

Elektrosprey Soğutmada Aseton-Su Karışımlarının Deneysel Olarak İncelenmesi

Fatin SÖNMEZ^{1*}, Ahmet ÖZTÜRK²

^{1,2} Artvin Çoruh Üniversitesi, Artvin Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 08010, Artvin

¹<https://orcid.org/0000-0002-9630-1232>

²<https://orcid.org/0000-0002-5560-0578>

*Sorumlu yazar: fatinsonmez@artvin.edu.tr

Araştırma Makalesi

Makale Tarihiçesi:

Geliş tarihi: 24.09.2025

Kabul tarihi: 30.12.2025

Online Yayınlanma: 16.03.2026

Anahtar Kelimeler:

Elektrosprey soğutma

Aseton-su karışımları

Isı transferi

Isı akısı

ÖZ

Bu çalışmada, elektrosprey (ES) soğutma yönteminde çalışma akışkanı olarak aseton-su karışımlarının performansı deneysel olarak incelenmiştir. Literatürde ES soğutmada yaygın olarak etanol esaslı çözeltiler tercih edilmekte olup, bu çalışmada ilk defa aseton-su karışımları kullanılarak özgün bir yaklaşım ortaya konulmuştur. Deneyler, 12 kV sabit voltaj, 55 mm nozul-ısı alıcı mesafesi, farklı debiler (10, 30, 50, 70 ve 90 ml/h) ve ısı akıları (2,72, 3,23, 3,69, 4,26 ve 4,91 kW/m²) altında gerçekleştirilmiştir. Karışım oranı olarak %25 aseton-%75 su ve %50 aseton-%50 su çözeltileri kullanılmıştır. Sonuçlar, spray debisi ve karışım oranının ısı transfer performansı üzerinde belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Düşük debilerde püskürtmenin yüzey alanına yeteri kadar nüfus edememesi nedeniyle sıcaklık farkı (ΔT) yüksek çıkarken, artan debilerle birlikte yüzey alanını kaplama etkinliği artmış ve daha düşük ΔT değerleri elde edilmiştir. %50 aseton içeren karışım, düşük yüzey gerilimi ve yüksek buharlaşma eğilimi sayesinde daha yüksek ısı transfer katsayısı (h) sağlamıştır. Elde edilen bulgular, ES soğutmada aseton-su karışımlarının kullanılabilirliğini ortaya koymakta ve yüksek ısı akılarında mikroelektronik cihazlar, güç elektroniği ve fotovoltaiik (PV) paneller gibi uygulamalarda termal yönetimi için potansiyel bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Experimental Investigation of Acetone-Water Mixtures in Electrospray Cooling

Research Article

Article History:

Received: 24.09.2025

Accepted: 30.12.2025

Published online: 16.03.2026

Keywords:

Electrospray cooling

Acetone-water mixtures

Heat transfer

Heat flux

ABSTRACT

In this study, the performance of acetone-water mixtures as working fluids in the electrospray (ES) cooling method was experimentally investigated. While ethanol-based solutions are commonly preferred in the literature for electrospray cooling, this work introduces a novel approach by employing acetone-water mixtures for the first time. The experiments were conducted under a constant voltage of 12 kV, a nozzle to heat sink distance of 55 mm, various flow rates (10, 30, 50, 70, and 90 ml/h), and heat fluxes (2.72, 3.23, 3.69, 4.26, and 4.91 kW/m²). Two different mixture ratios were tested: 25% acetone-75% water and 50% acetone-50% water solutions. The results indicate that both spray flow rate and mixture ratio play a decisive role in heat transfer performance. At low flow rates, the insufficient surface coverage of the spray led to higher temperature differences (ΔT), whereas with increasing flow rates, the surface coverage efficiency improved, resulting in lower ΔT values. The 50% acetone mixture exhibited a higher heat transfer coefficient (h) due to its lower surface tension and higher volatility. The findings demonstrate the applicability of acetone-water mixtures in ES cooling and suggest that they offer a potential solution for thermal management in

applications such as microelectronic devices, power electronics, and photovoltaic (PV) panels under high heat flux conditions.

To Cite: Sönmez F., Öztürk A. Elektrosprey Soğutmada Aseton-Su Karışımlarının Deneysel Olarak İncelenmesi. Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 2026; 9(2): 1012-1024.

1.Giriş

Elektronik cihazlarda artan güç ihtiyacı, termal yönetimi kritik bir mühendislik problemi haline getirmiştir. Yüksek ısı akılarının uzaklaştırılmasına yönelik çözümler arasında spreyci soğutma, geleneksel yöntemlere kıyasla sunduğu üstün avantajlar nedeniyle öne çıkmaktadır. Daha düşük soğutucu akışkan gereksinimi, daha yüksek ısı giderme kapasitesi ve daha homojen yüzey sıcaklık dağılımı sağlaması, bu yöntemi cazip kılan başlıca özelliklerdir (Liang ve Mudawar, 2017). Oluşturulan spreyci damlacıklar hava ile etkileşim sürecinde parçalanarak ısıtılmış yüzey üzerinde ince bir sıvı film tabakası oluşturmaktadır (Wan ve ark., 2023). Söz konusu film tabakası içerisinde çekirdek kaynamasının gerçekleşmesiyle birlikte ısı transfer performansı önemli ölçüde artmaktadır (Liu ve ark., 2025). Geleneksel spreyci soğutma, püskürtülen damlacıkların geri sıçraması ve yüksek güç gereksinimleri nedeniyle düşük verimliliğe sahiptir. ES soğutma yöntemi ise damlacıkları elektriksel olarak yükleyerek daha etkili bir soğutma sağlarken, yüzeye yapışmalarını ve geriye sıçramalarını önlemektedir (Kabakuş ve ark., 2021). Bu nedenle, ES soğutma yöntemi spreyci soğutmanın dezavantajlarını en aza indirme potansiyeline sahiptir.

ES, yüksek güç gereksinimine sahip cihazların soğutulması için etkili bir yaklaşımdır ve düzgün damlacık çapı, damlacık geri sıçramalarının bastırılması, düşük güç tüketimi, damlacık boyutu üzerinde hassas kontrol, düşük sıvı kullanımı ve düzgün yüzey kaplaması gibi önemli avantajlar sunar (Shao ve ark., 2024; Yakut, 2024; Ranjan ve ark., 2025).

Literatürde ES soğutmada soğutucu akışkan olarak etanol kullanımı çok yaygındır. Bu çalışmalardan bazıları aşağıdaki gibi özetlenmiştir. Wan ve ark. (2023) çalışmalarında, etanol ve etilen glikol kullanılarak dört modda ES soğutmayı incelemişlerdir. Koni-jet ve çoklu-jet modları, mikro-damlacık moduna göre sırasıyla %32 ve %74 daha yüksek ısı akısı sağlamışlardır. Çoklu-jet en geniş kaynama bölgesini oluşturmuşlardır. Etilen glikol, düşük sıcaklıklar dışında etanolden daha iyi performans göstermiştir. 3,7 kV ve 110 °C üzerinde koni-jet ile çoklu-jet arasında kararsız geçişler gözlenmiştir. Tian ve ark. (2023) çalışmalarında, etanol–R141b karışımı kullanılarak ES soğutma performansını deneysel olarak incelemişlerdir. Etanol ilavesi, damlacık boyutunu küçültüp püskürtme açısını artırarak atomizasyonu iyileştirmiş, ancak yüzeyde büyük film oluşumuna neden olduğunu ortaya koymuşlardır. Etanol oranı arttıkça ısı transfer katsayısı önce yükselmiş, sonra düşmüş veya sabit kaldığını belirtmişlerdir. En iyi soğutma performansını %20–50 etanol oranlarında elde etmişlerdir. Türetilen Nusselt korelasyonu, verilerin %97,7'sini $\pm$ %15 hata ile açıklamış ve debi artışının voltajdan daha etkili olduğu sonucunu ortaya koymuşlardır.

Kabakuş ve ark. (2024a), yaptıkları çalışmada, PV panelin soğutulmasında ES soğutma yöntemini kullanmışlardır. Su bazlı soğutma deneylerinde, 80 ml/h optimum debide 1200 W/m² ısınım altında

panel sıcaklığı 77 °C'den 32,2 °C'ye düşmüş ve çıkış gücünün %56,6 arttığını belirlemişlerdir. Ayrıca, spreyci soğutmaya kıyasla ES soğutmada 1,5–137 kat daha az su tükettiğini göstermişlerdir.

Kabakuş ve ark. (2024b), yaptıkları çalışmada PV panelin ES yöntemiyle soğutma performansını incelemişlerdir. Deneyler 1000 W/m² ışıma, 25G nozul çapı, 70 mm nozul-panel mesafesi ve 20 kV gerilim altında yürütülmüş; su, etanol ve %50 su – %50 etanol karışımı 50–80–110 ml/h debilerde püskürtülmüştür. Bulgular, panel sıcaklığı arttıkça elektriksel güç çıkışının azaldığını göstermiştir. Etanol-su karışımı, özellikle 80 ve 110 ml/h debilerde suya kıyasla daha iyi soğutma sağlamıştır. En yüksek debide etanol, panel sıcaklığını %59 düşürmüş ve elektriksel güç çıkışını %6,8 arttırdığı sonucunu ortaya koymuşlardır.

Taheri ve ark. (2024) yaptıkları çalışmada, su–etanol karışımlarının ES soğutma performansını incelemişlerdir. Deneyler, farklı debi (20–100 ml/h), voltaj (5,3–12,15 kV) ve akışkan karışımları (%65 etanol-%35 su, %30 etanol-%70 su) altında yürütülmüştür. Sonuçlar, debi ve su oranı arttıkça kritik ısı akısında belirgin artışlar olduğunu göstermiştir. Özellikle %70 su içeren karışımın, damlacık geri sekmesini bastırarak ve termal özellikleri iyileştirerek en yüksek soğutma performansını sağladığını göstermişlerdir.

Tian ve ark. (2024) yaptıkları çalışmada, mikro boyutlu ve yüksek güçlü elektroniklerin ısı alıcılarında etanol bazlı ES ile ısı transferi etkilerini incelemişlerdir. Isı alıcısı olarak kübik pim kanatçık, konik pim kanatçık, dalgalı ve düz kanatlı yüzeyler ile düz yüzeyler karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, elektrik alan ve kanatçık modelinin kritik ısı akısı (CHF) ve ısı transfer katsayısını artırdığını göstermiştir. Kübik pim kanatçık yüzeyinde 4,5 kV altında 7,93 W/cm² CHF elde edilmiş ve düz yüzeye göre %63 artış sağlanmıştır. Yüzey alan oranı (f) arttıkça CHF önce yükselmiş sonra azalmış, en yüksek performans f=0,79 değerinde görülmüştür.

Yao ve ark. (2024) çalışmalarında, sıcak bir yüzey üzerindeki küçük sıvı damlacıklarının elektrik alan altındayken buharlaşma sürecini sayısal olarak incelemişlerdir. Bunun için elektrohidrokinamik etkiler içeren bir model kullanarak damlacığın yüzeyle yaptığı temas açısının değişimi ile sıvı–katı arasındaki eşzamanlı ısı iletimini hesaplamışlardır. Sonuçlar, elektrik alanın damlacık şeklini (uzama veya düzleşme) değiştirdiğini ve Peclet sayısına (Pe) bağlı olarak buharlaşmayı ya yavaşlattığını (ısı iletiminin baskın olduğu Pe<1 durumunda) ya da hızlandırdığını (elektriksel taşınımın baskın olduğu Pe>2 durumunda) göstermektedir.

Kim ve ark. (2024) çalışmalarında nozul, halka elektrot ve alt tabaka olmak üzere 12 farklı ekipman yapısı yapılandırılmış ve uygulanan püskürtme modları, uygulanan voltaj, kaplama alanı, kaplama akımı, püskürtme hızı ve endüstriyel proseslerde kullanılan faktörler gibi ES atomizasyon özelliklerine ilişkin veriler doğrulanmıştır.

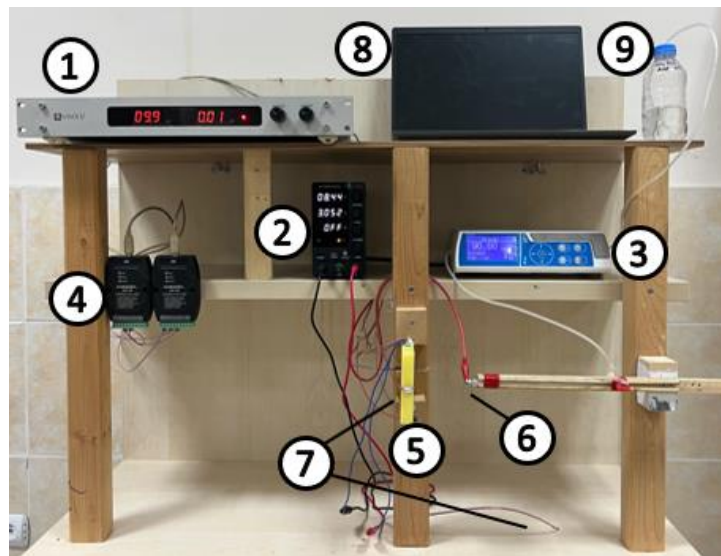
Yakut (2025) çalışmasında yüzey yanıt yöntemi ile optimize edilmiş bir nozulun kafes kanatlı ve plakalı ısı emiciler kullanarak soğutma performansını belirlemiştir. Çalışma sonucunda, kafes ısı emicinin plakalı ısı emiciye kıyasla soğutma performansında maksimum %20'lik bir iyileştirme sağlanmış ve koni jet modunda damlama moduna kıyasla maksimum %83'lük bir iyileştirme elde etmiştir.

Bu çalışmanın temel amacı, çalışma sıvısı olarak aseton–su karışımlarını kullanarak yüksek ısı akısına sahip sistemlerde ES soğutmanın performansını deneysel olarak incelemektir. Literatür özetinde de görüldüğü üzere ES soğutmada soğutucu akışkan olarak çoğunlukla etanol kullanılmıştır. Bu çalışmayı özgün kılan durum ise literatürde daha önce rastlanılmayan aseton–su karışımlarının ES soğutmada kullanılan ilk çalışma olmasıdır. Bu çalışmada temel hipotez, suya belirli oranlarda ilave edilen asetonun, ES soğutma performansını iyileştireceğidir. Asetonun suya göre daha düşük yüzey gerilimine ve daha yüksek buhar basıncına sahip olması, daha ince damlacıkların oluşmasını ve koni–jet modunun daha kararlı bir şekilde sürdürülmesini sağlayarak ısı alıcı yüzey üzerinde hem taşınım ile hem de buharlaşma ile ısı transferini artırması beklenmektedir. Öte yandan, asetonun su ile karışım halinde kullanılması, suyun yüksek gizli buharlaşma ısı ve özgül ısı sayesinde toplam soğutma kapasitesinin korunmasına imkân vermektedir. Bu kapsamda 55 mm sabit nozul–ısı alıcı mesafesi ve 12 kV voltaj değerlerinde, farklı akış debilerinde (10, 30, 50, 70 ve 90 ml/h) ve hacimsel karışım oranlarında (%25 aseton–%75 su ve %50 aseton–%50 su) soğutma kapasiteleri belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, ES soğutmanın etkinliğinin hem kullanılan sıvının yüzey gerilimi, buhar basıncı ve gizli buharlaşma ısı gibi termofiziksel özelliklerine hem de sprey debisine doğrudan bağlı olduğunu göstermiş. Uygun aseton–su karışım oranlarının, aynı ısı akısı altında ısı alıcı yüzey sıcaklığını saf suya veya saf asetona kıyasla daha fazla düşürerek sistemin toplam ısı performansını artırabileceğini ortaya koymuştur.

2. Materyal ve Metot

2.1. Deneysel Kurulum

Bu çalışmada ES soğutma yönteminin farklı aseton-su karışım oranları, debiler ve ısı akıları altındaki performansı deneysel olarak incelenip karşılaştırılmıştır. Belirlenen parametreler koni-jet oluşumunu sağlayan durumlar için seçilmiştir. Yapılan deneysel çalışma laboratuvar ortamında yapılmış olup deney düzeneği Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Deney düzeneğinin görünümü (1-Yüksek Gerilim Güç Kaynağı, 2-DC Güç Kaynağı, 3-İnfüzyon Pompası, 4-Datalogger, 5-Isı Alıcısı, 6-Nozul, 7-Termokupllar, 8-Bilgisayar, 9-Rezervuar)

Akışkanı atomize edebilmek için yüksek gerilim güç kaynağı (Nanoliz NL–K25) kullanılmıştır. Deneysel çalışma 12 kV sabit gerilimde yapılmıştır. Yüklü sprey damlacıkları topraklanmış olan ısı alıcıya doğru hareket ederek yüklerini boşaltır ve ısı alıcı yüzeyinde soğuma meydana getirir. Çalışılacak gerilimde koni jet modu elde edebilmek için, nozul çapı, ısı alıcı-nozul arası mesafe ve akışkan debisi parametreleri bu gerilime göre belirlenmiştir. DC güç kaynağı (Smartgift SPS–C3010), silikon ısıtıcıya istenilen voltaj ve akımın sağlanması için kullanılmıştır. Bu cihazdan voltaj, akım ve güç değerleri okunmuştur. Silikon ısıtıcı, 50x50x2 mm boyutlarında, yanmaz malzemeden imal edilmiş olup DC akım ile beslenen rezistanslardır. Isı alıcısına istenilen ısı akısının sağlanabilmesi için kullanılmıştır. Isı alıcısı ile silikon ısıtıcının arasına termal direnci önlemek için termal macun sürülmüştür.

Isı alıcısı düz plakalı 6063 serisi alüminyumdan yapılmış, tüm yüzeyleri parlatılmış ve temizlenmiş olup 50x50x5 mm boyutlarındadır. Isı alıcısı ve ortam sıcaklığının ölçülebilmesi için T–tipi termokupllar kullanılmıştır. Termokupllar (T1, T2, T3 ve T4) akışı bozabilme, ısı transferini etkileyebilme ve hatalı okuma yapabilme ihtimallerinden ötürü ısı alıcı yüzeyine değil, ısı alıcının yan yüzeylerine açılan farklı mesafelerdeki (5, 10, 15, 20 mm) deliklere termal macun sürülerek yerleştirilmiştir. Belirlenen derinlikler ısı alıcıda homojen sıcaklık ölçümü alınacak şekilde tasarlanmıştır. Çevresel yüzeylerden kaynaklanan ısı kayıplarını azaltmak amacıyla ısı alıcı, bir PTFE bloğu içerisine yerleştirilmiştir. Böylece ısı alıcının yalnızca ön yüzeyi çevre havasına açık bırakılmıştır. Isı alıcıya bağlı termokupllardan okunan sıcaklık değerlerinin ortalaması alınarak ısı alıcı yüzey sıcaklığı belirlenmiştir. Deneylerdeki sıcaklık verileri Ordell UDL100 marka datalogger aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır.

Deney sisteminde sabit debide akışkanı gönderebilmek için Hedy 15 marka infüzyon pompası kullanılmıştır. Çalışmada yüksek gerilimi aktararak akışkanın atomize olabildiğini sağlamak amacıyla 25G çapında çelik nozul kullanılmıştır. Isı alıcısı zemine dik şekilde yerleştirilmiş olup nozul arasındaki mesafe 55 mm olarak ayarlanmıştır. DC güç kaynağı ile silikon ısıtıcılara sırasıyla 2,72, 3,23, 3,69, 4,26 ve 4,91 kW/m² değerlerinde ısı akısı uygulanmıştır.

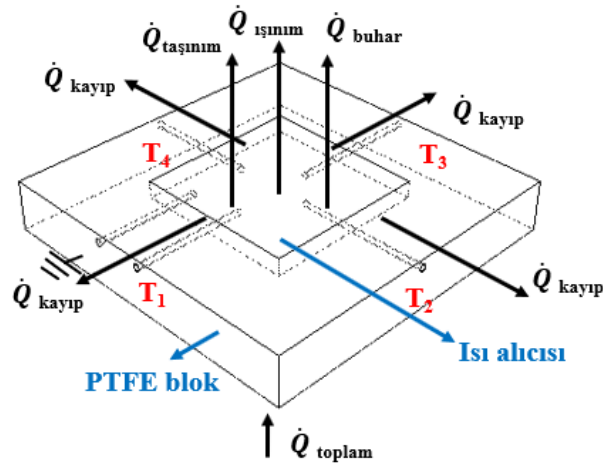
Çalışmada kullanılan %25 aseton–%75 su ve %50 aseton–%50 su hacimsel karışımlarının deneysel koşullarda (25 °C oda sıcaklığında) sahip olduğu termofiziksel özellikler, referans sıcaklıkta ilgili karışım oranlarına göre hesaplanmıştır. Aseton–su karışımlarının yoğunluk, viskozite, yüzey gerilimi ve diğer termofiziksel özelliklerinin yüksek hassasiyetle belirlenmesi amacıyla NIST-REFPROP10 (Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database) yazılımı kullanılarak Tablo 1’de verilmiştir. Bu yazılım, saf bileşenler ve karışımları için geniş sıcaklık ve basınç aralıklarında deneysel verilerle doğrulanmış, Helmholtz serbest enerjisi denklemi gibi yüksek hassasiyetli ampirik modeller kullanır. Karışım oranları hacimsel olarak verilmiş olsa da NIST-REFPROP10 hesaplamalarında akışkanların termodinamik tutarlılığı için kütle oran esas alınmıştır. Bu çözeltiler, infüzyon pompası aracılığıyla 10, 30, 50, 70 ve 90 ml/h debilerde sisteme gönderilmiştir. Farklı karışım oranlarında hazırlanan akışkanlar farklı debi ve ısı akısı koşullarında tekrarlanmış, elde edilen sonuçlar ES soğutma performansını karşılaştırmak için kullanılmıştır.

Tablo 1. Akışkanların termofiziksel özellikleri

Termofiziksel Özellikler	Aseton	Su	%25 Aseton-%75 Su	%50 Aseton-%50 Su
Yoğunluk (kg/m ³)	784	1000	943,7	890,5
Isıl İletkenlik (W/mK)	0,16	0,606	0,490	0,355
Özgül Isı Kapasitesi (kJ/kgK)	2,14	4,18	3,67	3,18
Yüzey Gerilimi (mN/m)	24	71,9	38,5	29,8
Gizli Isı (kJ/kg)	525	2442	2058	1561
Viskozite (mPas)	0,32	0,89	0,75	0,6
Kaynama Noktası (°C)	56,1	100	89	78

2.2. Hesaplamalar

Isı alıcısı üzerinde temel olarak taşınım ve ısınım ile ısı geçişi gerçekleşmektedir. Isıtılan yüzeyde gerçekleşen ısı transfer mekanizması ısınım ile ısı transferi ($\dot{Q}_{ışınım}$), taşınım ile ısı transferi ($\dot{Q}_{taşınım}$) ve buharlaşma ile ısı transferi ($\dot{Q}_{buhar}$) olarak ifade edilmiştir (Şekil 2). Bunun yanı sıra test bölgesinde gerçekleşen ısı kayıplarını da ($\dot{Q}_{kayıp}$) göz önüne alındığında, silikon ısıtıcıdan ısı alıcı yüzeyine geçen toplam ısı miktarı ($\dot{Q}_{toplam}$) şu şekilde ifade edilmiştir (Eşitlik 1);

**Şekil 2.** Isı alıcıda gerçekleşen ısı transfer mekanizmaları

$$\dot{Q}_{toplam} = \dot{Q}_{taşınım} + \dot{Q}_{ışınım} + \dot{Q}_{buhar} + \dot{Q}_{kayıp} \quad (1)$$

Isı alıcının düşük yüzey sıcaklıklarında (yaklaşık 110 °C) çalışılması gelen ısınımın, toplam enerjinin yaklaşık %0,5'inden daha az olduğu hesaplanmıştır. Ayrıca yapılan hesaplama sonucu test bölgesinde gerçekleşen toplam ısı kaybı, toplam ısı transferi miktarının %2,5'inden düşük olarak hesaplanmıştır. Dolayısı ile ısınımla gerçekleşen ısı transferi miktarı ve sistemde gerçekleşen ısı kaybı miktarları ihmal edilebilir boyutlardadır. Bu durumda sistemden gerçekleşen toplam ısı transferi miktarı (Eşitlik 2);

$$\dot{Q}_{toplam} = \dot{Q}_{taşınım} + \dot{Q}_{buhar} \quad (2)$$

Toplam ısı transferi DC güç kaynağı cihazından okunan voltaj ve akım değerlerinin çarpımıdır (Eşitlik 3).

$$\dot{Q}_{toplam} = V \times I \quad (3)$$

Burada V voltaj, I akımı ifade eder. Toplam ısı akısı eşiklik (4) ile ifade edilip, $A_{yüzey}$ ısı alıcısı yüzey alanını ifade etmektedir.

$$q'' = \frac{\dot{Q}_{toplam}}{A_{yüzey}} \quad (4)$$

Ortalama ısı taşınım katsayısı (h_{ort}) denklemi eşitlik (5) ile ifade edilmiş olup $T_{yüzey}$ ısı alıcı yüzeyin ortalama sıcaklığını, T_{∞} ise ortam sıcaklığını ifade etmektedir.

$$h_{ort} = \frac{q''}{T_{yüzey} - T_{\infty}} = \frac{q''}{\Delta T} \quad (5)$$

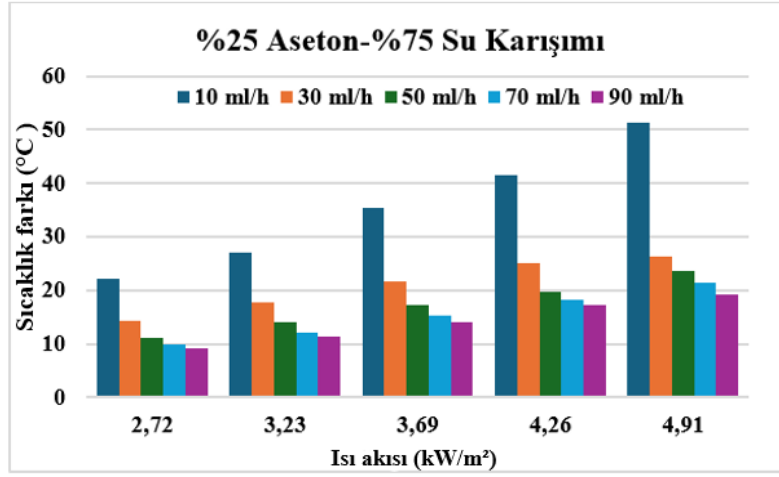
DeneySEL sonuçların güvenilirliği, ölçüm hataları, kalibrasyon, çevresel koşullar ve ekipman hassasiyetinden etkilenmektedir (Aslett, 2022). Belirsizlik analizi deney sisteminin güvenilirliği hakkında bilgi vermekte olup en yüksek sapmaya sebep olan parametreyi ortaya koymaktadır (Zhou ve ark., 2022; Grenyer ve ark., 2023). Bu nedenle, çalışmada eşitlik (6) kullanılarak ısı taşınım katsayısı için belirsizlik %0,97 olarak hesaplanmıştır.

$$w_R = \left[\left(\frac{\partial R}{\partial x_1} w_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial R}{\partial x_2} w_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial R}{\partial x_n} w_n \right)^2 \right]^{0,5} \quad (6)$$

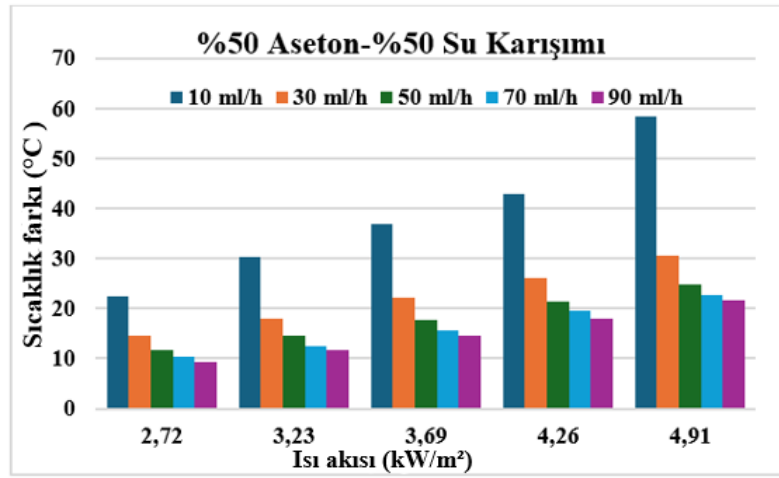
Eşitlikte w_R sistem belirsizliğini, ($x_1, x_2, \dots, x_n$) bağımsız değişkenleri, R bağımsız değişkenlerin fonksiyonu, ($w_1, w_2, \dots, w_n$) bağımsız değişkenlerin belirsizliği, ifade etmektedir (Holman, 2012). Deney düzeneğinde kullanılan cihazlara ilişkin hassasiyet ve belirsizlik değerleri şu şekildedir: Yüksek gerilim güç kaynağının hassasiyeti $\pm 0,01$ olup gerilim ölçüm belirsizliği ± 5 mV'dir. Kullanılan infüzyon pompasının hassasiyeti ± 2 , belirsizliği ise $\pm 0,2$ ml'dir. Sıcaklık ölçümlerinde kullanılan veri toplama cihazının hassasiyeti $\pm 0,2$, belirsizliği ± 1 °C olarak verilmiştir. Deneylerde kullanılan DC güç kaynağının gerilim ölçüm hassasiyeti $\pm 0,05$ ve gerilim belirsizliği ± 1 mV, akım ölçüm hassasiyeti $\pm 0,1$ ve akım belirsizliği ise ± 10 mA'dır.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu çalışmada, asetonun farklı ısı akılarında (2,72, 3,23, 3,69, 4,26 ve 4,91 kW/m²), akış hızlarında (10, 30, 50, 70 ve 90 ml/h) ve alkol konsantrasyonlarında (%25 ve %50) soğutma performansı incelenmiştir.



Şekil 3. %25 aseton-%75 su karışım oranında $\Delta T-q''$ değişimleri



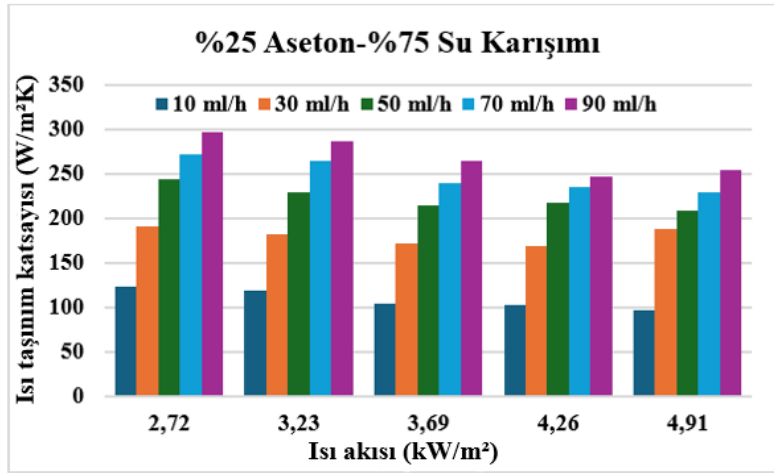
Şekil 4. %50 aseton-%50 su karışım oranında $\Delta T-q''$ değişimleri

Şekil 3 ve 4'te verilen grafiklerde, ES soğutma yöntemiyle %25 aseton-%75 su ve %50 aseton-%50 su karışımlarının farklı debilerde ısı alıcı plaka üzerindeki $\Delta T-q''$ değişimleri değerlendirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlar hem ΔT hem de h açısından karışım oranının ve spray debisinin belirleyici rol oynadığını göstermektedir. Öncelikle ΔT incelendiğinde, düşük debilerde (özellikle 10 ml/h) tüm ısı akılarında ΔT değerlerinin belirgin şekilde yüksek olduğu görülmektedir. Bu durum, düşük debilerde yüzey alanına yeterince nüfus edememesi, damlacık çarpma sıklığının sınırlı kalması ve dolayısıyla lokal kuru bölgelerin oluşmasıyla açıklanabilir. Literatürde de benzer şekilde, düşük debili ES uygulamalarında sınırlı damlacık etkileşiminin yüzey sıcaklığını artırdığı görülmüştür (Kim ve ark., 2020). Debinin artmasıyla damlacık sıklığı artmış ve yüzeyin daha homojen bir şekilde kaplanması sağlanmış; bunun doğal bir sonucu olarak da buharlaşma performansı iyileşmiştir (Tian ve ark., 2023). %25 aseton-%75 su karışımında 4,91 kW/m²'lik ısı akısı için ΔT değeri 10 ml/h debisinde 50 °C seviyesindeyken, 90 ml/h debisinde 20 °C'nin altına düşmüştür. Bu sonuç, artan debinin yüzey alanını kaplama kapasitesini güçlendirerek ısı transferini iyileştirdiğini göstermektedir.

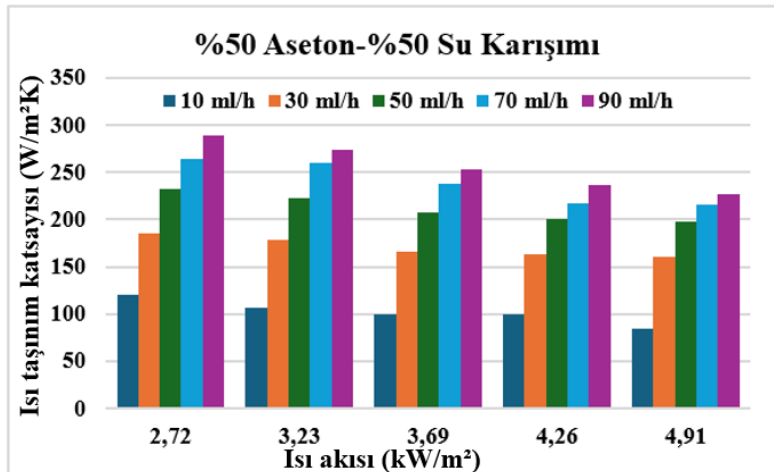
Karışım oranı da ΔT üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. %50 aseton-%50 su karışımı kullanıldığında, aynı ısı akısı ve debilerde ΔT değerlerinin genel olarak daha düşük olduğu gözlenmiştir. Bu farklılık, asetonun düşük yüzey gerilimi ve yüksek buharlaşma eğilimi sayesinde damlacıkların yüzeyde daha

hızlı yayılması ve buharlaşmasının kolaylaşması ile açıklanabilir. Nitekim literatürde de (Liu ve ark., 2018; Kim ve ark., 2020), düşük yüzey gerilimli çözeltilerin yüzey kaplama ve buharlaşma kabiliyetlerinin daha yüksek olduğu, dolayısıyla sıcaklık farklarını azaltarak soğutma etkinliğini artırdığı belirtilmektedir.

Şekil 5 ve 6’da verilen grafiklerde, ES soğutma yöntemiyle %25 aseton-%75 su ve %50 aseton-%50 su karışımlarının farklı debilerde ısı alıcı plaka üzerindeki $h-q''$ değişimleri değerlendirilmiştir. h incelendiğinde, her iki karışım için de artan debinin h değerlerinde belirgin bir artışa neden olduğu görülmektedir. Özellikle düşük ısı akılarında (2,72 ve 3,23 kW/m^2) bu artış daha keskin olup, spre yayınlığının yüzey alanını kaplama etkinliğini doğrudan güçlendirdiğini göstermektedir. %25 aseton-%75 su karışımında maksimum h değeri yaklaşık 280 $\text{W/m}^2\text{K}$ seviyesine ulaşırken, %50 aseton-%50 su karışımında bu değer 300 $\text{W/m}^2\text{K}$ ’nin üzerine çıkmıştır. Bu bulgu, aseton oranının artmasının ısı transfer performansını belirgin şekilde iyileştirdiğini göstermektedir. Literatürde de (Liu ve ark., 2018; Kabakuş ve ark., 2024a), suya organik çözücü ilavesinin yüzey gerilimini düşürdüğü, damlacık yayılımını artırdığı ve dolayısıyla konvektif ısı transferini güçlendirdiği belirtilmiştir. Çalışmamızın sonuçları da bu eğilimi doğrulamaktadır.



Şekil 5. %25 aseton-%75 su karışım oranında $h-q''$ değişimleri



Şekil 6. %50 aseton-%50 su karışım oranında $h-q''$ değişimleri

Elde edilen sonuçlar, aseton–su karışımlarının soğutma performansının yalnızca debi ve ısı akısı gibi parametrelere değil, aynı zamanda karışımın termofiziksel özelliklerinden yüzey gerilim etkisine güçlü şekilde bağlı olduğunu göstermektedir. Asetonun suya eklenmesi, karışımın yüzey gerilimini önemli ölçüde düşürür. Böylece küçülen damlacıklar, hem toplam yüzey alanını artırarak buharlaşma hızını artırır hem de ısı alıcısı yüzeyine daha iyi bir yayılım ve kaplama sağlar. Bu durum, ES soğutmada verimliliği düşüren kuru bölgelerin oluşumunu engelleyerek ısı alıcı yüzeyindeki ΔT 'yi azaltır ve h değerini yükseltir. Karışımın viskozitesi saf su viskozitesinden daha düşük seviyede kalmaktadır. Bu düşük viskozite, sıvı filmin yüzeyde daha hızlı yayılmasına ve akışkanın nozuldan püskürtülmesi sırasında atomizasyonun kolaylaşmasına yardımcı olarak, yüzey gerilimindeki azalmayla birleşerek soğutma performansını güçlü bir şekilde destekleyen ana mekanizmayı oluşturmuştur. Aseton konsantrasyonunun artması, soğutma performansının temelini oluşturan gizli buharlaşma ısısını ve ısı iletkenliği önemli ölçüde azaltır. %50 aseton karışımında gizli ısı değeri saf su gizli ısı değerinin neredeyse %36 altındadır. Bu durum, her bir damlacığın buharlaşma yoluyla taşıyabileceği ısı miktarını ciddi şekilde sınırlamaktadır. Ayrıca, düşük ısı iletkenlik değeri, ısı alıcı yüzey üzerindeki sıvı film tabakası içindeki ısı transfer direncini artırarak tek fazlı konveksiyon katkısını düşürür. Dolayısıyla, elde edilen sonuçlar, ES soğutmada optimal bir karışım oranının bulunduğunu göstermektedir. Bu oran, düşük yüzey geriliminin sağladığı damlacık küçülme ve yayılma avantajı ile düşük gizli ısı ve ısı iletkenliğin getirdiği termal kısıtlamaların dengelendiği noktada konumlanmıştır. Bu bulgular, ES ile soğutma yöntemin yüksek ısı akılarında dahi yüzey sıcaklığını sınırlayarak ısı alıcı plakaların güvenli çalışmasına imkân sağladığını ve literatürde elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğunu ortaya koymaktadır (Liu ve ark., 2018; Taheri ve ark., 2024). Elde edilen deneysel veriler ES soğutmanın özellikle yüksek ısı akılarında mikroelektronik soğutma ve yoğun ısı yüklerin söz konusu olduğu termal yönetim uygulamalarında umut verici bir yöntem olduğunu göstermektedir. Optimum performans için hem sprej debisinin hem de sıvı karışım oranının dikkatle seçilmesi gerektiği anlaşılmaktadır.

4. Sonuçlar

Bu çalışmada elektrosprej soğutmada aseton–su karışımlarının kullanılabilirliği deneysel olarak araştırılmış ve aşağıdaki temel sonuçlara ulaşılmıştır:

- Sprej debisi, ısı transfer performansı üzerinde belirleyici bir rol oynamıştır. Düşük debilerde (özellikle 10 ml/h), püskürtmenin ısı alıcı yüzey alanına yetersiz nüfuz etmesi ve lokal kuru bölgelerin oluşması nedeniyle ΔT değerleri önemli ölçüde yüksek çıkmıştır. Debi artışı ile yüzey kaplama etkinliği güçlenmiş ve bu durum, daha düşük ΔT ve dolayısıyla daha iyi soğutma performansı sağlamıştır.
- Karışım oranının artırılması, ES soğutma etkinliğini belirgin şekilde iyileştirmiştir. %50 aseton–%50 su karışımı, asetonun düşük yüzey gerilimi ve yüksek buharlaşma eğilimi gibi avantajlı termofiziksel özellikleri sayesinde, %25 aseton karışımına göre daha düşük ΔT ve daha yüksek ortalama ısı transfer katsayısı değerleri sağlamıştır.

- En yüksek ısı transfer etkinliği, %50 aseton–%50 su karışımı ve 90 ml/h debi koşullarında elde edilmiştir. Bu karışım oranında elde edilen maksimum h değerleri $300 \text{ W/m}^2\text{K}$ 'nin üzerine çıkmış, bu sonuç literatürdeki saf suya kıyasla aseton–su karışımlarının ES soğutmada yüksek performans gösterdiğini ortaya koymuştur.
- Elde edilen bulgular, ES soğutma yönteminin aseton–su karışımları kullanılarak yüksek ısı akılarında dahi ısı alıcı yüzey sıcaklığını etkili bir şekilde sınırlandırabildiğini göstermiştir. Bu durum, yöntemin mikroelektronik cihazlar, güç elektroniği ve PV paneller gibi yoğun ısı yüküne sahip uygulamaların güvenli ve verimli termal yönetimi için umut verici ve potansiyel bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın sonuçları temel alınarak, aseton–su karışımlarının ES soğutmadaki potansiyelini daha da artırmak amacıyla, gelecekteki çalışmaların odaklanması gereken temel noktalar bulunmaktadır. Öncelikle, mevcut deneysel kapsamın genişletilmesi hedeflenmelidir. Bu kapsamda %50 aseton üzerindeki konsantrasyonlar dahil olmak üzere daha geniş karışım aralıklarında ve 90 ml/h üzeri daha yüksek debilerde CHF sınırları deneysel olarak incelenmelidir. İkinci olarak, karışım oranının koni-jet oluşumu ve kararlılığı üzerindeki etkileşimi, yüksek hızlı görüntüleme teknikleri kullanılarak derinlemesine analiz edilmeli ve optimum çalışma modu netleştirilmelidir. Ayrıca, sprey debisinin ve karışım oranının ısı transfer katsayısı üzerindeki çoklu etkileşimleri, farklı optimizasyon teknikleriyle incelenerek en iyi termal performansı sağlayan parametre kombinasyonu belirlenmelidir. Son olarak, elde edilen bu bulgular, gerçek bir mikroelektronik cihaz veya PV panel üzerinde uzun süreli testlerle doğrulanarak yöntemin endüstriyel ölçekte uygulanabilirliği değerlendirilmelidir.

Simge ve Semboller Listesi

$\dot{Q}$	Toplam ısı transferi, (kW)
q''	Isı akısı, (kW/m^2)
h	Ortalama ısı transfer katsayısı, ($\text{W/m}^2\text{K}$)
A	Isı alıcı yüzey alanı, (m^2)
T	Sıcaklık, ($^{\circ}\text{C}$)
T_{∞}	Ortam sıcaklığı, ($^{\circ}\text{C}$)
ΔT	Sıcaklık farkı, ($^{\circ}\text{C}$)

Çıkar Çatışması Beyanı

Makale yazarları herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder.

Araştırmacıların Katkı Oranı Beyan Özeti

Yazarlar makaleye eşit oranda katkı sağlamış olduklarını beyan ederler.

Yapay Zekâ Katkı Beyanı

Bu çalışmada dil düzenlemeleri ve metinsel iyileştirmeler yapay zeka destekli bir araç (ChatGPT) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ancak, metin, veri analizi, şekiller ve tüm bilimsel içerik yalnızca yazarlar tarafından oluşturulmuş ve bilimsel sorumluluğu yazarlar tarafından üstlenilmiştir.

Kaynakça

- Aslett LJM. Sampling from complex probability distributions: A monte carlo primer for engineers. In: Aslett LJM., Coolen FPA., De Bock J. (ed) Uncertainty in engineering introduction to methods and applications. Switzerland: Springer 2022; 15-35.
- Grenyer A., Erkoyuncu JA., Addepalli S., Zhao Y. Compound uncertainty quantification and aggregation for reliability assessment in industrial maintenance. *Machines* 2023; 11(5): 560.
- Holman JP. *Experimental Methods for Engineers*. 8th ed. NY: McGraw Hill; 2012.
- Kabakuş A., Öztürk A., Sönmez F. A new approach to cooling photovoltaic panels: Electrospray cooling. *Case Studies in Thermal Engineering* 2024a; (64): 105545.
- Kabakuş A., Sönmez F., Öztürk A. Thermal analysis of photovoltaic panel cooled by electrospray using different fluids. *Düzce University Journal of Science & Technology* 2024b; 12(4): 2271–2282.
- Kabakuş A., Yakut K., Özakin AN., Yakut R. Experimental determination of cooling performance on heat sinks with cone-jet electrospray mode. *Engineering Science and Technology, an International Journal* 2021; 24(3): 665–670.
- Kim JY., Lee, SJ., Lee MH., Kim JY., Hong JG. Effects of structural variation in electrospray systems on spray characteristics. *Soft Matter* 2024; 20(34): 6791–6799.
- Kim Y., Jung S., Kim S., Choi ST., Kim M., Lee H. Heat transfer performance of water-based electrospray cooling. *International Communications in Heat and Mass Transfer* 2020; (118): 104861.
- Liang G., Mudawar I. Review of spray cooling – Part 1: Single-phase and nucleate boiling regimes, and critical heat flux. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2017; 115(Part A): 1174–1205.
- Liu H., Cai C., Yin H., Luo J., Jia M., Gao J. Experimental investigation on heat transfer of spray cooling with the mixture of ethanol and water. *International Journal of Thermal Sciences* 2018; 133(1): 62–68.
- Liu YQ., Wan H., Song QL., Li WQ. On the influences of ambient pressure and temperature on electrospray cooling. *Applied Thermal Engineering* 2025; (278): 127285.
- Ranjan A., Kumar R., Panigrahi PK. A high performance aqueous surfactant solution for enhanced electrospray cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2025; (251): 127410.
- Shao Y., Wang J., Wang H., Zhou X., Xie Z., Zhu X., Ding Y., Chen R., Liao Q. Characterization of dynamics and heat transfer in electro-spray at elevated flow rates. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2024; (226): 125473.
- Taheri V., Ebrahimi Rahnema H., Morad MR. High flow rate electrospray cooling performance of

- water–ethanol mixtures. *Applied Thermal Engineering* 2024; (239): 122200.
- Tian J., He C., Chen Y., Wang Z., Zuo Z., Wang J., Chen B., Xiong J. Experimental study on combined heat transfer enhancement due to macro-structured surface and electric field during electrospray cooling. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 2024; (220): 125015.
- Tian J., Kong L., Li B., Chen Y., Wang Z., Wang J., Chen B., Xiong J. Experimental investigation on heat transfer performance during electrospray cooling with ethanol–R141b mixture. *Applied Thermal Engineering* 2023; (230): 120879.
- Wan H., Liu P.J., He G.Q., Xue Z.R., Qin F., Li W.Q. Experimental and numerical studies on the spray cooling of deionized water in non-boiling regime. *Case Studies in Thermal Engineering* 2023; (44): 102834.
- Yakut R. Response surface methodology-based multi-nozzle optimization for electrospray cooling. *Applied Thermal Engineering* 2024; (236): 121914.
- Yakut R. Determining the cooling performance of the optimized nozzle electrospray cooling system with uniquely designed lattice heat sink. *International Journal of Thermal Sciences* 2025; (215): 109972.
- Yao J., Wang J., Dong Q., Xu H., Zhang W., Zuo L., Liu R. Investigation of electrohydrodynamic effects on sessile droplet evaporation using the lattice Boltzmann method. *Appl. Therm. Eng.* 2024; (236): 121739.
- Zhou S., Zhang J., Zhang Q., Huang Y., Wen M. Uncertainty theory-based structural reliability analysis and design optimization under epistemic uncertainty. *Applied Sciences* 2022; 12(6): 2846.