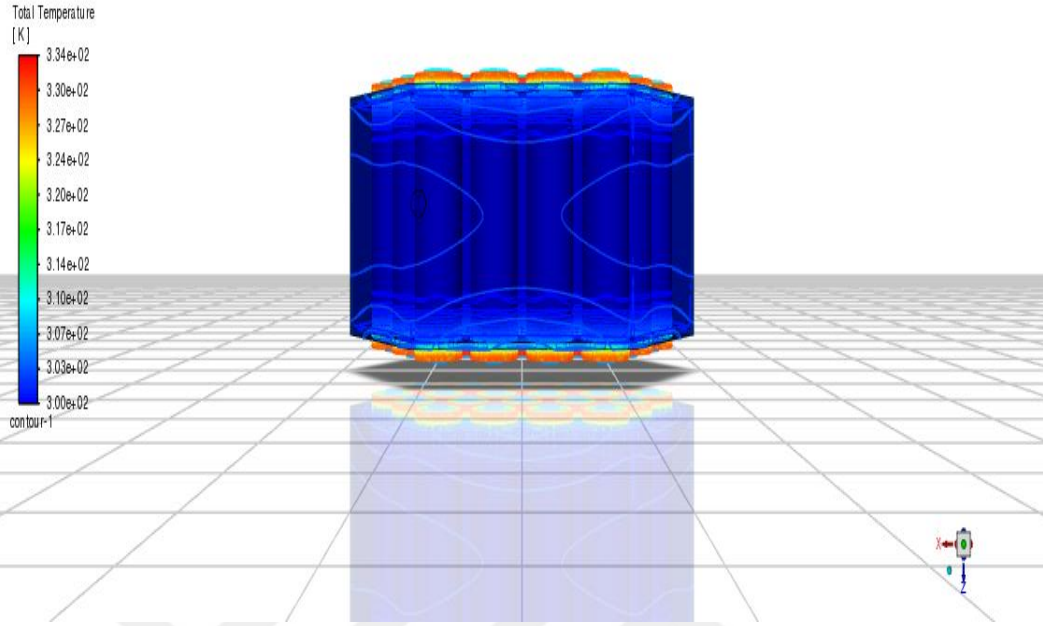
Lithumion-cell Density 2604.92 kg/m³ Cp (Specific Heat) 894 J/(kg K)
Thermal Conductivity 1.035 W/(m K)



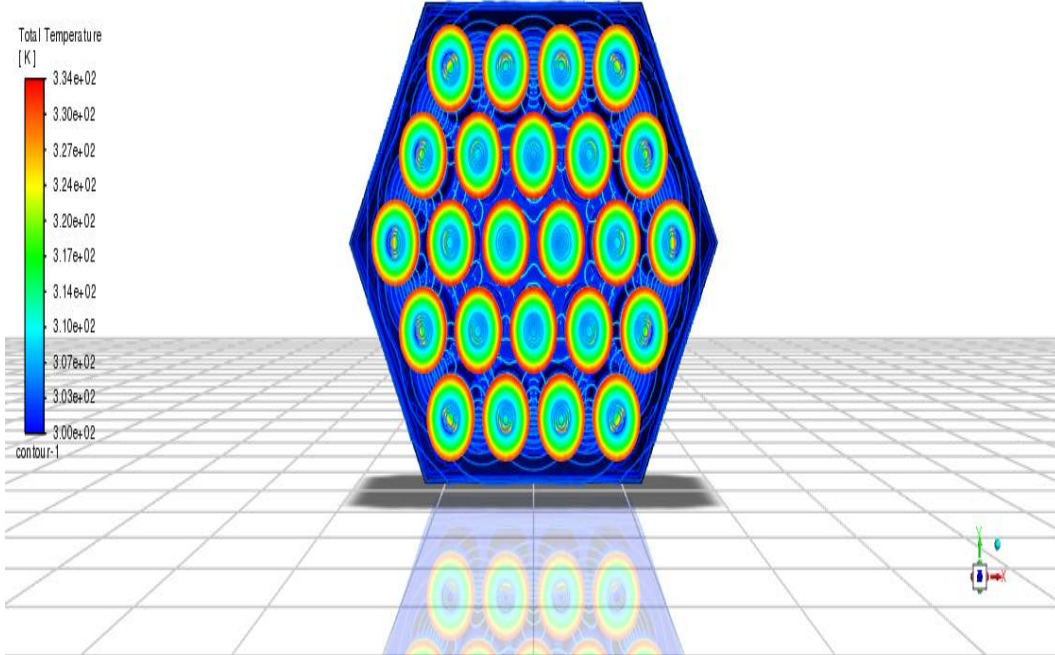
Şekil 6.5: Batarya Modül Tasarımı ve PCM Analizi Sıcaklık Dağılımı Sonuçları Şeffaf Görünüm



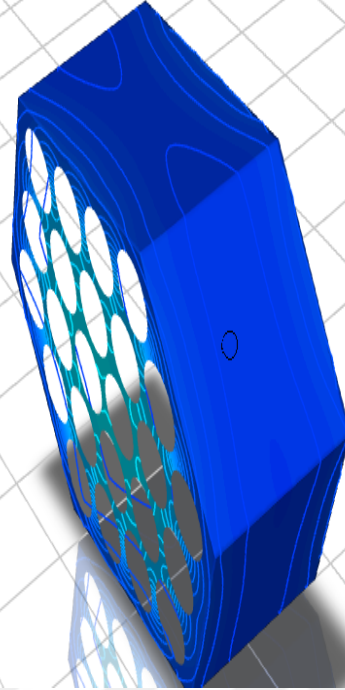
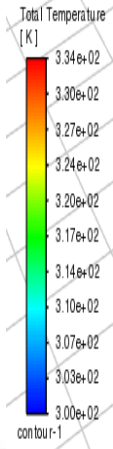
Şekil 6.6: Batarya Modül Tasarımı ve PCM Analizi Sıcaklık Dağılımı Sonuçları



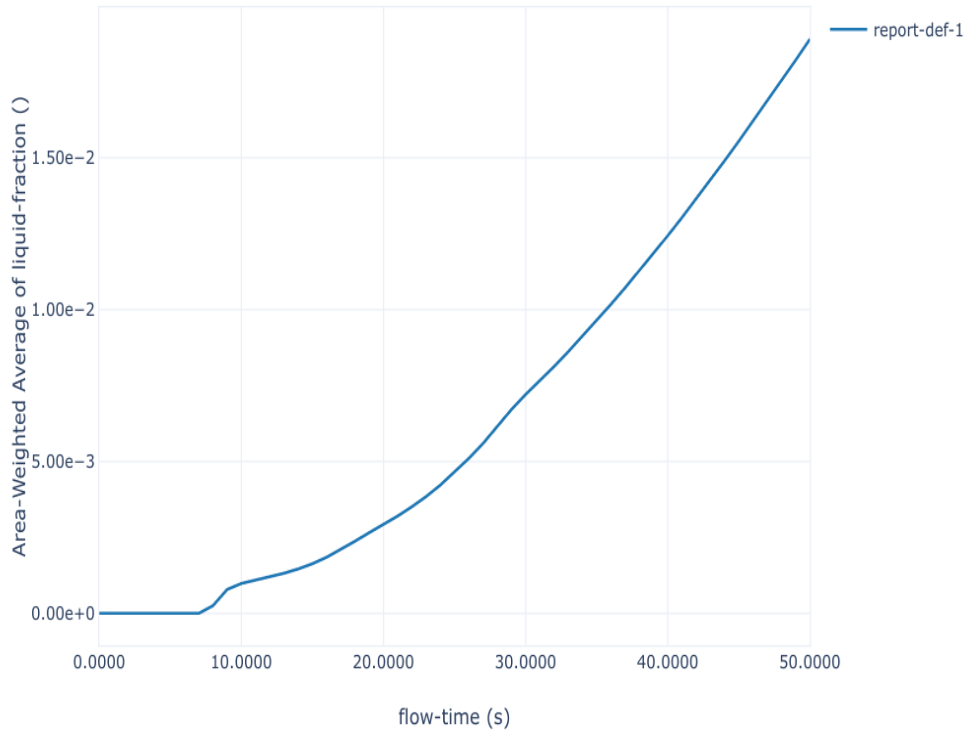
Şekil 6.7: Batarya Modül Tasarımı Hücre Sıcaklık Dağılımı Sonuçları



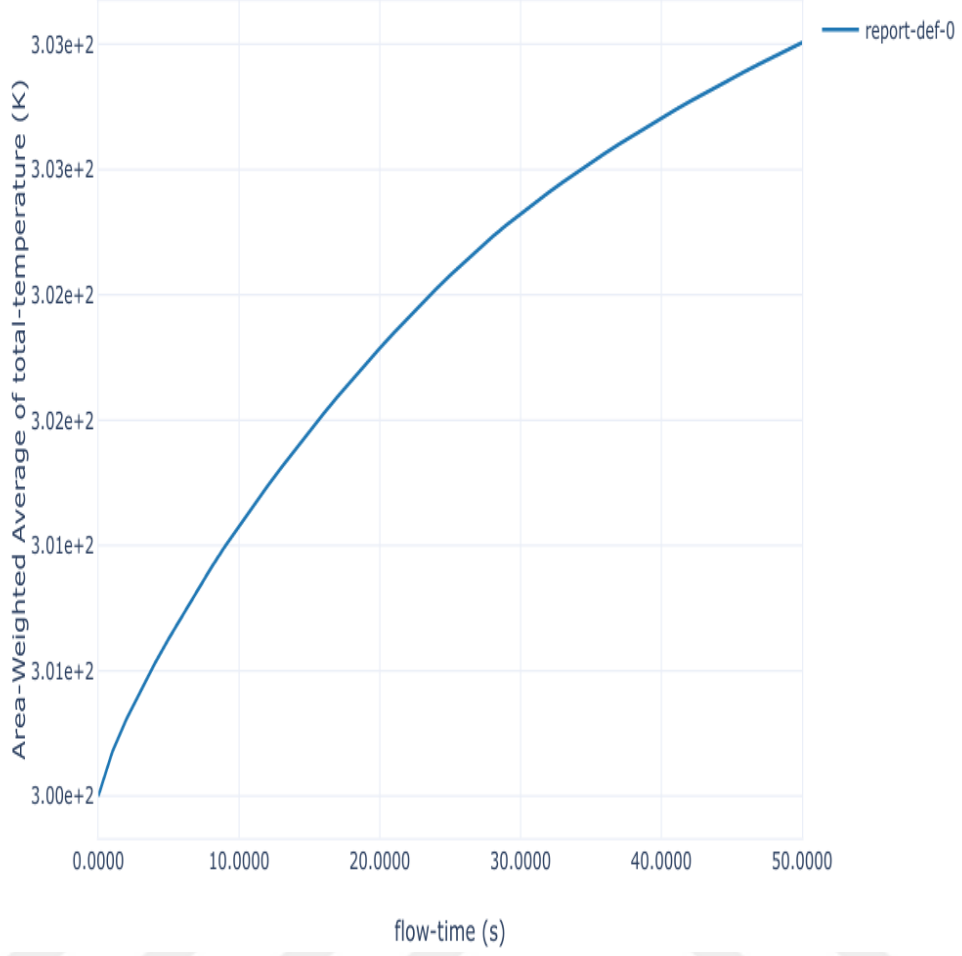
Şekil 6.8: Batarya Modül Tasarımı Sıcaklık Dağılımı Sonuçları Ön Görünüş



Şekil 6.9: Batarya Modül Tasarımı Alüminyum Dış Yüzey Sıcaklıkları



Şekil 6.10: Batarya Modül Tasarımı PCM sıvılaşma Grafiği



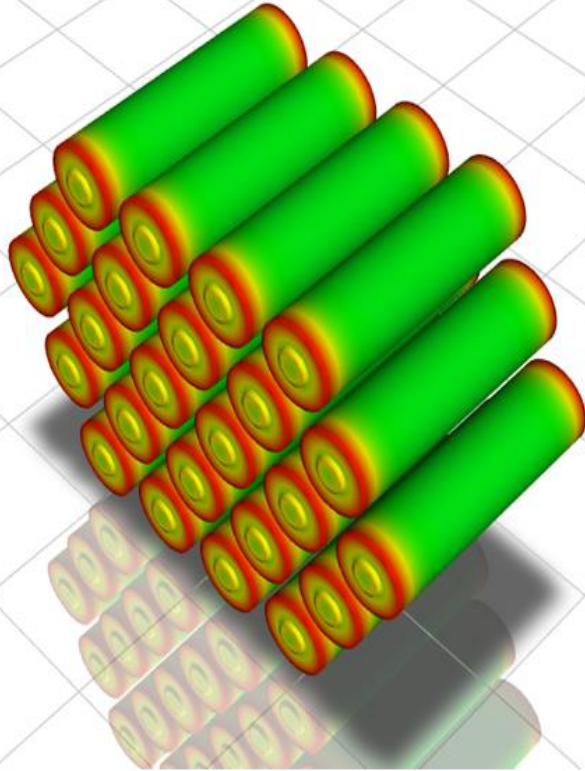
Şekil 6.11: Batarya Modül Tasarımı Sıcaklık Grafiği

4. Analiz PCM malzeme olmadan 24 adet 21700 hücre ile yapılmıştır.

Air Density 1.225 kg/m³ Cp (Specific Heat) 1006.43 J/(kg K) Thermal Conductivity 0.0242 W/(m K) Viscosity 1.7894e-05 kg/(m s) Molecular Weight 28.966 kg/kmol Aluminum Density 2719 kg/m³ Cp (Specific Heat) 871 J/(kg K) Thermal Conductivity 202.4 W/(m K)

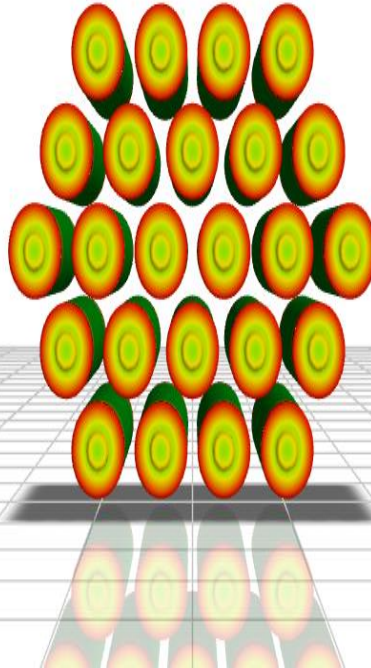
Lioncell Density 2694.2 kg/m³ Cp (Specific Heat) 894 J/(kg K) Thermal Conductivity 1.035 W/(m K)

Total Temp
[K]
4.13e+1
4.03e+
3.94e+
3.84e+
3.75e+
3.65e+
3.56e+
3.46e+
3.37e+
3.27e+
3.18e+1
contour-1

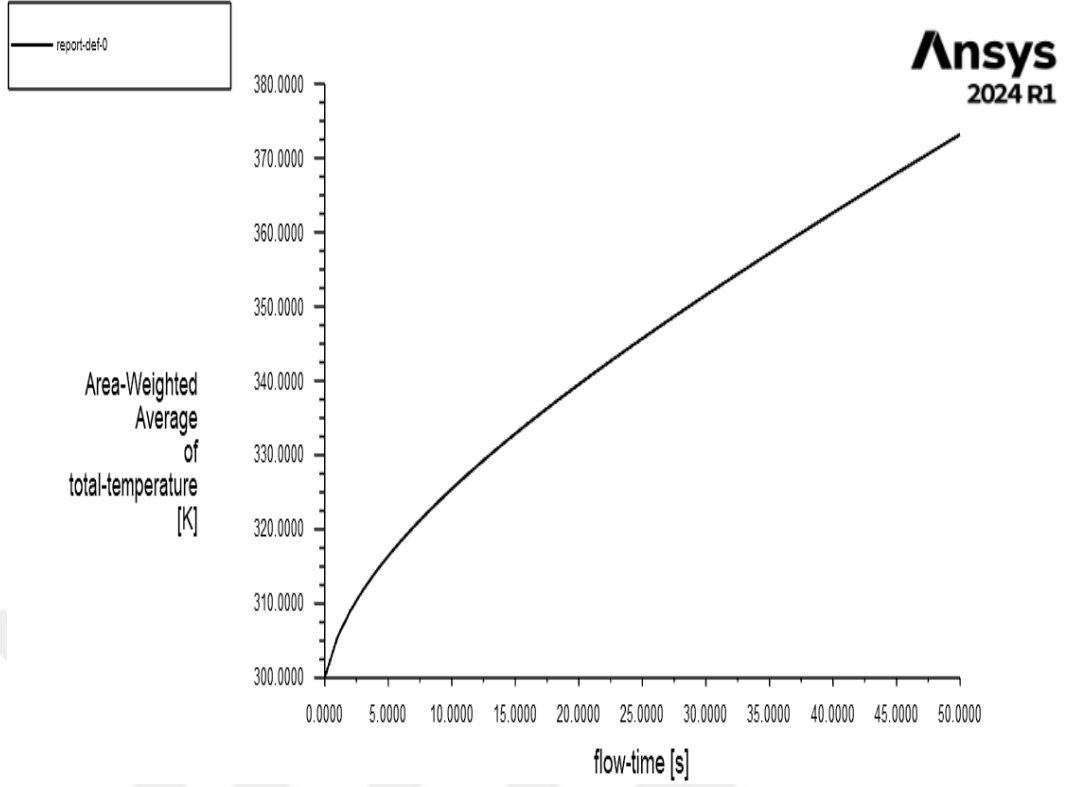


Şekil 6.12: 21700 Hücrelerin sıcaklık Grafiği (PCM Olmadan)

Total Temperature
[K]
4.13e+02
4.03e+02
3.94e+02
3.84e+02
3.75e+02
3.65e+02
3.56e+02
3.46e+02
3.37e+02
3.27e+02
3.18e+02
contour-1



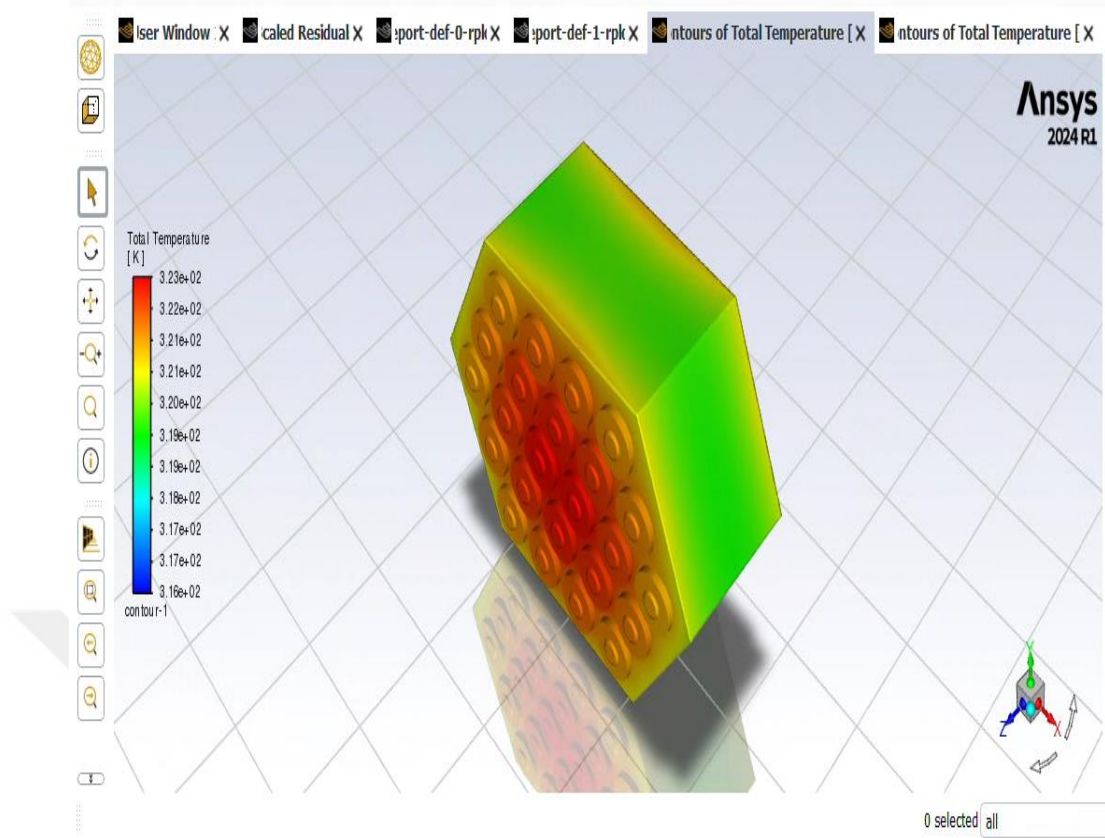
Şekil 6.13: 21700 Hücrelerin sıcaklık Grafiği Ön Görünüş (PCM Olmadan)



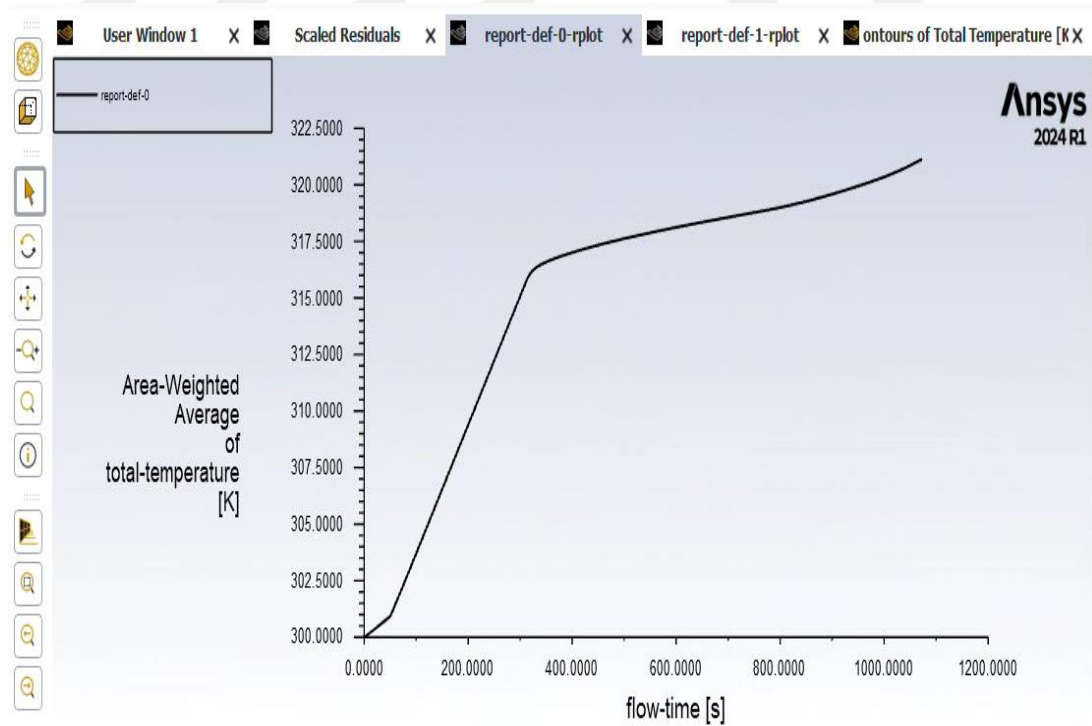
Şekil 6.14: 21700 Hücrelerin sıcaklık Grafiği (PCM Olmadan)

5. Analiz 20000 J/KG Katı-sıvı PCM malzeme ile tasarlanan modüle 24 adet 21700 hücre ile yapılmıştır.

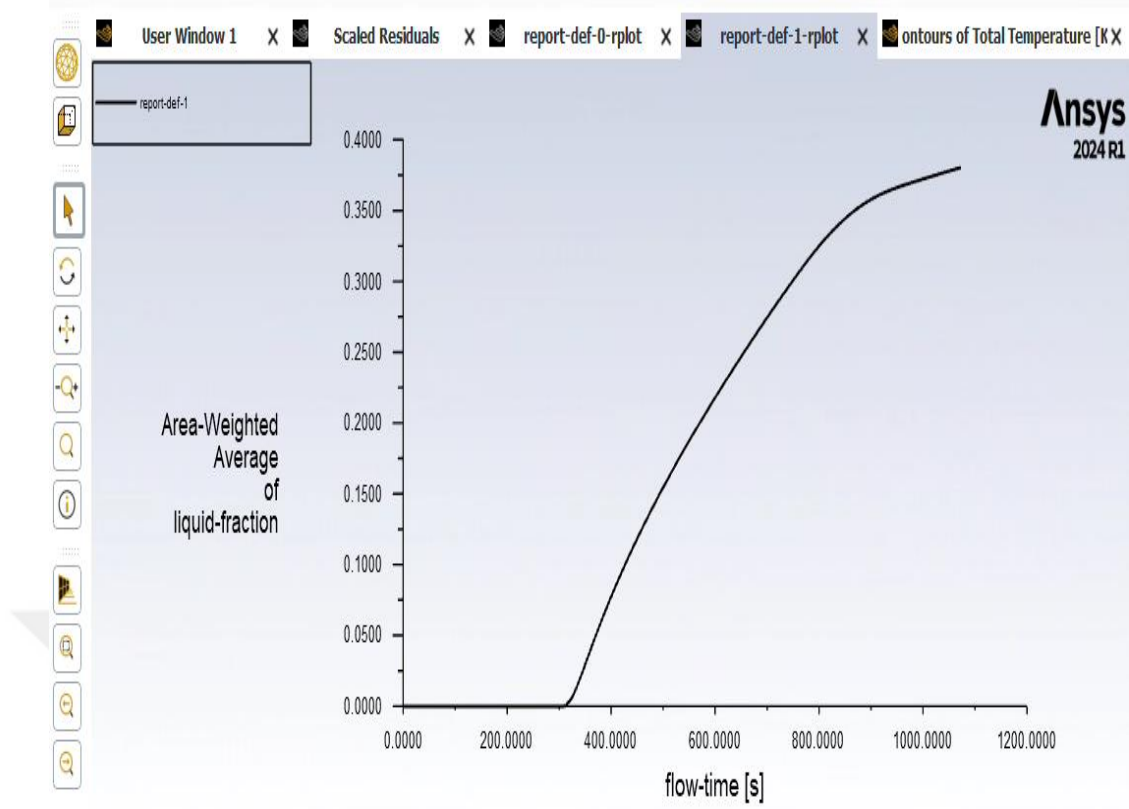
- Fluid		- Solid	
- pcm-sol		- lioncell	
Density	800 kg/m ³	Density	2690 kg/m ³
Cp (Specific Heat)	1.9e-06 J/(kg K)	Cp (Specific Heat)	894 J/(kg K)
Thermal Conductivity	0.35 W/(m K)	Thermal Conductivity	1.035 W/(m K)
Viscosity	0.001785 kg/(m s)	- pcmkat	
Molecular Weight	28.966 kg/kmol	Density	800 kg/m ³
Pure Solvent Melting Heat	200000 J/kg	Cp (Specific Heat)	1.9e-06 J/(kg K)
Solidus Temperature	316 K	Thermal Conductivity	0.35 W/(m K)
Liquidus Temperature	319 K	- aluminum	
		Density	2719 kg/m ³
		Cp (Specific Heat)	871 J/(kg K)
		Thermal Conductivity	202.4 W/(m K)



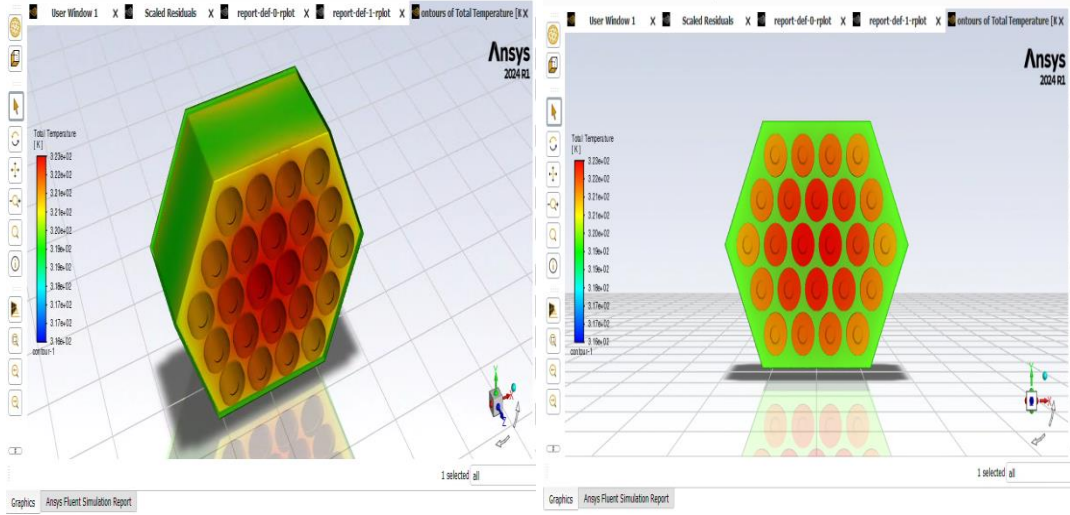
Şekil 6.15: 21700 Hücrelerin Sıcaklık İzometri Görünüşü (PCM Katı-Sıvı)



Şekil 6.16: 21700 Hücrelerin Sıcaklık Grafiği (PCM: Katı-Sıvı Kullanılmıştır)

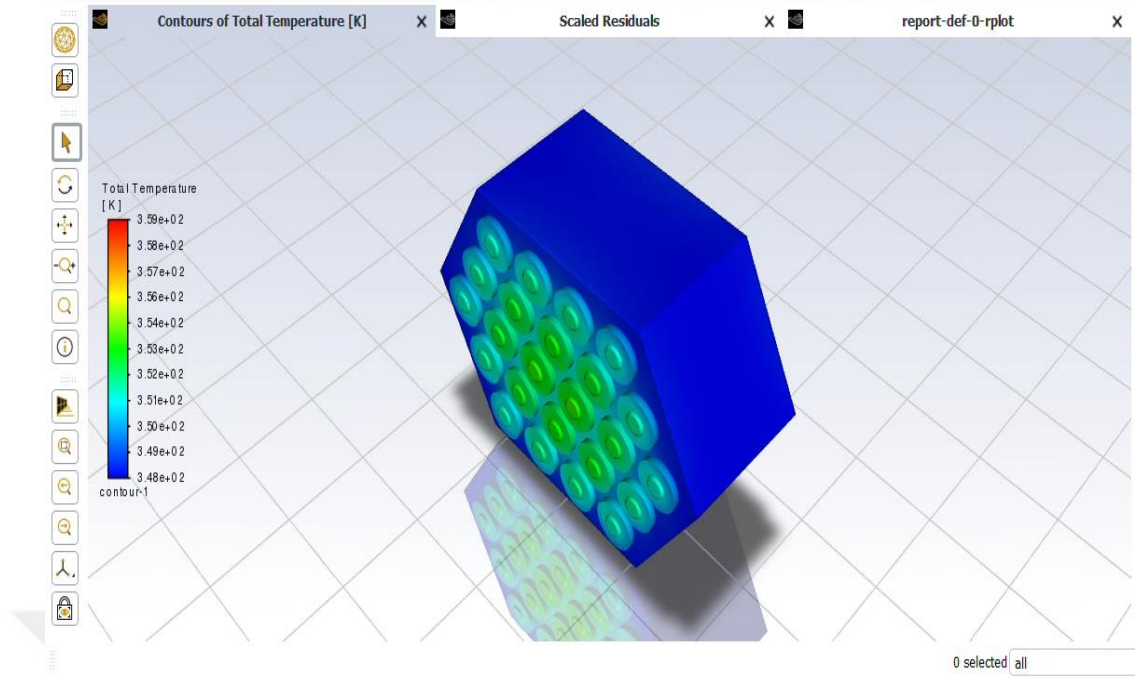


Şekil 6.17: Batarya Modül Tasarımı PCM Sıvılaşma Grafiği

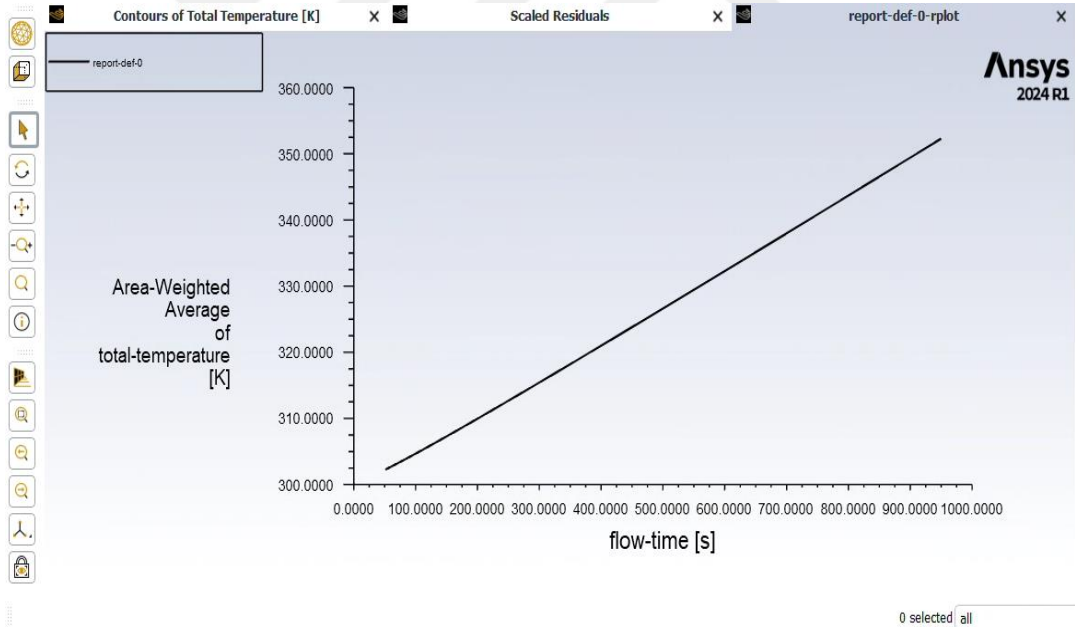


Şekil 6.18: Batarya Modül Tasarımı Isı Dağılımı Görünüşler PCM Katı-Sıvı

6. Analiz 20000 J/KG Katı-sıvı PCM malzeme olmadan tasarlanan modüle 24 adet 21700 hücre ile yapılmıştır.

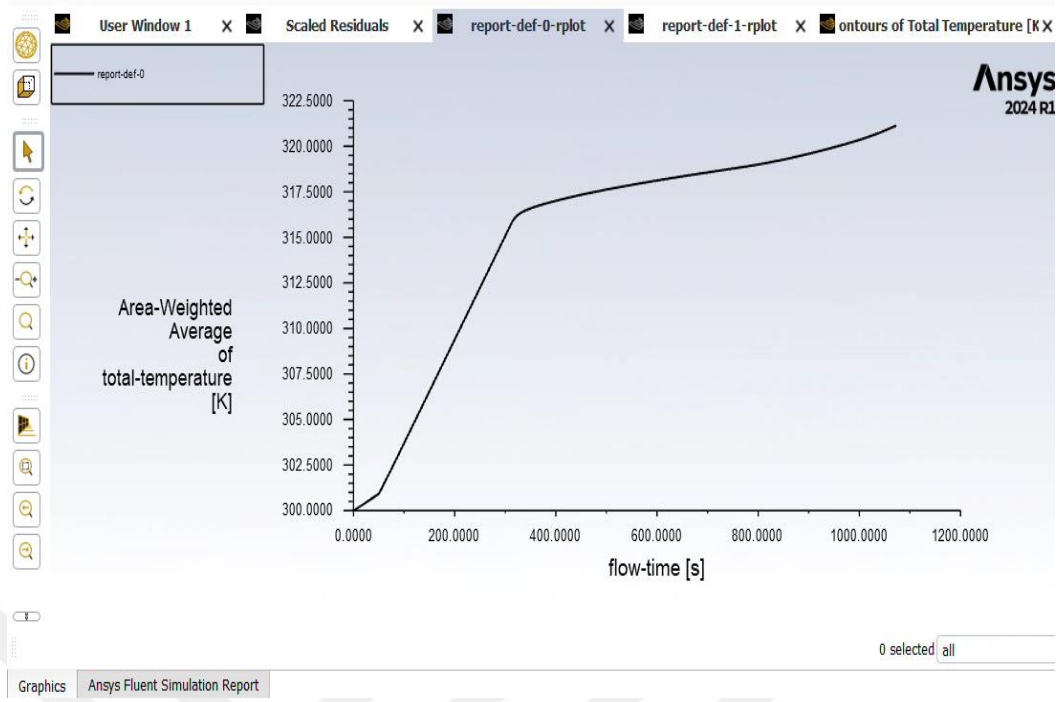


Şekil 6.19: Batarya Modül Tasarımı Isı Dağılımı Görünüşler PCM Olmadan

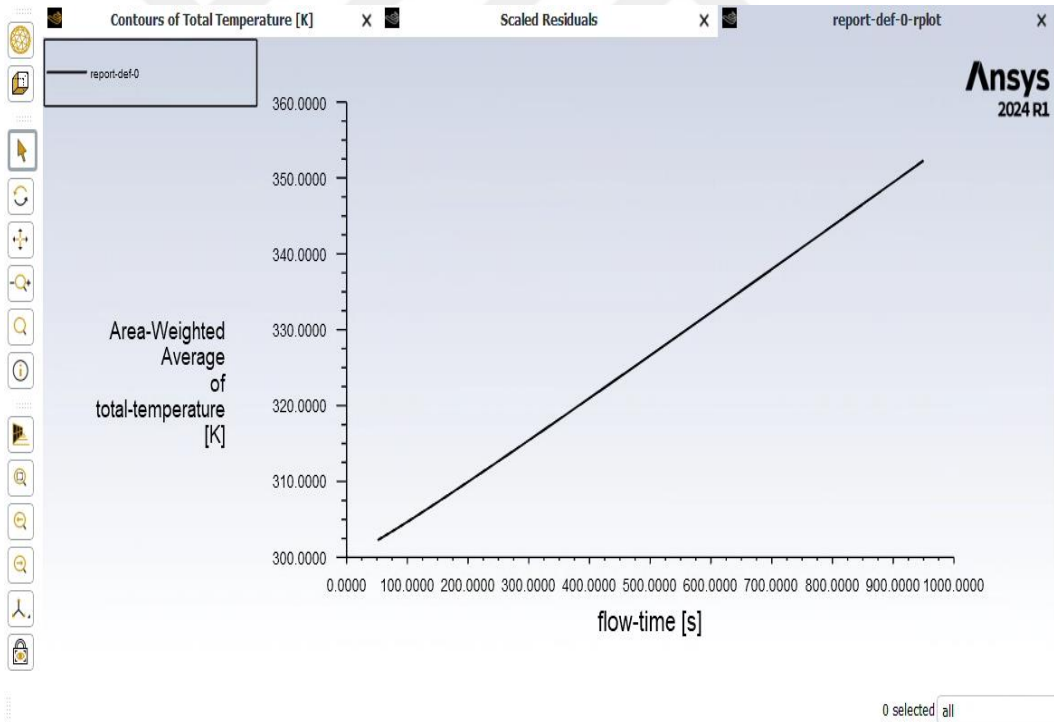


Şekil 6.20: Batarya Modül Tasarımı Isı Grafiği PCM Kullanılmamıştır

5. ve 6. Analizleri karşılaştırdığımızda PCM etkinliğini 5. Analizde 316 K den başlayarak 319 K e kadar 200000 j/kg enerji soğurarak, dış alüminyum kabuğa ileterek termal olarak batarya modülünü düşük sıcaklıklarda tutabildiği gözükmektedir, 6. Analizde pcm olmadan yapılmış ve ısının sürekli arttığı görülmüştür. 5.analiz ve 6. Analiz sıcaklık dağılımları alttaki grafikte görülmektedir.



Şekil 6.21: 21700 Hücrelerin Sıcaklık Grafiği (PCM: Katı-Sıvı Kullanılmıştır)



Şekil 6.22: Batarya Modül Tasarımı Isı Grafiği - PCM Kullanılmamıştır

6.5 Deneysel Yöntemler

Simülasyon sonuçlarını doğrulamak ve batarya modülünün gerçek koşullarda nasıl davrandığını görmek için deneysel testler yapılır. Bu testler, termal analizlerin

ne kadar doğru olduğunu değerlendirmek ve tasarımın gerçekten işlevsel olup olmadığını görmek için çok önemlidir.

Termal Kamera:

Batarya modülündeki sıcaklık farklarını görsel olarak gözlemlemek için termal kameralar kullanılır. Bu kameralar, ısının hangi bölgelerde yoğunlaştığını ve soğutma sisteminin ne kadar etkili çalıştığını doğrudan görmek için faydalıdır. Böylece, tasarımın simülasyonlarla uyumlu olup olmadığına dair net bir fikir edinilebilir.

Sıcaklık Sensörleri:

Bataryanın farklı bölgelerine yerleştirilen sıcaklık sensörleri, her hücredeki sıcaklık değişimlerini izlememize olanak tanır. Bu sensörler, ısının hangi hücrelerde daha fazla biriktiğini ve hangi bölgelerin aşırı ısındığını belirlememize yardımcı olur. Bu sayede, ısının nasıl dağıldığına dair daha ayrıntılı bir analiz yaparak, gerekirse tasarımdaki iyileştirmeleri tespit edebiliriz.

Bu tür deneysel testler, simülasyonların doğruluğunu kontrol etmek ve bataryanın gerçek koşullarda verimli çalışıp çalışmadığını değerlendirmek için kritik öneme sahiptir.

6.6 Termal Performansın Değerlendirilmesi

Yapılan termal analizler, batarya modülündeki sıcaklık dağılımını ve soğutma sistemlerinin etkinliğini değerlendirmemize yardımcı olur. Bu değerlendirme, tasarımın ne kadar verimli olduğunu ve ısı yönetimi çözümlerinin işlevselliğini anlamamıza olanak tanır.

Isı Dağılımı:

Batarya hücreleri arasındaki sıcaklık farklarının homojen olup olmadığı incelenir. Eğer sıcaklık farkları çok büyükse, bu durum soğutma sisteminin yeterince verimli olmadığını ya da tasarımda bazı iyileştirmelerin yapılması gerektiğini gösterir.

Soğutma Sistemleri Etkinliği:

Bataryadaki sıcaklıkların belirli bir seviyede tutulup tutulmadığı, kullanılan soğutma plakaları ya da sıvı soğutma sistemlerinin başarısı ile ölçülür. Etkili bir

soğutma sistemi, bataryanın sıcaklık artışını engeller, bu da bataryanın daha uzun ömürlü ve güvenli çalışmasını sağlar.

Sıcaklık Dengeleme:

PCM (Faz Değişim Malzemeleri) kullanımı, batarya sıcaklığının düzensiz bir şekilde yükselmesini engeller. PCM'ler, aşırı ısının birikmesini önler ve bataryanın çalışma sıcaklığını daha stabil bir seviyede tutar.

Termal analizler sonucunda elde edilen veriler doğrultusunda, batarya modülündeki ısı yönetim stratejilerinin etkinliği gözden geçirilir. Eğer bazı bölgelerde aşırı ısınma tespit edilirse, bu bölgelerde soğutma sistemini güçlendirebilir veya kullanılan PCM'leri iyileştirebiliriz. Ayrıca, batarya hücreleri arasındaki ısı dağılımını daha verimli hale getirebilmek için tasarımda gerekli değişiklikler yapılabilir.

Sonuç olarak, yapılan termal analizler, bataryanın ısı performansını optimize etmek için gerekli düzenlemeleri ve tasarımdaki iyileştirmeleri belirlememize yardımcı olur. Bu sayede, batarya modülünün güvenli, verimli ve uzun ömürlü bir şekilde çalışmasını sağlarız.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1 Bulguların Özeti

Bu çalışma, Faz Değişim Malzemeleri (PCM) tabanlı sistemlerin batarya termal yönetimindeki büyük potansiyelini ortaya koymaktadır. PCM'ler, batarya soğutma sistemlerinde verimli ve maliyet açısından uygun çözümler sunarak pillerin performansını artırabilir ve ömürlerini uzatabilir. Çalışma, PCM malzemelerinin bu tür sistemlerde etkin bir şekilde kullanılabileceğini ve ANSYS yazılımının bu sistemlerin tasarımında ne kadar etkili bir araç olduğunu göstermektedir. Elde edilen sonuçlar, PCM malzemelerinin batarya soğutma sistemlerinde geleneksel soğutma yöntemlerine göre daha verimli bir seçenek sunduğunu göstermektedir.

Ancak, gelecekteki araştırmaların, farklı PCM malzemeleri, batarya hücre dizilimleri ve aktif soğutma sistemleri kombinasyonlarının daha kapsamlı bir şekilde incelenmesini gerektirdiği düşünülmektedir. Bu, batarya sistemlerinin verimliliğini artırmaya yönelik yeni yaklaşımların geliştirilmesine yardımcı olabilir.

7.2 Alana Katkılar

Bu araştırma, PCM tabanlı soğutma sistemlerinin lityum iyon pillerde nasıl kullanılabileceğini kapsamlı bir şekilde incelemektedir. Ayrıca, geleneksel soğutma yöntemleriyle yapılan karşılaştırmalar sonucunda, PCM'lerin sağladığı iyileştirmeler de açıkça ortaya konmuştur. Bu çalışma, batarya soğutma ve termal yönetiminde PCM kullanımına dair mevcut literatüre önemli katkılar sunmaktadır. Araştırma, bu alanda yapılacak gelecekteki çalışmalar için sağlam bir temel oluştururken, PCM'lerin pil performansı üzerindeki olumlu etkilerini de vurgulamaktadır.

7.3 Gelecekteki Araştırmalar

Gelecekteki araştırmalar, PCM'lerin termal iletkenliğini artırmak ve faz geçişi sırasında yaşanan enerji kayıplarını azaltmak gibi yönlere odaklanabilir. Ayrıca, dinamik termal yönetim için akıllı sensörler ve kontrol sistemlerinin entegrasyonu,

PCM tabanlı soğutma sistemlerinin verimliliğini artırabilir. Hibrit soğutma sistemlerinin kullanımı ve yeni PCM formülasyonlarının geliştirilmesi de bu alandaki ilerlemelere katkı sağlayabilir. Bu tür gelişmeler, batarya sistemlerinin performansını iyileştirerek daha verimli ve güvenli batarya yönetim çözümleri sunabilir.

7.4 Gelecekteki Araştırma Yönleri

Termal İletkenliğin İyileştirilmesi: PCM'lerin düşük termal iletkenlikleri, ısı dağılımını kısıtlayan bir engel olabilir. Bu nedenle gelecekteki araştırmalar, termal iletkenliği artırmak için grafit, karbon nano tüpler veya metal köpükler gibi iletken dolgu maddelerinin PCM'lere eklenmesini hedefleyebilir. Bu iyileştirmeler, batarya sistemlerinin daha verimli bir şekilde soğutulmasını sağlayabilir.

Hibrit Soğutma Sistemleri: PCM tabanlı soğutma sistemlerini sıvı soğutma veya ısı emici sistemler gibi aktif soğutma yöntemleriyle birleştiren hibrit soğutma sistemleri geliştirmek, soğutma verimliliğini önemli ölçüde artırabilir. Özellikle yüksek ısı yükü altında çalışan bataryalarda, pasif ve aktif soğutma yöntemlerinin birleşimi faydalı olabilir.

Dinamik Kontrol Sistemleri: Akıllı sensörler ve aktif kontrol mekanizmalarıyla donatılmış sistemler, gerçek zamanlı sıcaklık verilerine dayalı olarak PCM tabanlı soğutma sistemlerinin daha esnek ve verimli çalışmasını sağlayabilir. Bu sistemler, termal yönetimi optimize ederken bataryaların güvenliğini ve enerji verimliliğini de artırabilir.

Uzun Vadeli Güvenilirlik ve Dayanıklılık: PCM'lerin uzun süreli kullanımda performanslarını koruyabilmesi için termal döngüler sırasında yaşanabilecek kararsızlıklar ve bozulmaların araştırılması gereklidir. Bu konuda yapılacak çalışmalar, PCM'lerin uzun vadede güvenilirliğini artırmak için önemli veriler sağlayabilir.

Alternatif Pil Kimyaları: Bu çalışmada lityum iyon pillerin üzerine odaklanılmış olsa da, katı hal piller, lityum-kükürt piller veya sodyum iyon piller gibi alternatif pil kimyalarının PCM tabanlı soğutma sistemleriyle uyumlu olup olmadığı araştırılabilir. Farklı pil kimyalarının termal yönetim ihtiyaçları göz önüne alındığında, PCM'lerin bu alternatif pil teknolojileriyle entegrasyonu da dikkatlice incelenmelidir.

Çevresel Etki ve Sürdürülebilirlik: PCM'lerin çevresel etkileri ve sürdürülebilirlikleri üzerine yapılacak araştırmalar, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen PCM'lerin çevre dostu özelliklerini daha iyi anlamamıza olanak tanıyabilir. Ayrıca, yaşam döngüsü analizi ve biyolojik olarak parçalanabilirlik gibi faktörler, bu alandaki çevresel etki çalışmalarında önemli bir yer tutacaktır.

7.5 Pratik Sonuçlar

Bu araştırma, elektrikli araçlar, yenilenebilir enerji sistemleri ve taşınabilir elektronik cihazlar gibi modern pil teknolojilerinin geliştirilmesinde önemli pratik sonuçlar sunmaktadır. PCM tabanlı soğutma sistemlerinin kullanımı, sadece pil ömrünü uzatmakla kalmaz, aynı zamanda termal kaçak risklerini de azaltabilir. Elektrikli araçlar ve taşınabilir elektronik cihazlar gibi yüksek enerji ihtiyacı duyan uygulamalarda, PCM tabanlı sistemlerin verimliliği artırıcı etkileri oldukça belirgindir. Ayrıca, şebeke depolama sistemlerinde de PCM'ler, büyük ölçekli enerji depolama sistemlerinin güvenliğini ve verimliliğini artırmada önemli bir rol oynayabilir. Bu bulgular, enerji depolama ve pil teknolojileri alanındaki yenilikçi soğutma çözümlerine olan talebin arttığı günümüzde büyük bir öneme sahiptir.

KAYNAKLAR

- Abhishek Rai, N.S Thakur, Deepak Sharma (2023) "Numerical Simulation of Thermal Energy Storage using Phase Change Material", *Cornell University*, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.11624>
- Aswin Sevugan, P., Pradeep, M., Krishnaswamy, A., ve Karunamurthy, K. (2022). Battery Thermal Management System for Electric Vehicles Using Phase Change Materials. *Materials Today: Proceedings*, 51, 1604–1611. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.468>
- Bai, F., Chen, M., Song, W., Feng, Z., Li, Y., ve Ding, Y. (2017). Thermal Management Performances of PCM/Water Cooling-Plate Using for Lithium-Ion Battery Module Based on Non-Uniform Internal Heat, *Applied Thermal Engineering*, 126, 17–27. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.07.141>
- Bandhauer, T. M., Garimella, S., ve Fuller, T. F. (2011). A Critical Review of Thermal Issues in Lithium-Ion Batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 158(3), R1. <https://doi.org/10.1149/1.3515880>
- Chen, D., Jiang, J., Kim, G. H., Yang, C., ve Pesaran, A. (2016). Comparison of Different Cooling Methods for Lithium Ion Battery Cells. *Applied Thermal Engineering*, 94, 846–854. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.10.015>
- Choudhari, V. G., Dhoble, A. S., ve Panchal, S. (2020). Numerical Analysis of Different Fin Structures in Phase Change Material Module for Battery Thermal Management System and Its Optimization. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 163, 120434. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.120434>
- Duan, X., ve Naterer, G. F. (2010). Heat Transfer in Phase Change Materials for Thermal Management of Electric Vehicle Battery Modules. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(23–24), 5176–5182. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2010.07.044>
- Göçmen S. (2021). *Investigations of an Air-Cooled Battery Thermal Management System*, A thesis Submitted to The School of Engineering and Sciences of Izmir Institute of Technology, İzmir.
- Hallaj, S. A., Kizilel, R., Lateef, A., Sabbah, R., Farid, M., ve Rob Selman, J. (2005). Passive Thermal Management Using Phase Change Material (PCM) for EV and HEV Li-Ion Batteries. 2005 IEEE *Vehicle Power and Propulsion Conference* sunuldu, Chicago, 2005, 376–380. <https://doi.org/10.1109/vppc.2005.1554585>
- Huang, Q., Li, X., Zhang, G., Zhang, J., He, F., ve Li, Y. (2018). Experimental Investigation of The Thermal Performance of Heat Pipe Assisted Phase Change Material for Battery Thermal Management System. *Applied*

- Thermal Engineering*, 141, 1092–1100.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.06.048> 75
- Huang, R., Li, Z., Hong, W., Wu, Q., ve Yu, X. (2020). Experimental and Numerical Study of PCM Thermophysical Parameters on Lithium-Ion Battery Thermal Management. *Energy Reports*, 6, 8–19.
<https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.09.060>
- Jingwen Weng a d, Dongxu Ouyang a, Xiaoqing Yang b, Mingyi Chen C, Guoqing Zhang B, Jian Wang (2023) "Optimization of the Internal Fin in a Phase-Change-Material Module for Battery Thermal Management"
- Kaba, M. Y., Kalkan, O., Celen, A. (December 2021). "Elektrikli Araçlarda Kullanılan Bataryalar ve Termal Yönetim Sistemlerinin İncelenmesi" Konya: *Journal of Engineering Sciences* 9(4):1119-1136
 DOI:10.36306/konjes.945819.
- Kaya. S., Kılıç, M., (2024). *Thermal Design of Cooling Blocks Performance Comparison for Li-Ion Battery Based Liquid Cooling System December Conference: International Scientific Research and Innovation Congress-II At: December 16-18, 2024 / Adana, Türkiye*
- Kshetrimayum, K. S., Yoon, Y. G., Gye, H. R., ve Lee, C. J. (2019). Preventing Heat Propagation and Thermal Runaway in Electric Vehicle Battery Modules Using Integrated PCM and Micro-Channel Plate Cooling System. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113797.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113797>
- Ling Ziye, Fang Xiaoming, Wang Shuangfeng, Zhang Zhengguo, Liu Xiaohong (2013). "Thermal Management of Lithium-Ion Batteries Using Phase Change Materials" *Energy Strage Science and Technology*, Vol 2, No:5, ss.451-459. China.
- Li, Y., Du, Y., Xu, T., Wu, H., Zhou, X., Ling, Z., ve Zhang, Z. (2018). Optimization of Thermal Management System for Li-Ion Batteries Using Phase Change Material. *Applied Thermal Engineering*, 131, 766–778.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.055>
- Li, Y., Du, Y., Xu, T., Wu, H., Zhou, X., Ling, Z., ve Zhang, Z. (2018). Optimization of Thermal Management System for Li-Ion Batteries Using Phase Change Material. *Applied Thermal Engineering*, 131, 766–778.
<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.12.055>
- Lin, X., Zhang, X., Liu, L., ve Yang, M. (2021). Optimization Investigation on Air Phase Change Material Based Battery Thermal Management System. *Energy Technology*, 9(7). <https://doi.org/10.1002/ente.202100060>
- Liu, C., Xu, D., Weng, J., Zhou, S., Li, W., Wan, Y., Jiang, S., Zhou, D., Wang, J., ve Huang, Q. (2020). Phase Change Materials Application in Battery Thermal Management System, *A Review. Materials*, 13(20), 1–37.
<https://doi.org/10.3390/ma13204622>
- Liu, X., Zhang, C. F., Zhou, J. G., Xiong, X., ve Wang, Y. P. (2022). Thermal Performance of Battery Thermal Management System Using Fins to Enhance the Combination of Thermoelectric Cooler and Phase Change

- Material. *Applied Energy*, 322(March), 119503.
<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119503>
- Luo, J., Zou, D., Wang, Y., Wang, S., ve Huang, L. (2022). Battery Thermal Management Systems (BTMS) Based on Phase Change Material (PCM): A Comprehensive Review. *Chemical Engineering Journal*, 430(P1), 132741. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.132741>
- Mehdi V. Bozorg, Juan F. Torres (2024) "Multifaceted Thermal Regulation in Electrochemical Batteries Using Cooling Channels and Foam-Embedded Phase Change Materials", *Applied Thermal Engineering*, Volume 263, (15 March 2025), <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.125266>
- Mousavi, S., Siavashi, M., ve Zadehkabir, A. (2021). A New Design for Hybrid Cooling Of Li-Ion Battery Pack Utilizing PCM and Mini Channel Cold Plates. *Applied Thermal Engineering*, 197, 117398. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2021.117398>
- Naghdbishi, Ali., Yazdi., Mohammad E., Akbari, G., (t.y.). "Numerical Simulation of Thermal Energy Storage using Phase Change Material" *Department of Mechanical Engineering, NIT Hamirpur, H.P.-177005, India*
<https://arxiv.org/pdf/2306.11624>
- Özbektaş, S., Sungur, S., Kaleli, A. (2024). Zorlanmış Hava Soğutma Esaslı Lityum Bazlı Silindirik Bir Batarya Hücresinin Isı Dağılım Performansının Nümerik İncelenmesi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi* 14(3):1586-1603, DOI:10.31466/kfbd.1512472
- Peneklioğlu, K., Bilen K. ((2024). "Elektrikli Araç Batarya Modülünün Su ile Soğutulmasının Temassızlık Direnci Dikkate Alınarak İncelenmesi" *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39:4 2587-2599, DOI: 10.17341/gazimmfd.1307382
- Rajan, J. T., Jayapal, V. S., Krishna, M. J., Mohammed Firose, K. A., Vaisakh, S., John, A. K., ve Suryan, A. (2022). Analysis of Battery Thermal Management System for Electric Vehicles Using 1-Tetradecanol Phase Change Material. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 51, 101943. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101943>
- Rao, Z., Wang, Q., ve Huang, C. (2016). Investigation of the Thermal Performance of Phase Change Material/Mini-Channel Coupled Battery Thermal Management System. *Applied Energy*, 164, 659–669. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.12.021>
- Sabbah, R., Kizilel, R., Selman, J. R., ve Hallaj, S. A. (2008). Active (Air-Cooled) vs. Passive (Phase Change Material) Thermal Management of High Power Lithium-Ion Packs: Limitation of Temperature Rise and Uniformity of Temperature Distribution. *Journal of Power Sources*, 182(2),630–638. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2008.03.082>
- Safdari, M., Ahmadi, R., ve Sadeghzadeh, S. (2020). *Numerical Investigation on PCM Encapsulation Shape Used in the Passive-Active Battery Thermal Management.* *Energy*, 193, 116840. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116840>

- Şefkat, G., Özel, M. A. (2020). "Elektrikli Araçlarda Kullanılan Pil Hücresinin Elektriksel ve Termal Modeli" *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, Cilt 25, Sayı 1, , DOI: 10.17482/uumfd.541391
- Weng, J., He, Y., Ouyang, D., Yang, X., Zhang, G., ve Wang, J. (2019). Thermal Performance of PCM and Branch-Structured Fins for Cylindrical Power Battery in a High-Temperature Environment. *Energy Conversion and Management*, 200, 112106. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112106>
- Weng, J., Ouyang, D., Yang, X., Chen, M., Zhang, G., ve Wang, J. (2020). Optimization of the Internal Fin in a Phase-Change-Material Module for Battery Thermal Management. *Applied Thermal Engineering*, 167, 114698. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.114698>
- Yan, J., Li, K., Chen, H., Wang, Q., ve Sun, J. (2016). Experimental Study on the Application of Phase Change Material in the Dynamic Cycling of Battery Pack System. *Energy Conversion and Management*, 128, 12–19. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.09.058>
- Zhang, H., Wu, X., Wu, Q., ve Xu, S. (2019). Experimental Investigation of Thermal Performance of Large-Sized Battery Module Using Hybrid PCM and Bottom Liquid Cooling Configuration. *Applied Thermal Engineering*, 159, 113968. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.113968>
- Zhao, J., Rao, Z., Huo, Y., Liu, X., ve Li, Y. (2015). Thermal Management of Cylindrical Power Battery Module for Extending the Life of New Energy Electric Vehicles. *Applied Thermal Engineering*, 85, 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.04.012>
- Zhu, Y., Zhu, W. H., Davis, Z., ve Tatarchuk, B. J. (2016). Simulation of Ni-MH Batteries via an Equivalent Circuit Model for Energy Storage Applications. *Advances in Physical Chemistry*. <https://doi.org/10.1155/2016/4584781>