



Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

Araştırma Makalesi

Güneş Enerjili Kurutma Sistemlerinde Parafin Kullanılarak Boya Çamurunun Kurutulması

 Zeinab AMİN ^{a,*},  Görkem YÜKSEL ^b,  Güray SALİHOĞLU ^b,  N. Kamil SALİHOĞLU ^b

^a Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Uludağ Üniversitesi, Bursa, TÜRKİYE

^b Çevre Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Enstitüsü, Uludağ Üniversitesi, Bursa, TÜRKİYE

* Sorumlu yazarın e-posta adresi: zeinabamin13@gmail.com

DOI : 10.29130/dubited.787257

ÖZET

Güneş kurutucu sistemi, ileri bir doğal güneş kurutma teknolojisi olarak geniş alanlardada kullanılmaktadır. Bu çalışmanın amacı; atık boya çamurunun yönetimi sürecinde güneşle kurutmayı alternatif bir proses olarak incelemektir. Çalışmada faz değiştirme malzemesi olarak parafin içeren bir güneş kurutma sistemi tasarlanarak kurutma verimliliği araştırılmıştır. Kurutulan çamur kalınlığının düşük olması sebebiyle kurutma sırasında karıştırmanın etkisi gözlenememiştir. Kurutma işlemi 8 saatte 1849 Wh/m² kümülatif güneş radyasyonu ile yapılmıştır. İç sıcaklık, nem, güneş radyasyonu, zaman, çamur kütlesi ve hacmini azaltmanın yanı sıra kurutucuda kullanılan ekipmanlar ısı transferini güçlendirmek için önemli faktörler olarak belirlenmiştir. Sistemde fan ile oluşturulan hava sirkülasyonunun yetersiz olduğu hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) ile tespit edilmiştir, ve simülasyon modeli kurutma sisteminin optimize edilmesi için kullanılmıştır. Gözenekli yapının oluşumu, bir tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak kurutulmuş çamurda gözlenmiştir. Atık boya çamurunun yönetiminde güneş kurutucusunun geliştirilmeler sonrası kullanılabilir bir alternatif olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Boya çamuru, Güneş Kurutma Sistemi, HAD

Drying of Paint Sludge Using Paraffin in Solar Drying Systems

ABSTRACT

Solar dryers are widely used as an advanced natural drying technology. The purpose of this study is to examine the solar drying as an alternative step in the process of waste paint sludge management. In the study, a solar drying system containing paraffin as phase change material was designed. The drying efficiency of sludge was investigated. Due to the lower sludge thickness, the effect of mixing during drying was not observed. Drying was conducted for 8 hours with 1849Wh/m² cumulative solar radiation. The indoor temperature, humidity, cumulative solar radiation, and time were determined as important parameters to be evaluated. Sludge mass and volume, equipment used in the dryer have been identified as other factors to strengthen heat transfer. It has been determined with the computational fluid dynamics (CFD) that the air circulation created by the fan is insufficient and simulation model was used to optimize the drying system. The formation of the porous structure was observed in dried sludge using a scanning electron microscope (SEM). It is concluded that the solar drying process is an alternative method that can be applied in the management of waste paint sludge if the solar dryer is developed.

Keywords: Paint Sludge, Solar Drying System, CFD

I. GİRİŞ

Kurutma işlemi; ürünlerden su veya diğer sıvıların buharlaştırılarak uzaklaştırılması olarak tanımlanabilir. Güneş ışığının yaygın kullanımlarından biri, atık çamuru susuzlaştırmak ve hacmini azaltmaktır[1]. Çamur arıtma ve bertaraf maliyeti, atıksu arıtma tesisleri için gereken bütçenin % 50'sinden fazlasını kapsamaktadır[2]. Dünya genelinde her yıl oluşum miktarı artan yüksek nem içeriğine sahip atık çamurun nakliyesi önemli bir sorundur. Otomotiv sanayiinde oluşumu engellenemeyen ve içeriğine bağlı olarak tehlikeli atık sınıfına da girebilen boya çamuru sağlık ve çevre için risk teşkil etmektedir. Çamur yönetiminde su içeriğinin giderimi yüksek enerji gerektirmektedir. Konvansiyonel sistemlerdeki enerji ihtiyacı sebebiyle seralar gibi güneş enerjisi kullanan sistemler önem kazanmıştır[3-7]. Dünya genelinde, yenilenebilir enerji tüketimi 2018'de 2017'deki tüketim seviyelerine kıyasla % 1,5 artmıştır[8]. Sera gazı emisyonlarının çözümlerinden biri yenilenebilir enerji kullanımınıdır ve bu nedenle birçok ülkede yenilenebilir enerji kullanımı yaygınlaşmaktadır[9-13]. Günümüzde, tasarlama ve test etmede mühendisliğe yardımcı olan birçok yazılım programı sebebiyle güneş kurutucularının tasarlanması daha kolay hale gelmiştir. Güneş kurutucusunun verimliliği içindeki akışın termal dağılımına ve homojenliğine bağlıdır, ayrıca doğal bir güneş kurutucuda ısı ve kütle transferinin dengeli olması önemlidir. Atık depolama alanını azaltmak için ekonomik çamur imha teknikleri ve enerji geri kazanım işlemleri önerilmektedir [14]. Çamur kurutma üç şekilde yapılmaktadır. Bunlar; konvektif, kondaktif ve güneşte kurutmadır [15]. Yapılan araştırmalara göre, çamurdaki su serbest su, geçiş suyu, yüzey suyu ve bağlı su olmak üzere dört kısımdan oluşmaktadır[16,17]. Serbest su, çamur parçacıklarına bağlı değildir ve bir güneş kurutucu ile kolayca buharlaştırılabilir. Sera kurutucusundaki buharlaşma oranı geleneksel kurutuculardan daha yüksektir ve daha az enerji tüketmektedir[18]. Güneş kurutma sistemlerinde kontrollü sıcaklık ve nem koşullarında, ürünlerin nem içeriğini makul miktara düşürmek mümkündür[19]. İyi bilinen kurutucular, tepsi kurutucu, tünel kurutucu, ve tambur kurutucusu olarak tanımlanmaktadır. Tepsi kurutucusu, basitliği ve daha düşük maliyetli yapısı nedeniyle çok kullanılmaktadır[20]. Güneş kurutucu sistemleri pasif kurutma yöntemlerine göre doğrudan, dolaylı ve karma olmak üzere üç farklı sınıfa ayrılmaktadır. Güneş kurutma sisteminin en önemli özelliği, tümüyle çevre dostu ve kirliliğe sebep olmayan yenilenebilir enerji ile çalıştığı gerçeğidir. Sera sistemleri, güneş radyasyonlarının kısa dalga boylarının geçmesini sağlayan şeffaf bir örtü ile kapalı yapılardır. Gıda kurutmada da kullanılan güneş kurutucusunun verimliliği, kurutulacak maddenin nem içeriğine ve kuruma süresine göre belirlenir[21]. Uygun olmayan bir güneş kurutucu aşırı sıcaklığa neden olabilir ve bu da gıda maddelerinin kalitesinde bozulmaya neden olur [22]. Çamur kurutmada ise bu konu öncelik arz etmemektedir. Güneş kurutucuları çalıştırılırken genel olarak içindeki nem azaltılır ve kurutma havası hızı artırılır. Seradaki nemli hava üründen bir fan veya üfleyici kullanılarak çıkarılır ve optimum hava akışı sağlanır[23]. Kurutmada hava hızının artmasıyla birlikte konvektif ısı transferinde bir artış olduğu gözlenmiştir[24]. Sistemdeki sıcaklığın değişmesi ile, artan türbülans ısı ve kütle transferine neden olmaktadır[25]. Güneş kurutucularda bir simülasyon veya sayısal yaklaşım kullanarak enerji ve sistemin çeşitli konumlarındaki sıcaklık ve hız profillerini değerlendirmek ve içeride daha yüksek sıcaklıkta düzgün bir hava akışı elde etmek mümkündür[26]. Boşaltılmış tüplü güneş kolektörleri, düşük termal kayıp katsayısı nedeniyle yüksek sıcaklıklarda daha iyi performans göstermektedir. Evsel ısıtma için, tüplü sistemlerle birçok çalışma yapılmıştır[27]. Enerji tüketimi özellikle yakıt fiyatları seviyesindeki sürekli artış ve sera gazı emisyonu yenilenebilir enerji kaynaklarının daha etkin kullanılmasına yol açmıştır[28, 29]. Bazı güneş kurutucu sistemlerinde farklı faz değiştirici maddeler (FDM) kullanılır. Bu maddeler, fazın katı-sıvı değişimi sırasında ısı transferini azaltan çok düşük termal iletkenliğe sahiptirler[30]. Termal depolama için faz değişim materyallerinin (FDM) kullanımı üzerine çok sayıda araştırma yapılmıştır[31,32]. Sabit sıcaklığı stabilize etme ve kurutma süresini azaltma üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Tasarlanan sistem bir karma-mod sera şeklinde güneş kurutucusu olarak inşa edilmiştir, ve kurutma hızı ve hava akışı homojenliği bakımından bazı avantajlara sahip olması istenmiştir. Güneş kurutucu ile ilgili araştırma ve geliştirme çalışmaları üzerinde önemli ilerlemeler kaydedilmiştir, ve geleceğe uygun geliştirilmektedir. Nemin uzaklaştırılmasına bağlı olarak ağırlık ve hacimde önemli bir azalma oluşur, ve aynı anda depolama ve nakliye maliyetlerini minimuma indirilir. Boya çamuru ortam koşulları altında doğal olarak bulunandan daha fazla ısı sağlayarak, buhar basıncı yeterince artırılmaktadır.

Kurutucu sisteminde termal enerji sistem malzemeleri tarafından dışarıdan içeriye ısı iletilir ve çamura ulaşmadan önce çevredeki tüm malzemeler ısıtılır, özellikle alüminyum ve bakırdan olan malzemeler ısı iletkenlik değerlerinin yüksek olması avantaj sağlamaktadır. Güneş kurutmanın optimize etmek için HAD simülasyon modeli kullanılmıştır ve düzgün hava sirkülasyonu sağlamak için sistemdeki fan sayısı belirlenmiştir. Bu sistemde kurutma işlemi, bağımsız parametreler olan ortalama sıcaklık, güneş radyasyonu, çamurun karıştırılmasına, yatağına ve kalınlığına bağlı olduğuna dikkate alınmalıdır. Karıştırma ve havalandırma faktörü kalın serilmiş çamurlar için buharlaşma oranını artırmaktadır. Küçük ölçekli güneş kurutma sistemi Türkiye'de/ Bursa Uludağ Üniversitesi kampüsünde inşa edilmiştir. Bu sistem, çamurun kurutma gereksinimlerini karşılamak ve optimum performans sağlamak için uygun şekilde tasarlanmıştır. Bir simülasyon model kullanarak, güneş enerjisi ile kurutma sistemin performansı değerlendirilmiştir. Güneş kurutucusu maksimum güneş enerjisini emerek depolayıp ve sistemin iç sıcaklığını artırarak en düzgün hava akışı elde etmiştir, aynı zamanda sistemin verimliliğini artırılarak uygun kurutma şartları oluşturulmuştur.

II. DENEYSEL METOT

A. MALZEMELER VE HAZIRLAMA TEKNİKLERİ I

A. 1. Boya Çamuru I

Boya çamuru, otomotiv fabrikalarının tehlikeli atıklarından biridir ve 080113 atık kod numarası ile tanımlanmaktadır. II. sınıf düzenli depolama alanları tarafından kabul edilmez. Atık boya çamuru, püskürtülen boya ile su karışımının çökmesiyle oluşmaktadır. Boya parçalarını sudan ayırarak, su geri dönüştürülebilir ve boya parçaları boya çamuru olarak bertaraf edilebilir. Tablo 1.'de gösterildiği gibi boya çamurunun büyük bir kısmı organik polimerlerden ve çözücülerden oluşmaktadır ve işlem görek tekrardan kullanılabilir. İncelenen boya çamuru örneği % 56 nem içeriğine sahiptir ve Bursa'da üretim yapan bir otomotiv firmasından temin edilmiştir. Boya çamuru yönetimi % 57,6 ile tehlikeli atık yönetiminin en yüksek çevresel maliyetlerini içermektedir[33].

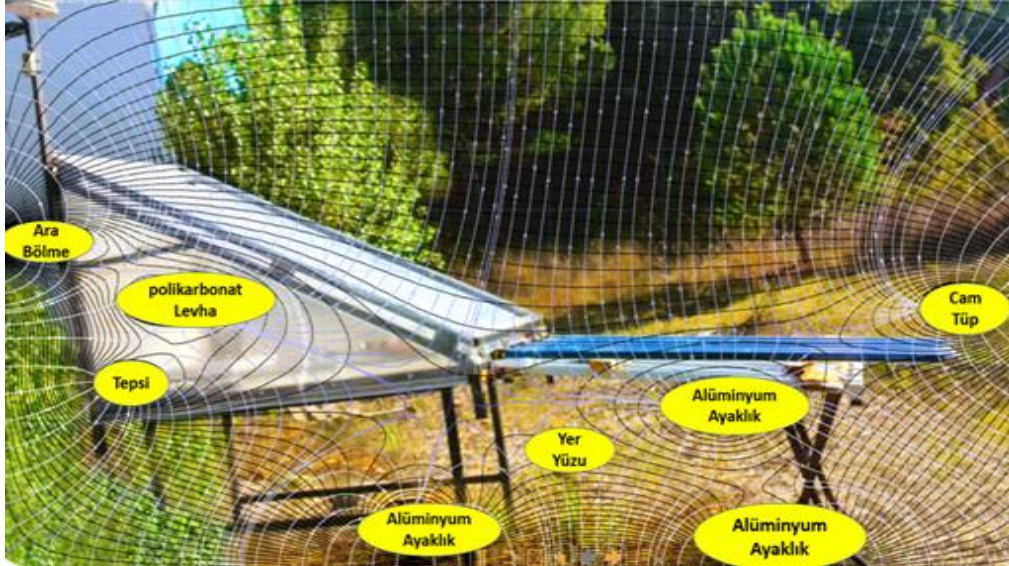
Tablo 1. Boya çamurun özellikleri

Boya çamur özellikleri	
Toplam Katı Madde (KM) %	44 %
Kurşun (Pb)	<0.05 (mg/L)
Çinko (Zn)	<0.1 (mg/L)
Arsenik (As)	<0.05 (mg/L)
Civa (Hg)	<0.001 (mg/L)
Selenyum (Se) (mg/kg DS.)	<0.01 (mg/L)
Nikel (Ni)	<0.05 (mg/L)
Sülfat (SO ₄)	2.52±0.38 (mg/L)
Çözünmüş organik	1430±28 (mg/L)

A. 2. Deneysel Çalışma II

Güneş kurutucusu, üçgen prizma biçiminde, homojen ısı akışı oluşturmak için ön yüzeyi ve iki yan duvarı şeffaf polikarbonat plaka ile kaplanarak imal edilmiştir. Sistem, doğrudan güneş radyasyonu ile oluşan ısı ve cam tüplerin içerisindeki FDM'nin ısınması sonrası sistemin içerisinde tutulan ısı ile çalışmaktadır. Sistemdeki vakum tüp kollektör 2 mm kalınlığında ve 1.80 m uzunluğunda borosilikattan yapılmış beş adet tüpten oluşmuştur. Isı transferinin artırılması amacıyla cam tüplerin içerisine 5 adet, 3 cm yarıçapında ve 2,5 m uzunluğunda bakır borular yerleştirilmiştir. Ayrıca her cam tüpün içerisine 650 gr parafin doldurulmuştur. Parafin-balmumu, güneş kurutucuda gizli ısı depolaması için uygun bir

malzeme olarak bulunmuştur. Parafin Balmumu ham olarak beyaz, katı, mumsu ve kokusuz, bir üründür ve 110F ila 150F arasında ısı vererek kolayca erir ve sıvı haline gelir ve rahat bir şekilde cam tüplerine doldurulur. Isı bakır borulardan parafine aktarılır. Bakır boruların ısınması, sistemin iç havasının ısınmasına neden olur. Güneş radyasyonu cam tüplerle toplanmakta, daha sonra ısı bakır borular ve parafin vasıtasıyla sisteme aktarılmaktadır. Bakır borular sistemin içerisine yaklaşık 70 cm girmiştir. Bakır boruların ısınması, sistemin iç havasının ısıtılmasına ve hava ısındıkça çamurun sıcaklığının buna bağlı olarak artmasına neden olmaktadır. Parafin, özellikle güneş ışığı olmadığı saatlerde ısıyı uzun süre depolamaktadır. Bu çalışmada: HOB0 veri kaydedici (RX2100, onset), Dijital Lazer IR Kızılötesi manuel sensör (WH320), FLIR E5 Kızılötesi termal kamera, CEM (DT 185) güneş veri kaydedici, ve Comet (S3120) dahil olmak üzere farklı noktalardaki sıcaklığı ölçmek için çeşitli sensör türleri kullanılmıştır, ve elde edilen veriler her 15 dakikada bir kaydedilmiştir. Sistemin içindeki hava sirkülasyonu için 120 m³/sa hava akışına sahip bir salyangoz fan (Vaillant VCK) kullanılmıştır. Ayrıca, iç ortam hava dolaşımı için 100 m³/sa debide fan (Mutlusan 100) sisteme ilave edilmiştir. Atmosfere ısı kaybını azaltmak için poliüretan yalıtım malzemesi ile sistemin arka ve alt duvarları kaplanmıştır. Çamur örnekleri 60cm x 40cm x 4 cm boyutlarında dikdörtgen bir alüminyum tepsi içinde, 0,5 cm kalınlığında serilmiştir. Kollektör yüzey ile 30° eğimde ön yüzeye sahip olarak güneye doğru monte edilmiş, Bursa için en verimli olduğu açıda konumlandırılmıştır. Çamur tepsisi sistem içindeki bir terazi üzerine yerleştirilerek, çamurun su kaybı her saatte bir ölçülmüştür. Şekil 1.'de tasarlanan güneş kurutucusunun görünüşü ve ısı akışı gösterilmiştir. Isı havadan ve sistemin malzemelerinden çamura geçmektedir. Bu çalışmada, her denemede farklı günlerde bir kilogram çamur kurutulmuştur. Tasarlanan güneş kurutucusunun yüksek radyasyon dönemlerindeki etkisi sayısal olarak da belirlenmiştir[34]. Kurutucuda kullanılan bütün iç ve dış malzemelerin ısı kaynağı olarak davrandığı, bu sebepten güneş kurutucusunun imalatında yüksek termal iletkenliği olan materyallerin daha fazla avantaj sağlayacağı saptanmıştır. Isı, yüksek sıcaklıkların bulunduğu yerlerden hava ve sistem malzemeleri yoluyla daha düşük sıcaklıkların bulunduğu yerlere aktarılmaktadır. Isı transferi, sıcaklık farklılıkları olduğu sürece devam etmektedir. Sistemde aynı sıcaklığa ulaştıktan sonra, termal denge oluşmakta ve ısı transferi durmaktadır. Ayrıca kurutucu daha geniş bir alana sahip olduğu ve ısı aktarım hızı sistemin yüzey alanı ile doğrudan orantılı olduğu için ısıyı daha iyi iletmektedir. Bu kurutucuda, kullanılan alüminyum ve bakırdan oluşan malzemeler ısı transfer sürecini iyileştirmek için avantaj sağlamıştır.



Şekil 1. Güneş kurutucusunun görünüşü ve ısı akışı

Yapılan farklı çalışmalarda ve benzer sistemlerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Başka bir çalışmada gıda ürünleri 20 saatte % 77.5'lik nem giderme verimliliğini elde edilmiştir[35]. Tasarlanan başka bir sistemde 30 kg Muz dilimleri nem içeriği 8 saatte % 82'den % 18'e inmiştir[36]. Yapılan bir çalışmada güneş kurutucusunun performansı, parafin kullanarak önemli ölçüde geliştirilmiştir ve kurutma sistemin

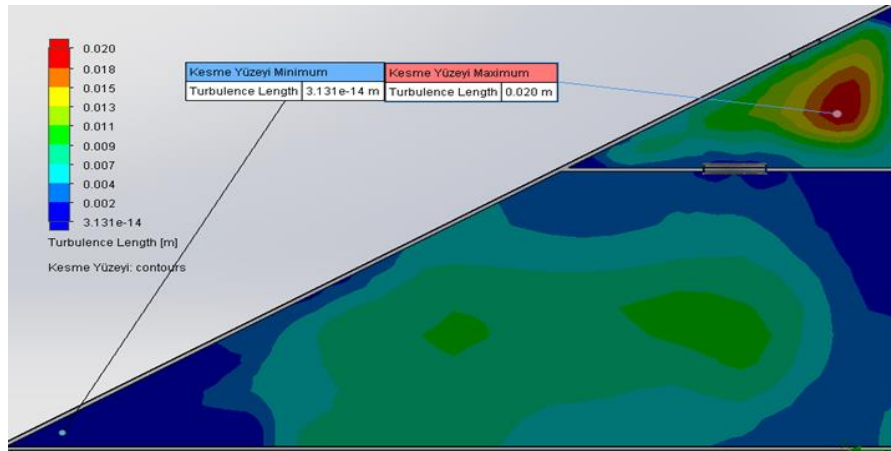
ısı 40–75°C yükselmiştir[37]. Benzer bir sistemde parafin kullanarak 1 kg üzümün kurutulması için ortalama ısı depolama verimi% 66 olarak belirlenmiştir ve% 87.9'den (wb)% 14'e (wb) kadar ortalama kurutma süresi 6 gün içinde sonlanmıştır [38].

III. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

A. HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ (HAD) ANALİZİ III

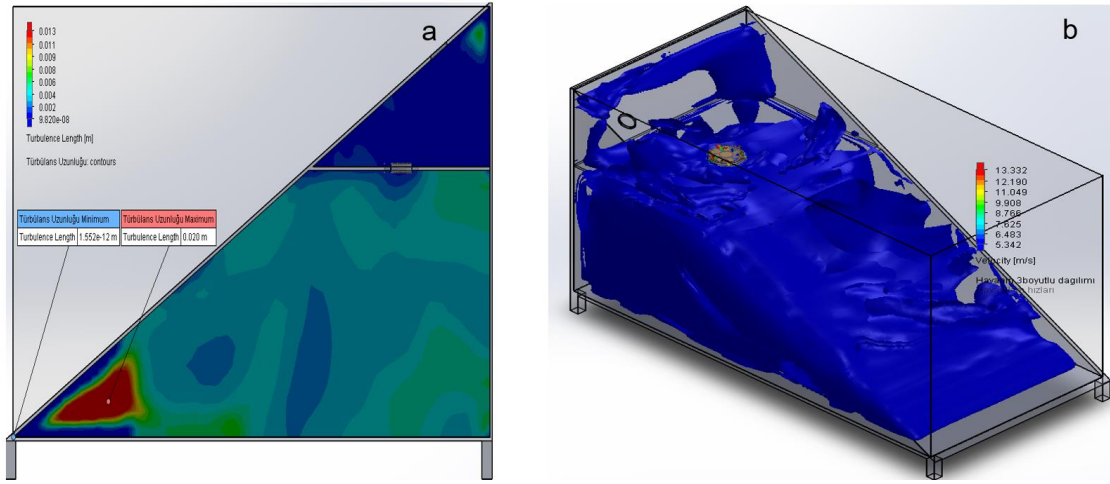
Sistemin hava sirkülasyonunu iyileştirmek amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizi uygulanmıştır. Seçilen türbülans modeli, modelin verilerine ve simülasyonun nasıl performans gösterdiklerine dayanmaktadır, ve akış ayrımını çözebildiğini gösterilmiştir, ve daha sağlam bir türbülans model elde etmek için sonuçlar iyileştirilebilir. Türbülans, kesilmiş akışlı bölgelerde, yani hız gradyanlarının yüksek olduğu bölgelerde üretilir.

Tasarımdaki problemler için çok kısıtlayıcı bir yöntemdir, aynı zamanda türbülanslı akışların viskoz yayılma mekanizmasının etkisi modellemede çalışılmıştır. Türbülans modellemesi araştırmalarda, çok aktif bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği disiplini. Bu sistemde türbülans seviyelerinin farklılıkları yoğunlaşan hava miktarından açıkça belirlenmiştir. Bu durumda, türbülans yoğunluğu, ortalama dalgalanan hız ile değerlendirilmiştir, ve akış çalışması görüntü analiz tekniğiyle belirlenmiştir. HAD analizi için AutoDesk CFD(20q9) modeli kullanılmıştır. Akım çizgileri, bütün akış alanı boyunca gösterilir ve genelde sıcaklık, hız dağılımı ve basınçtan oluşmaktadır. Sistemde, dışarıdaki havayı içeri aktarmak için pompa, havayı sirküle edilebilmesi için de aspiratör kullanılmıştır. Salyangoz fan debi değeri 120 m³/sa olup, devir sayısı 230 rad/s (RPM)'dir. Şekil 2'de tek fan kullanıldığında sistemde oluşan türbülans görülmektedir. En yüksek türbülansın ara bölmede olduğu görülmüştür. Tek salyangoz ile sistemde gerekli hava sirkülasyonunun sağlanamadığı belirlenmiştir.



Şekil 2. Güneş kurutucuda tek fan kullanarak hava sirkülasyonu

Sistemde oluşan en yüksek hava türbülans uzunluğu 0.020 m olarak belirlenmiştir. Sisteme bir fan daha eklenerek akış simülasyonu tekrarlanmıştır. İki fan ile sistem analizi, tek fanlı sisteme göre daha homojen bir hava sirkülasyonu oluşturmuştur. Sistemin hava sirkülasyonunun daha net görülebilmesi için şekil 3(a)' da iki boyutlu ve 3(b)' de üç boyutlu hava modeli gösterilmiştir.



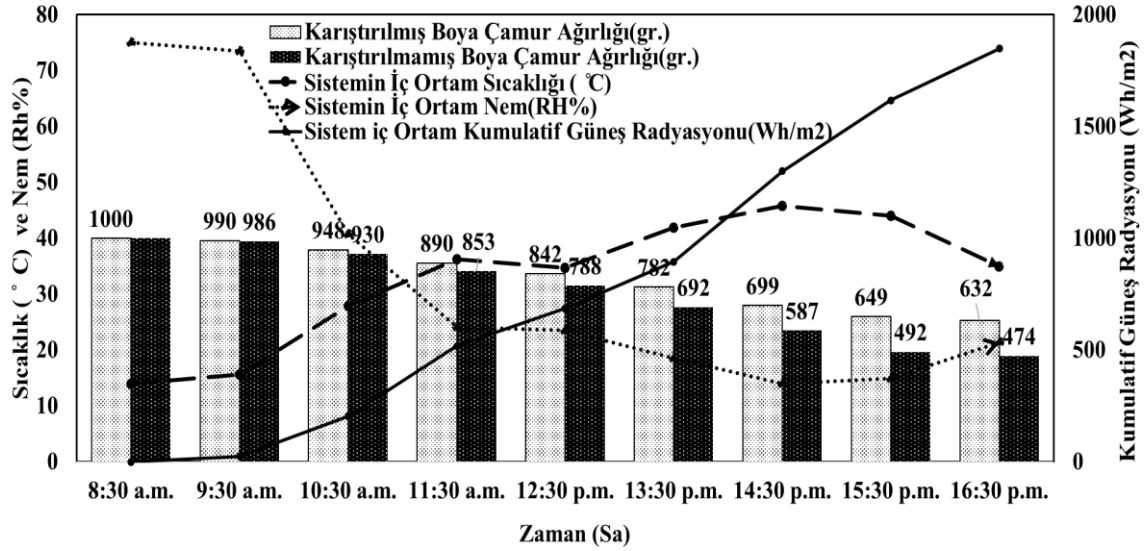
Şekil 3. Güneş kurutucuda çift fan kullanarak hava sirkülasyonu

Fan sayısını arttırarak bir çözüm üretilmiştir ancak üzerinde çalışılan sistem prototip boyutlarındadır. Gerçek boyutlarında solar kurutucu üretildiğinde fan sayısı çok daha fazla artacak ve bununla orantılı olarak enerji ihtiyacı da daha yükselecektir. Bu sebeplerden dolayı sistem geometrisinin değiştirilmesinin daha verimli olacağı düşünülmüştür. Havanın küçük bir kısmı ara bölmede fanın olduğu yerde yoğunlaştırulup sistemin iç kısmına yöneltilmiştir. Bu çalışmada fan sayısının yetersiz olduğu görülmüştür ancak kurutucunun performansını iyileştirmek için fan sayısının artırılması yerine sistemin tasarımının değiştirilmesinin uygun olacağı düşünülmüştür.

Sistemin verimliliğini iyileştirmek amacıyla ısı depolama için bakır boruların içerisinde faz değiştiren madde olarak parafin kullanılmıştır. Tüplerde kullanılan faz değiştiren madde güneşin olmadığı saatlerde kendi içinde haps edilen ısıyı uzun süre depolar. Bakır borularında parafin kullanıldığında, parafinin erime sıcaklığı olan 48°C'ler civarında ve daha uzun süre sıcaklığını muhafaza ettiği bulunmuştur. Burada bakır en iyi termal iletkenliğe sahiptir ve amacımız için en uygun malzeme olmaktadır. Yapılan çalışmada akış hareket noktalarının gösterilmesi incelemede büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Türkiye şartlarında son zamanlarda cam tüplerinden yapılan kollektörlerin daha verimli oldukları görülmüştür [39]. Kurutucunun yüzeyini genişletilerek de tasarım geliştirilebilir. Oluşan sıcak havayı gerekli olduğunda iletme de avantaj sağlayabilir.

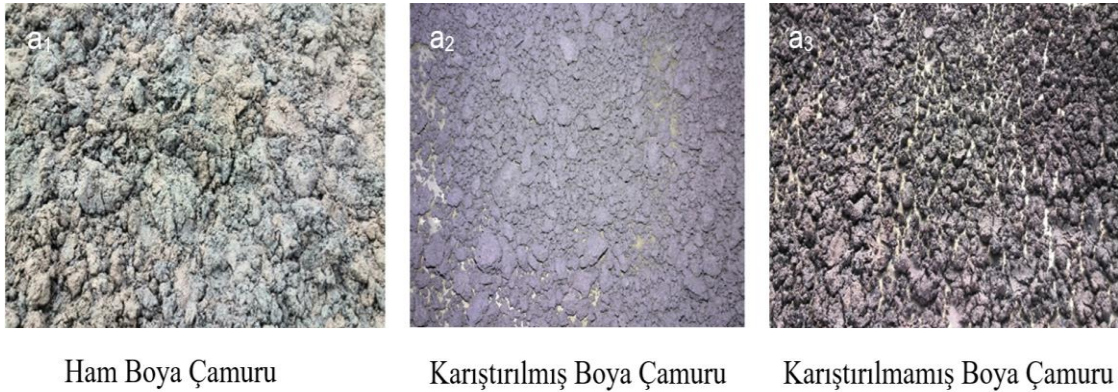
B. BOYA ÇAMURUNUN KURUTULMASINDAKİ FAKTÖRLER III

Bu araştırma, özellikle en kötü durum şartlarının belirlenebilmesi amacıyla kış mevsiminde, Kasım ayında güneşli saatlerin az olduğu zamanda gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, iki ayrı tepside aynı anda, boya çamuru serilmiş ve sisteme yerleştirilmiştir. Birinci tepside her bir saatte çamur karıştırılmış, ikinci tepsi karıştırılmadan kurutulmaya bırakılmıştır. Şekil 4'de görüleceği üzere, karıştırma işlemine tabi tutulmamış çamurdaki buharlaşma miktarı daha yüksek bulunmuştur. Her iki tepsideki çamurun kalınlığının 0,5 cm derinliğinde olması nedeniyle, çamurun tamamen tepsinin yüzeyi ile temas halinde olduğu ve ısının büyük kısmı kondaktif yöntemle tepside çamura aktarıldığı görülmüştür. Karıştırma işleminin çamur yüksekliği sebebiyle avantaj sağlamadığı belirlenmiştir. Çamuru karıştırma işlemi olmadan 1849 Wh/m² kümülatif güneş radyasyonu ile çamurun nem içeriğinin 8 saate %56'dan % 3,4'e düştüğü görülmüştür. Saat 14:30 p.m.de, sistemin iç sıcaklığı maksimum 46 °C'ye ulaşmış ve çamur nem oranı %14'e düşmüştür. Ayrıca karıştırma işlemine gerek kalmadan çamur sıcaklığının daha yüksek olduğunu açıkça belirlenmiştir. Çamur kurutma işleminde sıcaklık, nem, güneş radyasyonu ve zaman faktörlerinin önemli bir rol oynadıkları gözlenmiştir.



Şekil 4. Çamur kurutmada önemli faktörler

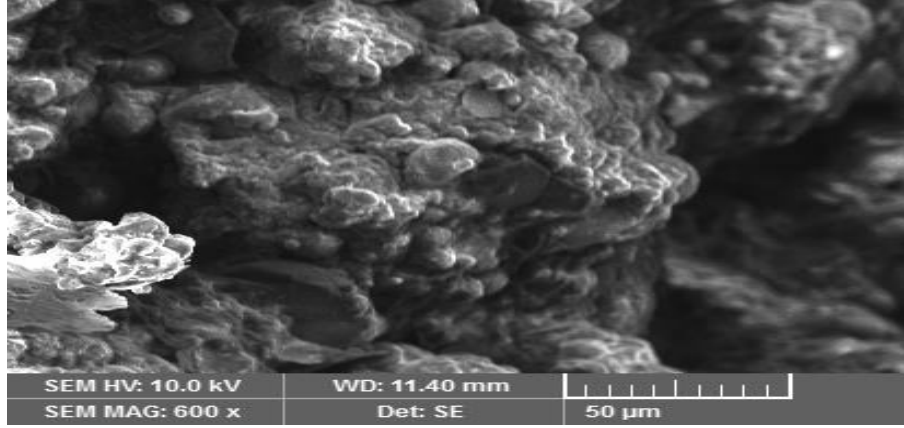
Şekil 5'te kurutma sonunda boya çamurunda morfolojik değişiklikler oluşmuştur. Şekil 5 a1' de %56 neme sahip olan ham çamur, Şekil 5 a2' de % 19 nem değerine inen karıştırılmış çamur ve Şekil 5 a3' de %3,4 neme sahip olan karıştırma işlemi uygulanmamış çamur resimleri gösterilmektedir. Boya çamurunun renginin nem kaybıyla ve kuruma yüzdesi arttığında açık griden koyu ve parlak gri rengе dönüştüğü görülmüştür. Şekil 5 a3' de daha fazla nem kaybı olduğu için çamurun rengi daha koyu görülmektedir.



Şekil 5. Karıştırılmış ve karıştırılmamış çamurun kuruduktan sonra fiziksel değişimi

C. SEM ANALİZİ III

SEM analiz yönteminde TESCAN VEGA3 SEM cihazı kullanılarak %7 nem içeriğine sahip boya çamuru net bir şekilde görüntülenmiştir. 600 kat büyütülmüş boya çamuru morfoloji görüntüsü taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi ile değerlendirilmiştir. SEM analizi mikro yapıda çamur partiküllerindeki farklılıkları ortaya çıkarmıştır. Kuruduktan sonra boya çamur örneğinde çok fazla gözenek oluştuğu belirlenmiştir. Şekil 6'da görebileceği üzere, bu gözeneklerin farklı boyutlarda ve çoğunlukla çamur parçacıklarının arasındaki iç suyun buharlaşmasından oluştuğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 6. Karıştırılmamış çamurun kuruduktan sonra fiziksel değişimi

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, FDM'li entegre güneş kurutucunun verimliliği araştırılmış ve boya çamurunun kütlesindeki suyun serbest kalması ve uzaklaştırılması için tasarlanan sistemin verimi incelenmiştir. Kurutma işlemi sırasında, kümülatif güneş radyasyonu en önemli faktör olarak belirlenmiştir ve 1849 Wh/m² boya çamuruna vererek nem içeriğinin %56'dan %3,4'e düştüğü görülmüştür. Kurutmada, sistemin iç ve dış kısmındaki tüm ekipmanların termal iletkenlik değerlerine göre kütle ve ısı transferi gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu nedenle güneş kurutucularının tasarımında kullanılan malzemelerin bu yönde dikkate alınarak seçilmesinin uygun olacağı belirlenmiştir. Ayrıca sistemin iç hava sirkülasyonunu iyi biçimde sağlamak amacıyla hesaplamalı akışkanlar dinamiği ile analiz edilmiştir. Sistemi iyileştirmek için çok sayıda alternatifin geliştirilebileceği belirlenmiştir. Bunlar; parafin yerine farklı FDM kullanarak daha fazla ısı depolanması, tek fan yerine çift fan kullanarak daha iyi hava sirkülasyonunun sağlanması, tüplerin sayısını artırarak yüzey alanı genişletilmesi ve yansıtıcı yüzey kullanarak sisteme daha fazla ısı aktarılması şeklinde sıralanabilir. Çamurun nemi uzaklaştıktan sonra çamur yüzeyinde gözenekler SEM analizi ile belirlenmiştir. Çamur gözeneklerinin yapısının incelenmesi konusunda yeterince literatür çalışmasının olmaması nedeniyle çalışmanın ilerleyen aşamalarında bu konuda farklı çalışmaların yapılabileceği düşünülmüştür. Sonuç olarak atık boya çamurlarının güneş kurutucuda kurutulması konusunda gerçekleştirilen öncü çalışmalardan biri olarak, bu konuda tasarlanan sistemin geliştirilmesinin endüstriyel atık yönetimi konusunda yeni bir başlıkta çalışmaların yoğunlaşmasının mümkün olduğu görülmüştür.

V. KAYNAKLAR

- [1] D. M. Parikh. (2014, April 1). *Solids Drying: Basics and Applications* [Online]. Available: <https://www.chemengonline.com>
- [2] A. Murray, A. Horvath, K.L. Nelson, "Hybrid life-cycle environmental and cost inventory of sewage sludge treatment and end-use scenarios: A case study from China," *Environmental Science and Technology*, c. 42, s. 9, ss. 3163–3169, 2008.
- [3] A. J. Perea-Moreno, A. Juaidi, F. Manzano-Agugliaro, "Solar greenhouse dryer system for wood chips improvement as biofuel," *Journal of Cleaner Production*, c. 135, ss. 1233–1241, 2016.
- [4] A. Fernández-García, E. Rojas, M. Pérez, R. Silva, Q. Hernández-Escobedo, F. Manzano-Agugliaro, "A parabolic-trough collector for cleaner industrial process heat," *Journal of Cleaner Production*, c. 89, ss. 272–285, 2015.

- [5] F. Rovense, "A case of study of a concentrating solar power plant with unfired Joule-Brayton cycle," *Energy Procedia*, c. 82, ss. 978–985, 2015.
- [6] X. Tong, Z. Sun, N. Sigrimis, T. Li, "Energy sustainability performance of a sliding cover solar greenhouse: Solar energy capture aspects," *Biosystems Engineering*, c. 176, ss. 88–102, 2018.
- [7] B. Nastasi, U. Di Matteo, "Solar Energy Technologies in Sustainable Energy Action Plans of Italian Big Cities," *Energy Procedia*, c. 101, ss. 1064–1071, 2016.
- [8] *IEA International Energy Agency, World energy balances - Database documentation, Iea*, ss. 793, 2019.
- [9] S. Dharma, H.H. Masjuki, H.C. Ong, A.H. Sebayang, A.S. Silitonga, F. Kusumo, T.M.I. Mahlia, "Optimization of biodiesel production process for mixed *Jatropha curcas*-*Ceiba pentandra* biodiesel using response surface methodology," *Energy Conversion and Management*, c. 115, ss. 178–190, 2016.
- [10] A. S. Silitonga, H. H. Masjuki, H. C. Ong, A. H. Sebayang, S. Dharma, F. Kusumo, J. Siswanto, J. Milano, K. Daud, T. M. I. Mahlia, W. H. Chen, B. Sugiyanto, "Evaluation of the engine performance and exhaust emissions of biodiesel-bioethanol-diesel blends using kernel-based extreme learning machine," *Energy*, c. 159, ss. 1075–1087, 2018.
- [11] M. N. Uddin, K. Techato, J. Taweekun, M. M. Rahman, M.G. Rasul, T. M. I. Mahlia, S.M. Shrafur, "An overview of recent developments in biomass pyrolysis technologies," *Energy*, c. 11, ss. 1–24, 2018.
- [12] A. S. Silitonga, A.E. Atabani, T.M.I. Mahlia, H.H. Masjuki, I.A. Badruddin, S. Mekhilef, "A review on prospect of *Jatropha curcas* for biodiesel in Indonesia," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 15, s. 8, ss. 3733–3756, 2011.
- [13] H.C. Ong, H.H. Masjuki, T.M.I. Mahlia, A.S. Silitonga, W.T. Chong, K.Y. Leong, "Optimization of biodiesel production and engine performance from high free fatty acid *Calophyllum inophyllum* oil in CI diesel engine," *Energy Conversion and Management*, c. 81, ss. 30–40, 2014.
- [14] European Council, "Directive 1999/30/EC of 22 April 1999 relating to limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air C directive," *Official Journal of the European Commission*, c. 163, ss. 41–60, 1999.
- [15] L.E.I. Daud, I.N. Simate, "Drying Kinetics of Sliced Pineapples in a Solar Conduction Dryer," *Energy and Environment Research*, c. 7, s. 2, ss. 14–26, 2017.
- [16] J. Vaxelaire, P. Cézac, "Moisture distribution in activated sludges: A review," *Water Research*, c. 38, s. 9, ss. 2214–2229, 2004.
- [17] J. Kopp, N. Dichtl, "Influence of the free water content on the dewater ability of sewage sludges," *Water Science Technology*, c. 44, s. 2, ss. 177–180, 2001.
- [18] M. Bux, R. Baumann, S. Quad, J. Pinnekamp, W. Mühlbauer, "Volume reduction and biological stabilization of sludge in small sewage plants by solar drying," *Drying Technology*, c. 20, s. 4-5, ss. 829–837, 2002.
- [19] V.K. Sharma, A. Colangelo, G. Spagna, "Experimental investigation of different solar dryers suitable for fruit and vegetable drying," *Renewable Energy*, c. 6, s. 4, ss. 413–424, 1995.

- [20] A. Bakhshipour, A. Jafari, A. Zomorodian, "Vision based features in moisture content measurement during raisin production," *World Applied Sciences Journal*, c. 17, s. 7, ss. 860–869, 2012.
- [21] Z. Chen, M.T. Afzal, A.A. Salema, "Microwave Drying of Wastewater Sewage Sludge," *Journal of Clean Energy Technologies*, c. 2, s. 3, ss. 282–286, 2014.
- [22] F.K. Forson, M.A.A. Nazha, H. Rajakaruna, "Modelling and experimental studies on a mixed-mode natural convection solar crop-dryer," *Solar Energy*, c. 81, s. 3, ss. 346–357, 2007.
- [23] P. Singh Chauhan, A. Kumar, P. Tekasakul, "Applications of software in solar drying systems: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 51, ss. 1326–1337, 2015.
- [24] E. K. Akpınar, "Experimental Investigation of Convective Heat Transfer Coefficient of Various Agricultural Products Under Open Sun Drying," *International Journal of Green Energy*, c. 1, s. 4, ss. 429–440, 2005.
- [25] K.N. Çerçi, M. Daş, "Modeling of heat transfer coefficient in solar greenhouse type drying systems," *Sustainability*, c. 11, s. 18, ss. 1–16, 2019.
- [26] S. Misha, A. Alqadhi, M.A.M. Rosli, A.A. Yusof, "Experimental investigation on indirect, natural and forced convection mixed mode solar dryer," *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, c. 18, s. 2, ss. 87–96, 2018.
- [27] J.T. Kim, H.T. Ahn, H. Han, H.T. Kim, W. Chun, "The performance simulation of all-glass vacuum tubes with coaxial fluid conduit," *International Communications in Heat and Mass Transfer*, c. 34, s. 5, ss. 587–597, 2007.
- [28] R.S. Norhasyima, T.M.I. Mahlia, "Advances in CO₂ utilization technology: A patent landscape review," *Journal of CO₂ Utilization*, c. 26, ss. 323–335, 2018.
- [29] M.S. Ismail, M. Moghavvemi, T.M.I. Mahlia, "Characterization of PV panel and global optimization of its model parameters using genetic algorithm," *Energy Conversion and Management*, c. 73, ss. 10–25, 2013.
- [30] Y. Jin, Q. Wan, Y. Ding, "PCMs heat transfer performance enhancement with expanded graphite and its thermal stability," *Procedia Engineering*, c. 102, ss. 1877–1884, 2015.
- [31] S.S. Rokade, M.M. Wagh, J.S. Bagi, "A review of solar air dryers based on phase change materials as thermal storage," *Energy Safety and Energy Economy*, c. 5, ss. 42–44, 2018.
- [32] A. Agarwal, R.M. Sarviya, "Characterization of Commercial Grade Paraffin wax as Latent Heat Storage material for Solar dryers," *Materials Today: Proceedings*, c. 4, s. 2, ss. 779–789, 2017.
- [33] G. Salihoglu, N.K. Salihoglu, "A review on paint sludge from automotive industries: Generation, characteristics and management," *Journal of Environmental Management*, c. 169, ss. 223–235, 2016.
- [34] G. Osvaldo, "Solar Sludge Drying Technology and Dried Sludge as Renewable Energy Closing the Loop," *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, c. 4, s. 4, ss. 221–229, 2016.
- [35] A. O. Adelaja, B. I. Babatope, "Analysis and Testing of a Natural Convection Solar Dryer for the Tropics," *Journal of Energy*, c. 2013, s. 4, ss. 1–8, 2013.

- [36] B.M.A. Amer, M.A. Hossain, K. Gottschalk, "Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana," *Energy Conversion and Management*, c. 51, ss. 813–820, 2010.
- [37] M.Lalit Bal, S. SantoshSatya, S. N. Naik, M. Venkatesh, "Review of solar dryers with latent heat storage systems for agricultural products," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, c. 15, ss. 876- 880, 2011.
- [38] M. Song, Y. Songlin, Z. Biguang, Z. Dong, "Experimental Research of Grape Drying Using Solar Dryer with Latent Heat Storage System," *International Conference on Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM)*, 2011, ss. 740–742.
- [39] TMMOB Makina Muhendisleri Odasi, *Enerji Ekipmanları Yerli Üretimi Durum Değerlendirmesi ve Öneriler*, MMO/621, 2014.