



BİR ELEKTROSPREY ENJEKTÖRÜN DENEYSEL İNCELEMESİ

Mahmut Can KARAKAYA¹, Ragıp ABDULLAHOĞLU², Onur TUNÇER^{3*}, Hüseyin KIZIL⁴ ve
Levent TRABZON⁵

¹İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Maslak, İstanbul, karakayama@itu.edu.tr

²İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya ve Metalurji Fakültesi, Maslak, İstanbul, mragipabdullahoglu@gmail.com

³İstanbul Teknik Üniversitesi Uçak ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Maslak, İstanbul, tuncero@itu.edu.tr

⁴İstanbul Teknik Üniversitesi Kimya ve Metalurji Fakültesi, Maslak, İstanbul, kizilh@itu.edu.tr

⁵İstanbul Teknik Üniversitesi Makina Fakültesi, Gümüşsuyu, İstanbul, levent.trabzon@itu.edu.tr

(Geliş Tarihi: 09.08.2012 Kabul Tarihi: 06.12.2012)

Özet: Mikro elektromekanik sistemler (MEMS) teknolojisi sayesinde birçok cihaz, mikro, hatta nano boyutlarda üretilmektedir. Bu cihazların gereksinimleri de kendi boyutları doğrultusunda olmaktadır. Örneğin, bir nano uydunun yörünge kontrolü için gereken itki miktarının mili Newton mertebesinde olması ya da ufak bir yanma sisteminin çalışabilmesi için gereken yakıt damlacığının mikron mertebesinde olması, eski yöntemlerin bir kenara bırakılması gerekliliğini doğurmuştur. Elektrosprey enjeksiyonu tekniği, bu gibi durumlarda kullanılabilir bir yöntemdir. Çünkü bu teknik, her debi değeri için eşit parçacık boyutu dağılımı sağlayan yegâne tekniktir. Bu sebeple, elektrosprey tekniği minyatür enerji dönüşümü cihazlarında sıvı hidrokarbonların atomizasyonu için de oldukça uygundur. Bu çalışmada elektrosprey teorisi kısaca ele alındıktan sonra bir elektrosprey sisteminin tasarımı, karakterizasyonunu ve ekstraktör elektrodunun elektrosprey davranışına etkisi anlatılmaktadır. Deneylerde dielektrik sıvı olarak metanol ve etanol kullanılmıştır. Kılcal tüp olarak, cam kapiler tüp ile insülin iğnesi ucu kullanılmıştır. Bunların iç çapları sırasıyla, 0.1 mm ve 0.23 mm'dir. Bir reosta yardımı ile sıvıya uygulanan gerilimin ekstraktör elektroduna uygulanan gerilime oranı değiştirilebilmektedir. Değişik delik çaplarındaki ve kılcal tüpün ucuna değişik mesafelerde konumlandırılmış ekstraktör elektrodlarının elektrosprey davranışına etkisi parametrik olarak incelenmiştir. 3 mm ve 3.8 mm değeri için başlangıç ve koni jeti rejiminin bozulduğu bitiş voltajı değeri bulunmuştur. Bu iki değerin de ekstraktör ve sıvı arasındaki gerilim oranının artması ile orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bulunan sonuçlar teori ile de uyumludur. Aynı zamanda ölçülen başlangıç voltajı değeri de teorik değere yakın olduğu gözlemlenmiştir. 5.2 mm ekstraktör çapı değeri için sadece başlangıç voltajı bulunmuştur. Ölçülen başlangıç voltajı değeri de teorik değere yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu bulgular, çoklu elektrosprey sistemi tasarlarırken kullanılabilir niteliktedir. Özellikle bitiş voltajı değeri, çoklu elektrosprey sistemine ait bir ekstraktör yüzüğü tasarımında kullanılabilir en büyük delik çapı hakkında bilgi verebilir.

Anahtar Kelimeler: Elektrosprey, Ekstraktör Elektrodu, Yakıt Enjeksiyonu, Taylor Koni

EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF AN ELECTROSPRAY INJECTOR

Abstract: Many devices can be produced in micro, even nano scales with the aid of MEMS technology. These devices' requirements are associated with their respective dimensions. For example, required thrust for the orbital control of a nano satellite is in the order of millinewtons, or the required droplet size for operating a small combustion system is only in the order of a few microns. These requirements dictate old methods to be put aside. Nevertheless, electrospray technique is quite suitable for such applications. This is a unique technique in the sense that it provides equal droplet size distribution at very low flow rates. Thus, electrospray injection is a rather proper choice for liquid hydrocarbon atomization in miniature energy conversion devices. In this study, electrospray theory is briefly described, and then design and characterization of an electrospray system presented and the effect of extractor electrode on electrospray behavior is discussed. Methanol and ethanol are used as dielectric liquids in the experiments. Glass capillary tube and insulin needle were used as conduits for electrospray injection with their respective radiuses of 0.1 mm and 0.23 mm respectively. Ratio between the liquid extractor voltages can be adjusted by means of a rheostat. Various extractor radius values and different extractor to capillary distances are examined during parametric study. Starting and ending voltages are measured for 3 mm and 3.8 mm extractor radius values. At the ending voltage the conical form of electrospray injection is altered such that the electrospray is not able to flow regularly. Starting and ending voltages increase in direct proportion to the increase of extractor to liquid voltage ratio. These results are consistent with the theory. Besides, measured starting voltage is quite similar to the calculated value. Only starting voltage was measured for 5.2 mm extractor radius. These results can be utilized for the design of multiplexed array of fuel emitters. Especially, ending voltage values provide an idea to designer in terms of maximum hole diameter on the extractor ring, which could be used in multiplexed electrospray systems.

Keywords: Electrospray, Extractor Electrode, Fuel Injection, Taylor Cone

SEMBOLLER

E_n	Elektrik alanı şiddeti [$N.C^{-1}$]
d	Kapiler ucu ile toprak elektrodu arası mesafe [m]
K	İletkenlik [$S.m^{-1}$]
P	Birinci dereceden Legendre fonksyonu
Q	İkinci dereceden Legendre fonksyonu
Q_{min}	Başlangıç debisi [$m^3.s^{-1}$]
R	Silindirik yarıçap [m]
R_c	Yüzey eğrilik yarıçapı [m]
R_{c1}, R_{c2}	Yüzeyin prinsipal eğrilikleri [m]
$V_{baslangic}$	Başlangıç voltajı [V]

Yunan Harfleri

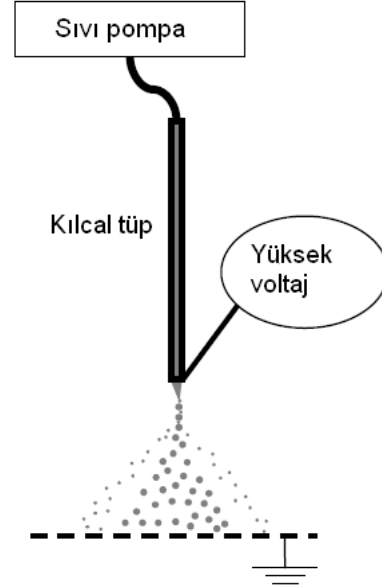
α	Koni yarım açısı [rad]
γ	Yüzey gerilimi [$N.m^{-1}$]
ϵ	Dielektrik sabiti [$F.m^{-1}$]
ϵ_0	Boş uzay dielektrik sabiti [$F.m^{-1}$]
η	Hiperboloidin asimtotik konisinin yarım açısı [rad]
ξ	Ovallik açısı [rad]
ρ	Yoğunluk [$kg.m^{-3}$]
ν	Zenit açısı [rad]
ϕ	Yüzey potansiyeli [V]
φ	Azimut açısı [rad]

GİRİŞ

Bundan neredeyse yarım asır önce “2000 yılı için” isimli konuşmasında R. Feynman minyatürizasyonun elektronikten, bilgi depolamaya, mikro ölçekte elektromekanik sistemlerin üretimine, gelecekte oynayacağı rolü neredeyse kehanet derecesinde öngörmüştür (Feynman, 1959). Feynman’ın “aşağıda çok yer var” başlığıyla tanımladığı o günün hayal gücünü zorlayan birçok olgu bugün fazlasıyla gerçekleşmiştir. Her ne kadar Feynman meşhur konuşmasında itki yahut güç üretim sistemlerinin minyatürizasyonundan bahsetmemiş olsa da, bugün teknolojinin geldiği noktada bu konuda da birçok gelişme kaydedilmiştir.

Elektrosprey tekniği, düşük debilerdeki (dolayısıyla küçük boyutlardaki), düzgün akış ve parçacık boyutu dağılımını sağlayan en uygun tekniktir. Bu teknik, dielektrik sıvıların, yüksek elektrik alanı altında iyonlaşmasına dayanmaktadır. Sıvı, elektrik alanına maruz kaldığında, yüzeyinde bir kabarma oluşur. Sıvının yüzey gerilimi, elektriksel kuvvetler ile oluşan bu kabarmayı etkisiz hale getirmeye çalışır. Düşük elektrik alan kuvvetlerinde, bu kabarma çok az olurken, yüksek elektrik alan kuvvetlerinde bu kabarma konik bir yapı halini alır. Bunun sonucunda, sisteme yeterli elektrik alan kuvveti uygulandığında, elektrostatik kuvvetler yüzey gerilmesini yener ve konik yapının tepe noktasından damlacıklar halinde ayrılmalar başlar (bkz. Şekil 1). Bu fenomen elektrosprey iyonizasyonu olarak adlandırılır (Krpoun, 2009). Elektrosprey sistemleri

birçok değişik alanda kullanılabilir. Bunlara örnek olarak; kimyasal analizler (Fenn, 1989), gen ağaçlarının ortaya çıkarılması (Cheng vd., 1996), nano boyutlarda parçacık üretimi (Lenggoro vd., 2006), uzay itki sistemleri (Velasquez-Garcia vd., 2008; Velasquez-Garcia vd., 2006a; Velasquez-Garcia vd., 2006b; Martinez-Sanchez, 2006) ve yanma sistemleri (Kyritsis vd., 2002) sayılabilir.



Şekil 1. Tipik Bir Elektrosprey Konfigürasyonu

Daha evvel de belirtildiği gibi uyduların yörünge kontrolü için kullanılan kolloid iticilerde de elektrosprey sistemi kullanılmaktadır (Velasquez-Garcia vd., 2006). Sistem, sıvıyı elektriksel kuvvetler vasıtası ile enjekte edecek olan kılcal tüp ve sıvının hızlanmasını, düzgün parçacık dağılımını sağlayan ekstraktör elektrodlarını barındırır. Ekstraktör elektrodu bazı durumlarda bir adet olurken, bazen birden fazla da olabilir. Ayrıca birden fazla emitör bulunduran çoklu elektrosprey sistemlerinde, yan yana bulunan iki elektrosprey enjektörün birbirlerini etkilememesi (cross-talk) için de ekstraktör elektroduna ihtiyaç duyulur.

Sıvı hidrokarbonların konvansiyonel pillere göre çok daha büyük enerji yoğunlukları vardır. Örnek vermek gerekirse tipik bir sıvı hidrokarbon yaklaşık 42 MJ/kg enerji depolayabilirken bir lityum-iyon pil ancak 0.6 MJ/kg enerji yoğunluğuna sahiptir (Deng vd. 2007). Bu sebepten dolayı sıvı hidrokarbon yakıtla çalışabilecek küçük pillerin yapılması tekniğin bilinen durumunu oldukça ileriye götürebilecektir. Enerji dönüşüm verimliliği düşük olsa bile böyle bir sistem yine de konvansiyonel pillerin birim ağırlık başına üretebileceğinden çok daha fazla elektrik üretebilecektir. Bu özellikle yerin ve ağırlığın son derece kısıtlı ve değerli olduğu askeri uygulamalar ile havacılık-uzay sanayindeki uygulamalar açısından önemlidir.

Enerji dönüşümü için hangi yöntem kullanılırsa kullanılsın mikro ölçekte bir sistem için yakıt sıvı halde

olmalıdır ki istenilen enerji yoğunluğu yakalanabilsin. Kullanılacak yakıt sıvı halde olduğu için bunun bir şekilde atomize edilip yanma odasına enjekte edilmesi ve havayla karışmasının temin edilmesi gereklidir. Elektrosprey yöntemi, mikro ölçekteki araçlardaki sıvı enjeksiyonu için oldukça uygun bir yöntemdir.

Elektrosprey, iki farklı fenomen ile tanımlanabilir. İlk fenomen hava basıncı ile ya da mekanik olarak püskürtülmüş sıvıların elektrik alanına maruz bırakılmasıdır. Diğeri ise, sıvı yüzeyinden spreynin oluşmasını sağlayan elektrik alanının kullanılmasıdır. İkinci fenomen ise “elektro-hidrokinamik püskürtme” olarak adlandırılır (Cloupeau, Prunet-Forch, 1994). Bu çalışmada elektro-hidrokinamik püskürtmeden bahsedilmiştir.

Elektro-hidrokinamik püskürtme ile ilgili ilk gözlemler 1914 yılında Zeleny tarafından yapılmıştır. Deneysel hava ortamında gerçekleştirmiş olup, cam kapiler tüp kullanmıştır. Sıvı olarak ise seyreltik hidroklorik asit, etil alkol ve gliserin kullanmıştır (Zeleny, 1914).

1930’ların başlarında, yüksek elektrik alanına maruz kalmış su parçacıklarının davranışlarıyla ilgili çalışmalar yürütülmüştür (Macky, 1931). Daha sonra 1965 yılında, kapiler tüpün ucunda oluşan koninin, tepe yarım açısının 49° olduğunu bulunmuştur (Taylor, 1965).

Zeleny’nin fenomeni tam olarak, Dole tarafından 1968 yılında açıklanmıştır (Dole vd., 1968). Ayrıca 1992 yılında Fernandez de la Mora’nın çözümü, damlacık yoğunluğunu uzama bağlı olarak tanımlamıştır (de la Mora, 1992).

Günlük alandaki elektrosprey uygulamaları ise oldukça yenidir. Örnek olarak, 1989 yılında Fenn ve arkadaşları elektrosprey tekniğini kütle spektrometresinde kullanmışlardır (Fenn vd., 1989). Bu çalışma J. B. Fenn’e 2002 yılında Nobel Ödülü kazandırmıştır. Ayrıca, elektrosprey tekniği itki ve yörünge kontrolü amacıyla uzay sanayisinde de kullanılmaktadır (Valesquez-Garcia, BGLF vd., 2008).

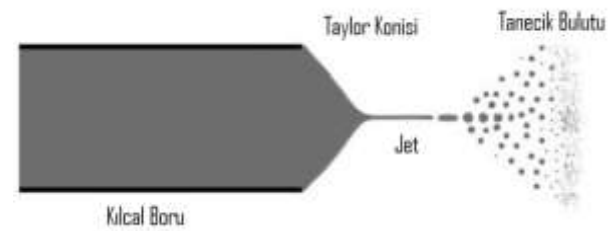
Birçok uygulamada, tek elektrosprey kaynağı ile istenilen debi elde edilemez. Bu yüzden çoklu elektrosprey sistemleri kullanmak gerekir. Yüksek yoğunluklu çoklu elektrosprey sistemi üretimi MEMS Teknolojisi ile mümkündür. 2001 yılında, silikon kullanılarak çoklu elektrosprey sistemi üretilmiş ve kütle spektrometresi uygulamalarında kullanılmıştır (Tang vd., 2001). 2005 yılında, 115 lüle/cm^2 yoğunluklu çoklu elektrosprey sistemini CNC matkap ile üretilmiş ve test edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada, tekli elektrosprey ile çoklu elektrospreyin her bir lülesindeki debi değerinin aynı olduğunu ispat etmiştir (Bocagnera vd., 2005). Valesquez-Garcia 0.64 cm^2 ’lik yüzeye 1024 lüleyi yerleştirmiş ve uydu itki sistemleri için test etmiştir (Valesquez-Garcia vd. 2006). 2007 yılında konvansiyonel gaz türbinleriyle aynı mertebe değerinde ısı açığa çıkaran mikro boyutta seramik yanma odası

üretilmiştir. Bu cihazın hacmi sadece 0.22 cm^3 ’tür. 2009 yılında Deng ve arkadaşları 11547 lüle/cm^2 yoğunluk sistem üretmişlerdir. Bu değer literatürdeki en yüksek lüle yoğunluğudur (Deng vd., 2007).

Çalışmada öncelikle elektrosprey teorisinden kısaca bahsedilmektedir. Daha sonra test düzeneği tanıtılmakta ve ekstraktör elektrodu kullanılmaksızın ve kullanılarak elde edilen sonuçlar sunulmaktadır. Son olarak elde edilen bulgular irdelenmekte ve çoklu elektrosprey enjektörlerinin ne tür enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılabileceği ele alınmaktadır.

ELEKTROSPREY TEORİSİ

Elektrosprey teorisi çokça bilinmesine rağmen konu bütünlüğü açısından bu çalışmada özet olarak ele alınmıştır. Elektrosprey teorisi kısaca şu şekilde açıklanabilir. Küçük hacimde iletken bir sıvı elektrik alanına maruz bırakıldığında şekli sadece yüzey gerilimden dolayı değişmeye başlar. Buna karşılık voltaj yükseltildikçe elektriksel kuvvetler yüzey gerilimi kadar bir mertebeye erişir ve bu noktadan sonra yüzeyin şekli dışbükey kenarların olduğu ve yuvarlak uçlu bir koni halini alır. Bu koninin tepe açısı yaklaşık 98.6° ’dir. Eğer ki voltaj daha da yükseltilecek ve bir eşik değeri aşılabilecek olursa, tanecikler koniden kopmaya başlarlar ve bir jet oluştururlar. Bu fenomene koni jeti (cone-jet) ismi verilir (bkz. Şekil 2). İşte bu koni jeti elektrospreyin başlama noktasıdır. Bu fenomen ilk defa 1964 yılında Sir Ingram Taylor tarafından açıklandığı için bu koniye “Taylor konisi” adı verilir (Taylor, 1964). Karalı bir elektrosprey jeti meydana getirmek için eşik voltajdan daha yüksek bir voltaj uygulanması gerektiği açık literatürde birçok araştırmacı tarafından rapor edilmiştir. Bu noktada Taylor’ın teorisi üzerinde kısaca durmakta fayda vardır.

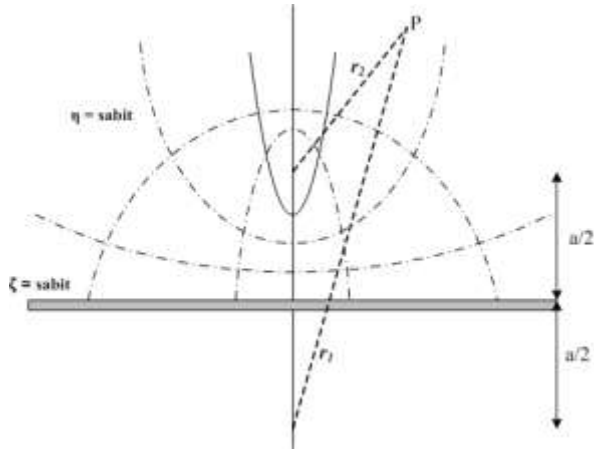


Şekil 2. Taylor Konisi ve Koni Jeti Oluşumu

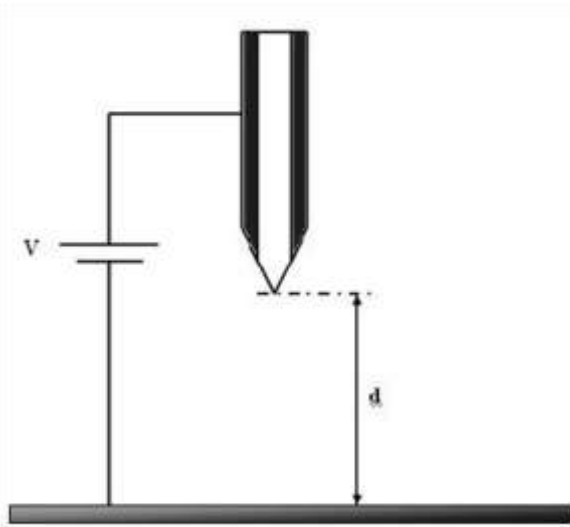
Şekil 3a’da “kutuplardan uzatılmış (oval) dik koordinat sisteminde $\eta = \frac{r_1-r_2}{a}$ ile $\xi = \frac{r_1+r_2}{a}$ olarak tanımlansın. φ ise FF’ doğrusuna olan açıyı gösterebilir. Bu tanımlardan aşağıdaki denklemler (Eş. 1-2) yazılabilir (Martinez-Sanchez, 2006).

$$r_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + \left(x + \frac{a}{2}\right)^2} \quad (1)$$

$$r_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + \left(x - \frac{a}{2}\right)^2} \quad (2)$$



a. Koordinat Takımı



b. Plaka (Toprak Elektrodu) ve Elektrosprey İğnesi
Şekil 3. Elektrosprey ile İlgili Geometrik Parametreler
(Martinez-Sanchez, 2006)

Dolayısıyla $\eta = \text{sabit}$ eğrileri eş-odaklı hiperboloidler meydana getirir. $\eta = 0$ ise simetri yüzeyi S'i belirtir. η yüzeylerinden birisi, diyelim ki $\eta = \eta_0$ kılcal tüpten dışarı doğru uzanan sıvı yüzeyini temsil etsin. Eğer ki ϕ potansiyeli $\eta = \eta_0$ üzerinde sabit (V), ve S yüzeyi boyunca sıfır kabul edilirse, ϕ için çözüm fonksiyonu sadece η 'ya bağlı olarak yazılabilir. Oval koordinat sisteminde Laplace denkleminin η 'ya bağlı kısmı aşağıdaki gibi yazılabilir (Eş.3).

$$\frac{\partial}{\partial \eta} \left[(1 - \eta^2) \frac{\partial \phi}{\partial \eta} \right] = 0 \quad (3)$$

Sınır şartları (yüzeyde $\phi = 0$) göz önüne alınıp bu adi diferansiyel denklem entegre edilirse aşağıdaki sonuca ulaşılır (Eş. 4).

$$\phi = V \frac{\tanh^{-1} \eta}{\tanh^{-1} \eta_0} \quad (4)$$

$R^2 = x^2 + y^2$ silindirik yarıçapı ifade eder. $\eta = \frac{r_1 - r_2}{\alpha}$ bağıntısından, $\eta = \text{sabit}$ hiperboloidinin denklemini aşağıdaki gibi yazılabilir (Eş. 5).

$$\alpha \eta = \sqrt{R^2 + \left(z + \frac{\alpha}{2}\right)^2} - \sqrt{R^2 + \left(z - \frac{\alpha}{2}\right)^2} \quad (5)$$

$z > 0$ için bu denklem $z = \eta \sqrt{\frac{\alpha}{4} + \frac{R^2}{1 - \eta^2}}$ şeklinde sadeleşir. Yüzeyin eğrilik yarıçapı R_c ise $\frac{1}{R_c} = \frac{z_{RR}}{(1 + z_R^2)^{3/2}}$ bağıntısından hesaplanabilir. Buradan eğrilik yarıçapı çekilecek olursa Eş. 6 elde edilir.

$$R_c = \frac{1 - \eta^2}{2\eta} \alpha \left[1 + 4 \frac{R^2/\alpha^2}{(1 - \eta^2)^2} \right]^{3/2} \quad (6)$$

Şekilden kılcal uçtan düzleme olan mesafe d ise aşağıdaki gibi bulunur (Eş. 7).

$$d = z(R = 0, \eta = \eta_0) = \frac{\alpha}{2} \eta_0 \quad (7)$$

R_c ve d verilirse bu değerlerden yola çıkarak α ve η_0 aşağıdaki iki denklemden (Eş. 8-9) hesaplanabilir.

$$\alpha = 2d \sqrt{1 + \frac{R_c}{d}} \quad (8)$$

$$\eta_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R_c}{d}}} \quad (9)$$

Sıvının ucundaki elektrik alanı değeri de aşağıdaki gibi yazılabilir (Eş. 10).

$$E_{uc} = \left(-\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_{uc} = \left(\frac{d\phi}{d\eta} \frac{d\eta}{dx} \right)_{uc} = \frac{2V/\alpha}{(1 - \eta_0^2) \tanh^{-1} \eta_0} \quad (10)$$

Eğer ki $R_c \ll d$ olarak kabul edilirse uçtaki elektrik alan değerini aşağıdaki gibi (Eş. 11) sadeleştirmek mümkündür.

$$E_{uc} = -\frac{2V/R_c}{\ln\left(\frac{4d}{R_c}\right)} \quad (11)$$

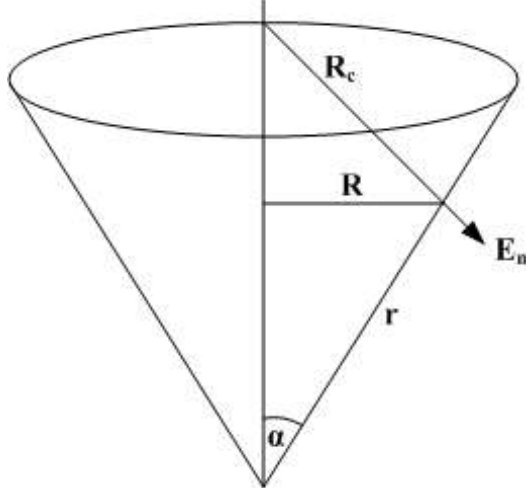
Dolayısıyla hiç sıvıyı iten basınç olmasa dahi sıvının sadece elektrostatik olarak yüzey gerilimini yenip akmaya başlayabilmesi için aşağıdaki şartın sağlanması lazımdır.

$$\frac{\epsilon_0}{2} E_{uc}^2 > \frac{2\gamma}{R_c} \quad (12)$$

Sonuçta "başlangıç gerilimi" aşağıdaki gibi elde edilir (Martinez-Sanchez, 2006).

$$V_{bastangic} = \sqrt{\frac{\gamma R_c}{\epsilon_0}} \ln\left(\frac{4d}{R_c}\right) \quad (13)$$

Elektrik alan tarafından uygulanan çekme gücü $\epsilon_0 E_n^2/2$ konik yüzeyin her yerinde yüzey gerilimi tarafından dengelenmelidir. Yüzey gerilimi ise birim alan başına $\gamma \left(\frac{1}{R_{c1}} + \frac{1}{R_{c2}} \right)$ şeklinde ifade edilir. Burada R_{c1} ile R_{c2} yüzeyin prinsipal (başçıl) eğrilikleridir. Konide $1/R_c$ jeneratör eğri boyunca sıfırdır. Meusnier teoremine göre normal kesitin eğriliği aynı noktadan geçen dairesel kesitin eğriliği kadardır (bkz. Şekil 4).



Şekil 4. Meusnier Teoreminin Şematik Açıklaması

$$\frac{1}{R_c} = \left(\frac{1}{r} \right) \cos \alpha = \frac{\cos \alpha}{r \sin \alpha} = \frac{\cot \alpha}{r} \quad (14)$$

Bu sonuç yorumlanarak Eş. 15 yazılır.

$$\frac{1}{2} \epsilon_0 E_n^2 = \frac{\gamma \cot \alpha}{r} \quad (15)$$

Buradan ise yüzeye normal elektrik alan şiddeti şu şekilde bulunur (Eş. 16).

$$E_n^2 = \sqrt{\frac{2\gamma \cot \alpha}{\epsilon_0 r}} \quad (16)$$

Bu noktadan sonra öyle bir harici elektrik alan dağılımı bulunmalıdır ki, koninin yüzeyindeki noktalar eş-potansiyelli, örneğin $\phi = 0$, olsunlar ve aynı zamanda normal yöndeki elektrik alan şiddeti $1/\sqrt{r}$ ile doğru orantılı olsun (Taylor, 1964).

Eğer Şekil 4'teki gibi küresel bir koordinat sistemi seçilecek olursa (ν yüzey normalinden ölçülen zenit açısını, ϕ ise azimut açısını gösterir), Laplace denkleminin $\phi = AP_\nu(\cos \nu)r^\nu$ ile $\phi = AQ_\nu(\cos \nu)r^\nu$ şeklinde çözüm fonksiyonlarını kabul ettiği görülecektir. Burada P_ν ile Q_ν sırasıyla birinci ve ikinci türden Legendre fonksiyonlarıdır. Bu fonksiyonlardan birincisinin zenit açısı 180° için değerinin ise 0° için kökü vardır. Birinci fonksiyon istenilen şartı sağlamaz, ikinci fonksiyon ise çözümü sağlar çünkü fonksiyonun sıfır olduğu nokta sıvının içerisinde kalmaktadır, aranan çözüm ise sıvının dışarıysındadır. Çözüm fonksiyonu yerine konulursa aşağıdaki denkleme ulaşılır (Eş. 17).

$$E_n = E_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = A \frac{dQ_{\nu u}}{d(\cos \theta)} \sin \theta \frac{1}{1-\nu} \quad (17)$$

Eğer $E_n \approx 1/\sqrt{r}$ isteniyorsa o halde $\nu = 1/2$ seçilmelidir. Neticede çözüm fonksiyonu bulunmuş olur (Taylor, 1964).

$$\phi = Ar^{1/2} Q_{1/2}(\cos \theta) \quad (18)$$

$Q_{1/2}(\cos \theta)$ fonksiyonun $\theta = 49.3^\circ$ derece için kökü vardır. Bu yarım açının iki katı 98.6° ise koninin tepe açısını verir (Taylor, 1964). Bu açı sıvının fiziksel özelliklerinden ve uygulanan voltajdan bağımsızdır.

Elektrosprey ilk oluştuğunda elde edilen minimum debi ise Eş. 19 yardımıyla hesaplanır. Bu bağıntıda yer alan ϵ terimi dielektrik sabitini temsil eder, diğer terimlerden K iletkenlik ve ρ ise sıvının yoğunluğudur.

$$Q_{\min} = \frac{\gamma \epsilon \epsilon_0}{\rho K} \quad (19)$$

Elektrosprey sisteminden geçen akım Eş. 20 ile hesaplanabilir. Eğer elektrosprey akımı bilirse, denklemden akış debisi çekilebilir ki bu çalışmada debiyi elde etmek için bu yöntem kullanılmıştır. Bu denklem 1994 yılında Fernandez de la Mora tarafından deneysel veriler ışığında doğrulanmıştır.

$$I = f(\epsilon) \sqrt{\frac{\gamma Q K}{\epsilon}} \quad (20)$$

Eş. 20 'de yer alan $f(\epsilon)$ fonksiyonu boyutsuz akış debisine bağlı, boyutsuz spray akımı türevidir. Bu türev sadece dielektrik sabitinin fonksiyonudur. Bu nedenle, bütün sıvılar için bu değer bir çizgiden geçer. Bu sonuç bize, elektrosprey akımına bağlı olarak, elektrosprey debisini bulmamızı sağlar. Bu konu hakkındaki geniş kapsamdaki bilgi de la Mora'nın çalışmasında yer almaktadır (de la Mora, 1994).

TEST DÜZENEGİ

Elektrosprey enjeksiyonu test düzeneğinin bir fotoğrafı Şekil 6'da görülmektedir (Karakaya, 2012). Deneylerde, 0.23 mm iç çapa sahip insülin iğnesi ucu kullanılmıştır. İnsülin iğnesinin uç kısmı mümkün olduğu kadar düzleştirilerek deneyler gerçekleştirilmiştir. Sıvı, iğnenin ucuna bir şırınga pompa vasıtasıyla getirilmiştir. Şırınga olarak 10 ml ve 50 ml kapasiteli plastik şırıngalar kullanılmıştır. Şırınga pompa ile kapiler tüp arasındaki bağlantı, 1/8" dış çapına sahip boru sayesinde gerçekleştirilmiştir. Yüksek gerilimli güç kaynağı vasıtasıyla, istenilen voltajda gerilim sağlanmıştır. Alüminyumdan üretilmiş toprak elektrodu, kapiler tüpün çap eksenine dik olarak, belirli bir mesafe ile yerleştirilmiştir.

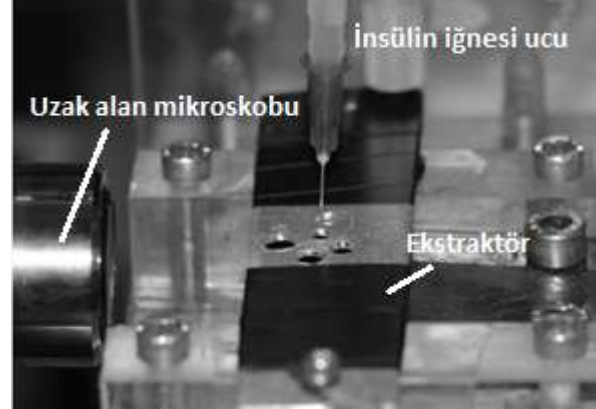
Elektrospreyin görüntülerinin fotoğraflanması uzak alan mikroskobuna takılan bir CCD kamera ile sağlanmıştır. 1600 x 1200 piksel çözünürlüğe sahip bu kamera ile

siyah-beyaz görüntüler elde edilmiştir. 20 mm odak uzunluğuna sahip uzak alan mikroskobu, kameranın ön kısmına yerleştirilmiştir. Bu sayede incelenabilir boyuttaki görüntüler elde edilmiştir. Bu çalışmada, uzak alan mikroskobuna 10x ve 20x büyütme oranına sahip lensler takılmıştır. Ayrıca CCD kamera, toprak elektrodu düzleminde serbestçe hareket edebilmesi için iki eksenli traverse bağlanmıştır. Bu traversin düzlemine dik yerleştirilmiş başka bir travers de, CCD kameranın dikey ekseninde hareketini sağlamıştır. Bu sayede kamera, üç ekseninde de hareket kabiliyeti kazanmıştır.

Elektrosprey akımı, dijital multimetre vasıtasıyla ölçülmüştür. Ekstraktör elektrodu kullanılmadan yapılan deneylerde, 10 k Ω kontrol direnci, negatif elektrod ile toprak elektrodu arasına bağlanmıştır. Bu direncin üzerine voltmetre paralel olarak bağlanmış, voltmetrede okunan değerden akım değeri hesaplanmıştır. Bu sayede elektrosprey akımı bulunabilmiştir. Voltmetrede okunan değer sistem çalışmadığı zamanlarda bir gürültü değeri göstermektedir. Elektrosprey akımı başladığı anda bu değer değişmektedir. Bu sayede elektrospreyin oluşumu sadece voltmetreye bakılarak da anlaşılabilmiştir. Voltmetrenin ölçtüğü değeri, ilk değiştiren voltaj değeri başlangıç voltajı olarak kaydedilmiştir. Ekstraktör ile yapılan deneylerde multimetre ampermetre olarak sisteme seri bağlanmış, kontrol direnci kullanılmamıştır. Bu sayede direncin yarattığı kayıplar engellenmiştir.

İki farklı deney düzeneği kurulmuştur. Birinci deney düzeneğinde ekstra tor elektrodu kullanılmamış, Şekil 7a'da da görüldüğü gibi elektrosprey enjeksiyonu, kılcal tüpün karşısına yerleştirilen toprak elektrodu vasıtasıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 7b'de ise ekstraktör elektrodu kullanılarak oluşturulan deney düzeneği gösterilmektedir. Ekstraktör elektroduna bütün ölçümlerde, sıvıya uygulanan voltaj ile toprak elektrodu voltajı arası bir gerilim uygulanmıştır. Bu gerilim, sisteme bağlı bir reosta direnç sistemi vasıtasıyla indirgenmiştir. Reosta, birbirine seri bağlı 10 adet 1'er m Ω 'luk dirençlerden oluşmaktadır. Dirençlerin yüksek

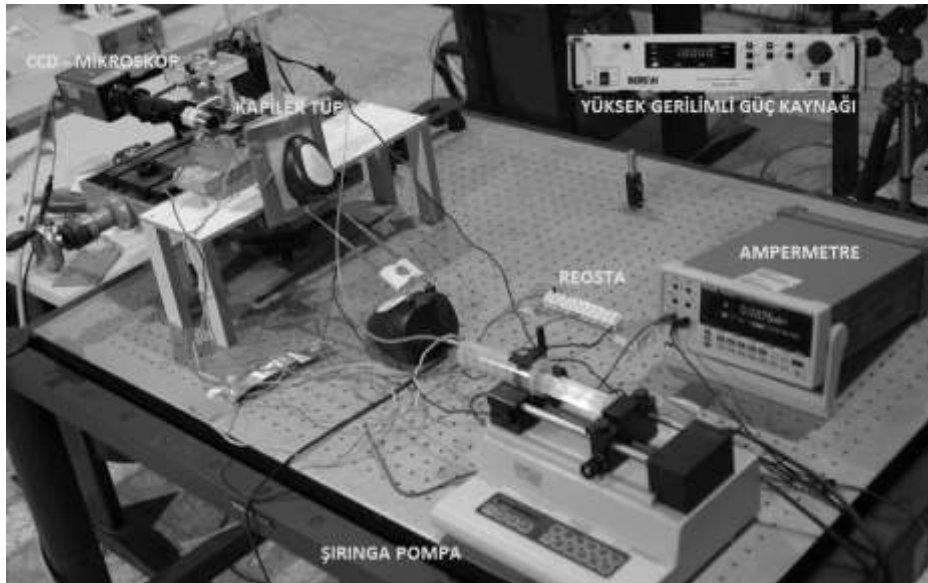
değerli seçilmelerinin nedeni yüksek voltaja dayanabilmeleri içindir. Sistemde reosta kullanıldığından, ekstraktör voltajı her zaman sıvıya uygulanan voltaja bağlı olmuştur. Örneğin, ekstraktör elektroduna ait kablo, A/B = 3/10 direnç oranında bağlanıldığında, güç kaynağından 1000 V gerilim uygulanması dâhilinde, ekstraktör elektroduna 300 V, sıvıya ise 1000 V gerilim uygulanacaktır. Aynı şekilde 2000 V uygulandığında bu değer 600 V olacaktır. Bu yüzden sıvı voltajını sabit tutup, ekstraktör voltajını değiştirmek için kablonun bağlantı yerinin değiştirilmesi yeterli olmaktadır.



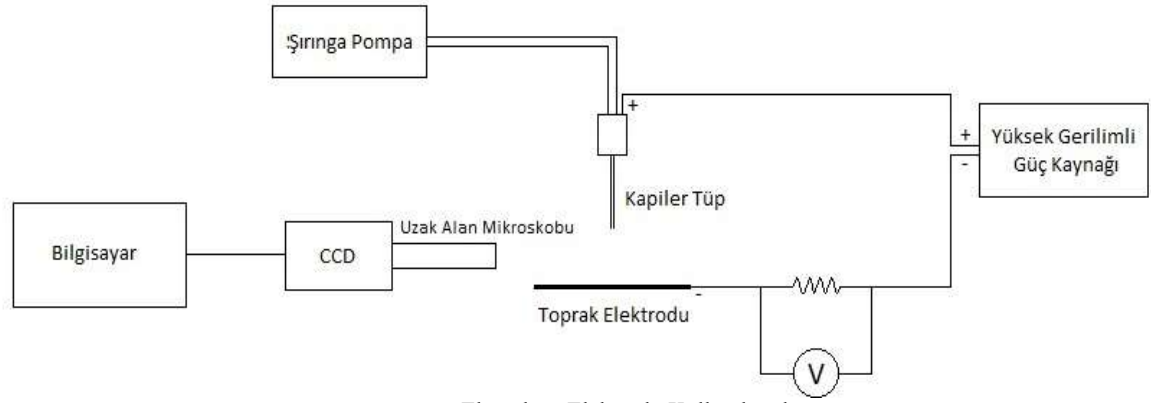
Şekil 5. İnsülin İğnesi Bağlı Sistem

Şekil 5'te insülin iğnesi bağlı sistem görülmektedir. Burada görülen ekstraktör, 1 mm kalınlığında alüminyum sacdan üretilmiş olup, üzerine matkapla 3, 3.8, 5.2 çapında delikler açılmıştır. Ekstraktör, toprak elektroduna 7 mm mesafe ile yerleştirilmiş, bu değer bütün deneyler sırasında sabit tutulmuştur.

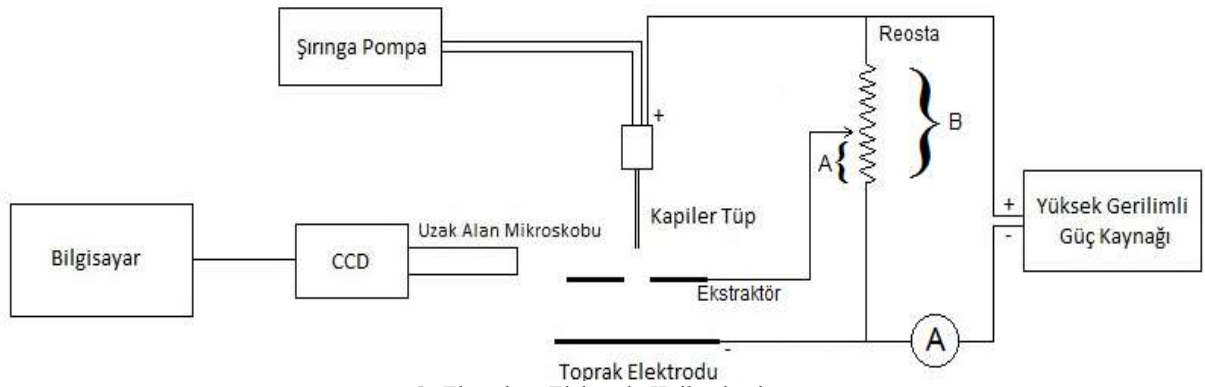
Sistemin geri kalan destekleyici parçaları ise PMMA malzemeden imal edilmiştir. Deneylerde kullanılan sıvıların fiziksel özellikleri ise Tablo 1'de kısaca özetlenmiştir.



Şekil 6. Deney Düzeneğinin Genel Görünümü



a. Ekstraktör Elektrodu Kullanılmadan



b. Ekstraktör Elektrodu Kullanılarak

Şekil 7. DeneY Konfigürasyonlarının Şematik Gösterimi

Tablo 1. DeneYlerde Kullanılan Sıvıların Fiziksel Özellikleri

	Yoğunluk (kg/m ³)	Yüzey Gerilimi (N/m)	Bağıl Elektriksel Geçirgenlik	İletkenlik (S.m ⁻¹)
Metil alkol	791.3	0.023	33.1	2.1 x 10 ⁻⁷
Etil alkol	780	0.024	24.3	1.9 x 10 ⁻⁵

SONUÇLAR

Elektrospreyin oluşumu gözlemlenmek ve karakterizasyonunu gerçekleştirmek için birçok deney yapılmıştır. Bu deneyler iki farklı deney düzeneği ile gerçekleştirilmiştir. Birinci deney düzeneğinde ekstraktör elektrodu kullanılmamış, sıvı direkt olarak toprak elektroduna püskürtülmüştür. Sıvı enjeksiyonu hem borosilikat kılcal tüp ile hem de insülin iğnesi ucu ile gerçekleştirilmiştir. Borosilikat kılcal tüpün iç çapı 0.1 mm'dir. Ekstraktör elektrodu kullanılmadan yapılan deneyler hem kılcal tüp ile hem de insülin iğnesi ile gerçekleştirilmiştir. Ekstraktör elektrodu ile yapılan deneylerde ise insülin iğnesi ucu kullanılmıştır. Bu iğnenin iç çapı ise 0.23 mm'dir.

Yapılan deneylerin tamamında, şırınga pompa ile 0.5 ml/saat değerinde debi uygulanmıştır. Bu debinin uygulanmasının sebebi, emitör içerisindeki sıvı basıncını sabit tutmaktır. Çünkü deneyler, şırınga pompa kullanılmadan da yapılmaya çalışılmış, ancak başarı sağlanamamıştır. Bunun nedeni, elektrosprey oluşumu ile sıvı aktıkça, emitör içerisindeki basıncın değişmesi ve bu yüzden de ampermetrede okunan akım değerinin

değişmesidir ki bu da istenilmeyen bir durumdur. Şırınga pompanın çalıştırılması durduğunda bile bir müddet sıvı akışının kesilmemesi de deneyleri zorlaştıran bir başka nedendir. Sonuç olarak, 0.5 ml/saat gibi düşük bir debi değeri uygulamak, parametrik çalışma için oldukça uygun olmuştur.



Şekil 8. Taylor Konisi

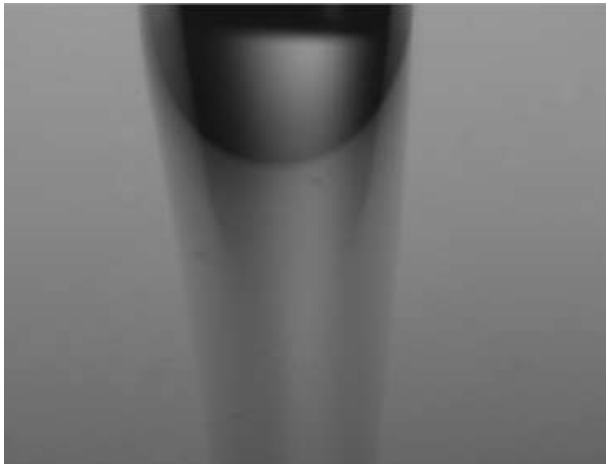
G. Taylor'ın 1964 yılında bulduğu ve daha sonra kendi ismi ile anılan Taylor Konisi deneyi sırasında başarıyla gözlemlenmiştir. Şekil 8'de şırınga pompa çalıştırılmadan elde edilmiş bir Taylor Konisi fotoğrafı bulunmaktadır. Elbette ki şırınga pompa ile debi sağlandığında da Taylor Konisi oluşmaktadır, ancak böylesine net bir görüntü için pompanın çalıştırılmaması gerektiği uygun görülmüştür. Ayrıca bu görüntü, konik jet moduna bir örnek olarak da gösterilebilir.

Eğer sisteme, başlangıç voltajının çok üzerinde bir gerilim uygulanırsa, sıvı yüzeyinde birden fazla koni oluşur. Bu küçük koniler, sıvı yüzeyinde genel bir kabarma yaratmaz, ufak jetler halinde emitörün ucundan yayılırlar. Buna çoklu jet modu (multijet modu) denir. Şekil 9'da multijet modunun oluşumunu gösteren fotoğraf yer almaktadır. Bu fotoğraftaki akış yaklaşık, 5.5 kV voltaj değeri uygulanarak, etanol sıvısı ile oluşturulmuştur.



Şekil 9. Multijet Modu

Bu deney düzeneği ile gözlenebilen bir diğer mod ise, mikro damlama modudur. Şekil 10'daki görünüm, her ne kadar konik jet moduna benzese de, ampermetrede okunan akım değerinde bir değişiklik yaratmadığı için mikro damlama modu olarak kabul edilmelidir.



Şekil 10. Mikrodamlama Modu

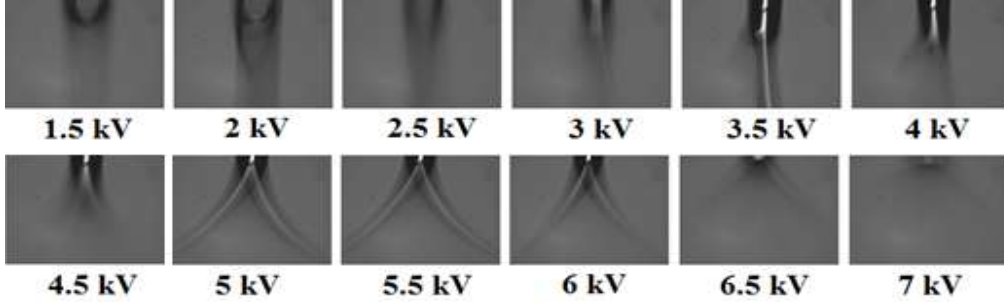
Ekstraktör Elektrodu Kullanılmaksızın Elde Edilen Bulgular

Parametrik çalışmanın ilk deneyleri, ekstraktör elektrodu kullanılmadan yapılmıştır. Bu deneylerde emitör olarak borosilikat cam kapiler tüp kullanılmıştır. Dielektrik sıvı olarak ise methanol kullanılmıştır. Sisteme 0 ile 7 kV voltaj değerleri 0.5 kV aralıklarla uygulanmış olup farklı voltaj değerlerindeki elektrosprey fotoğrafları Şekil 11'de görülmektedir. Sisteme 1.5 kV voltaj değeri uygulandığında, Taylor Konisi'nin uç kısmında ilk ayrılmalar meydana gelmiştir. Voltaj artırıldıkça, Taylor Konisi'nin yüksekliği artmış, toprak elektroduna doğru bir yaklaşıma gözlemlenmiştir. Şekil 11'de görüldüğü üzere, 3.5 kV ve bundan sonraki değerlerde Taylor Konisi toprak elektrodu ile neredeyse birleşmiştir ve stabil bir akış oluşmuştur. 5, 5.5 ve 6 kV uygulandığında akışta çatallaşma meydana gelmiştir. Bunun sebebi olarak da toprak elektrodununun yüzey genişliğinin, kılcal tüpün çapından oldukça büyük olmasıdır. 6.5 ve 7 kV'a ait fotoğraflar, diğerlerine göre daha düşük çözünürlüklüdür. Bunun sebebi kılcal tüpün elektriksel kuvvetlere dayanamayıp titremesidir. Ayrıca, 3.5 ve 4 kV değerine ait şekillerde akışın simetrik olarak gerçekleşmediği gözlemlenmektedir. Bunun sebebi olarak cam kapilerin ucunun imalat sebebiyle tam olarak düz olmaması olarak gösterilebilir.

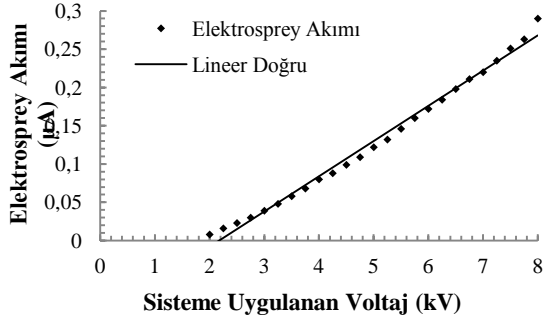
Teorik olarak, başlangıç voltajı, Eş. 13 ile 2.5 kV olarak bulunmuştur. Bu hesaplamada kılcal tüp ile toprak elektrodu arasındaki mesafe 15 mm alınmış olup, iletken sıvı olarak methanol kullanılmıştır.

Şekil 12'deki grafik, elektro spreiden geçen akım, elektrik yüklenmiş sıvı ile toprak elektrodu arasındaki potansiyel farkın fonksiyonu olarak çizdirilmiştir.

Grafikteki değerler üzerine bir doğru uydurulmuştur. Bu doğrunun korelasyon katsayısı $R^2=0.99$ 'dur. Doğrunun yatay eksenini kestiği nokta başlangıç voltajı değeridir ve şekilde görüldüğü üzere bu değer yaklaşık 2.2 kV civarındadır. Ayrıca, elektrosprey ilk oluştuğu sırada, multimetrede ani bir değer değişimi olmaktadır. Bu şekilde de başlangıç voltajını bulmak mümkündür. Elektrosprey debisi Eş. 20 vasıtasıyla hesaplanmıştır. Bu denklemdeki, $f(\epsilon)$ haricindeki değerler için Tablo 1'den yararlanılmıştır. $f(\epsilon)$ değeri için ise Fernandez de la Mora'nın 1994 yılında yazdığı makaleden yararlanılmıştır. Bu makalede bütün saf çözeltilerin değerlerine karşılık gelen $f(\epsilon)$ değerleri çizdirilmiştir. Methanol için dielektrik sabiti 33.1'dir ve bu değere karşılık gelen $f(\epsilon)$ değeri 15 civarındadır. Bunun sonucunda, elektrosprey akımına karşılık gelen elektrosprey debisi Şekil 14'de gösterilmiştir.

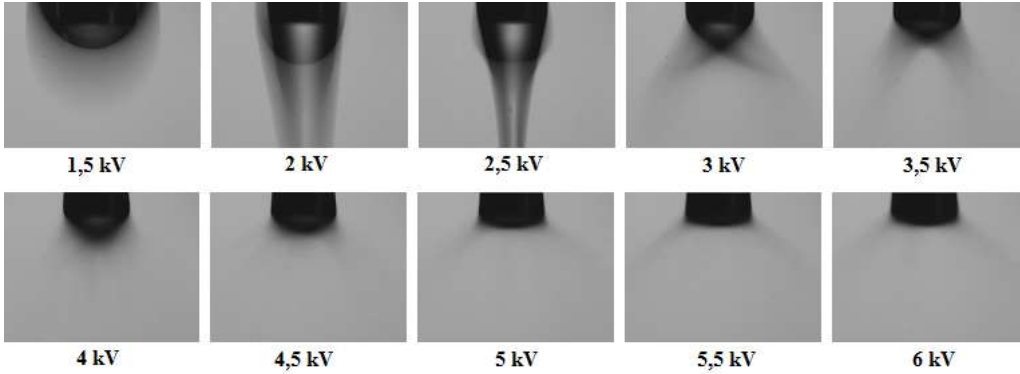


Şekil 11. Farklı elektrik alanı şiddetleri için elektrosprey görüntüleri (Emitör olarak kılcal tüp, dielektrik sıvı olarak metanol kullanılmıştır)

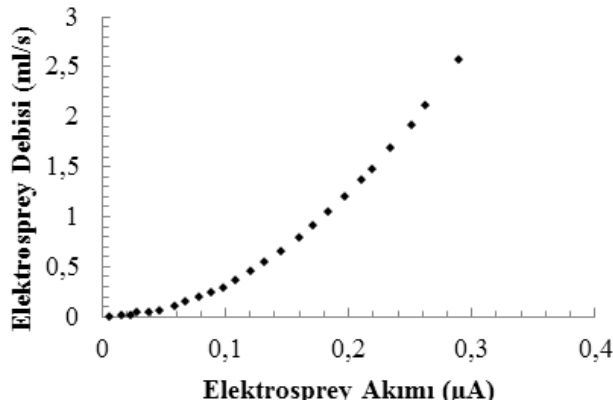


Şekil 12. Farklı voltaj değerleri için elektrosprey akımı. Emitör olarak kılcal tüp, dielektrik sıvı olarak metanol kullanılmıştır. Emitör – Toprak elektrodu arası mesafe 15 mm'dir.

Ekstraktör elektrodu kullanılmadan yapılan deneyler, insülin iğnesi ile de gerçekleştirilmiştir. Şekil 13'de



Şekil 13 - Farklı elektrik alanı şiddetleri için elektrosprey görüntüleri (Emitör olarak insülin iğnesi, dielektrik sıvı olarak etanol kullanılmıştır)

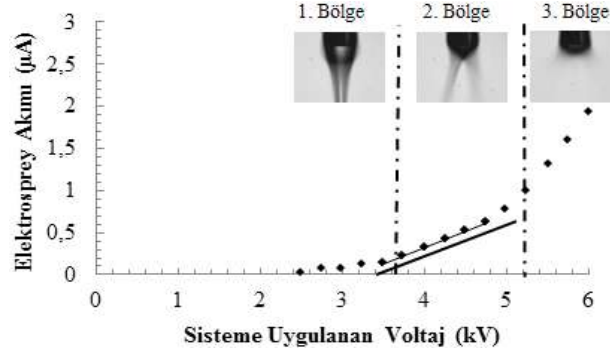


Şekil 14. Farklı elektrosprey akım değerlerinde oluşan debi. Emitör olarak kılcal tüp, dielektrik sıvı olarak metanol kullanılmıştır. Emitör – Toprak elektrodu arası mesafe 15 mm'dir.

gösterilen elektrosprey resimlerinde dielektrik sıvı olarak etil alkol kullanılmıştır. İğne ucu ve toprak elektrodu arası mesafe ise 5 mm olarak alınmıştır. 1.5 kV'a ait resimde damlama modu, 2 kV gerilime ait resimde ise mikro damlama modu gözlemlenmektedir. 2.5 kV gerilim değerinde ise düzgün bir elektrosprey enjeksiyonu artık başlamıştır. 3 kV ve sonrasında, sıvı, toprak elektrodunun oldukça geniş olması nedeniyle, genişlemiştir. 5 kV ve daha yüksek gerilimlere karşılık gelen görüntülerde ise multijet modu görülebilir. Ekstraktör elektrodu kullanmadan yapılan deneylerde emitör ile toprak elektrodu arası mesafede 5 mm'nin altına inilememiştir. Parametrik çalışma esnasında toprak elektrodu üzerinde biriken sıvı tabakası, sağlıklı ölçümlerin yapılmasını engeller nitelikte olmuştur.

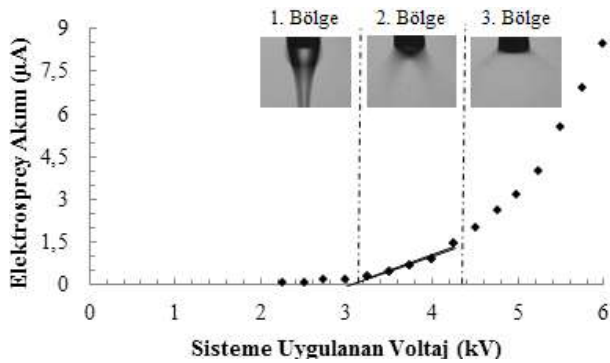
Şekil 15 ve Şekil 16'da 0.23 mm iç çapa sahip insülin iğnesi kullanılarak alınmış sonuçlar görülmektedir. Bu grafiklerde sıvıya uygulanan voltaja karşılık gelen elektrosprey akımı değeri çizdirilmiştir. Deneyler 5 ve 10 mm emitör ucu – ekstraktör mesafeleri için gerçekleştirilmiştir. Şekillerde görüldüğü üzere elektrosprey enjeksiyonu akış şekline (moduna) göre 3 bölgeye ayrılmıştır. Birinci bölgede elektrosprey akışı düz bir çizgi şeklinde gerçekleşmiştir. Bu rejim konik jet modu olarak adlandırılabilir. Sıvı voltajı yükseltildiğinde ikinci bölgeye geçildiğinde, akışın genişlediği görülmüştür. Bu genişlemenin bir nedeni olarak da, toprak elektrodunun oldukça geniş olması söylenebilir. Tam olarak sayılsa da, bu bölgeye, multijet moduna geçiş modu denebilir. Son bölgede ise, akış artık küçük jetler halinde gerçekleşmektedir. Bu rejim multijet modudur.

Şekil 15 ve Şekil 16'nın ikinci bölgelerinde lineer bir artış gözlemlenmiştir. Önceki çalışmalarda bütün veri noktaları için çizilen lineer doğru bu kez, sadece ikinci bölge için çizdirilmiştir. Bunun sonucunda, bu doğrunun yatay eksenini kestiği noktalar Şekil 15 ve Şekil 16'da sırasıyla 3.23 ve 3.2 kV'dur. Emitör ucunun toprak elektroduna yaklaşması ile bu değer azaldığı gözlemlenmiştir.

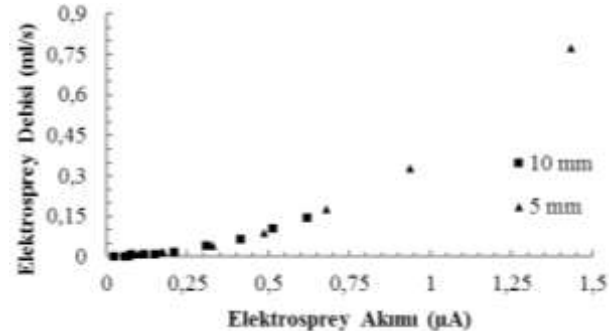


Şekil 15. Farklı voltaj değerleri için elektrosprey akımı. Dielektrik sıvı olarak etanol, emitör olarak insülin iğnesi kullanılmıştır. Emitör – toprak elektrodu arası mesafe 10 mm'dir.

Şekil 15 ve Şekil 16'da, ölçülen elektrosprey akımlarına karşılık gelen elektrosprey debi değerleri gösterilmiştir. Bu grafikler, yalnızca 1. ve 2. bölgeler için çizdirilmiştir. Debinin bulunmasında, bir önceki deneylerde de kullanılan Eş. 20'den yararlanılmıştır. Etanol için $f(\epsilon)$ değeri, 12 olarak bulunmuştur. Çizilen grafikler yalnızca akım değerlerine göre çizildiğinden, üç mesafe için veri noktaları aynı egrinin üzerinde yer almaktadır.



Şekil 16. Farklı voltaj değerleri için elektrosprey akımı. Dielektrik sıvı olarak etanol, emitör olarak insülin iğnesi kullanılmıştır. Emitör – toprak elektrodu arası mesafe 5 mm'dir.



Şekil 17. Farklı elektrosprey akım değerlerinde oluşan debi. Dielektrik sıvı olarak etanol, emitör olarak insülin iğnesi kullanılmıştır.

Elektrosprey akımı arttıkça, debi değerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Emitör ucu ile toprak elektrodu arası mesafe azaldıkça, ulaşılan debi değerleri yükselmiştir.

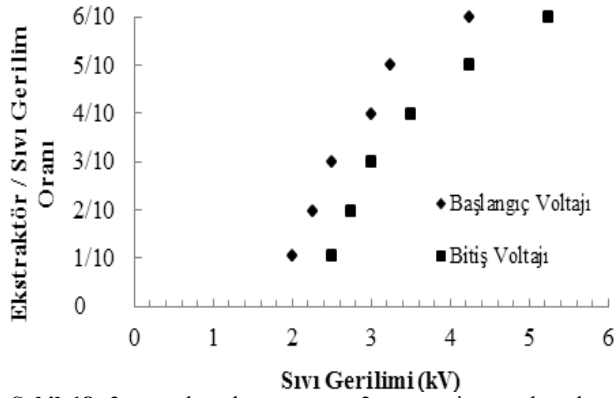
Ekstraktör Elektrodu Kullanılarak Elde Edilen Bulgular

Parametrik çalışmanın ikinci deneyleri, ekstraktör elektrodunun, elektrosprey karakteristiğine etkisini inceleme yönünde gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerde önceden de belirtildiği gibi ekstraktör elektrodu, sıvı ile toprak elektrodu arası bir yük ile yüklenmiştir. Yüksek gerilimli güç kaynağından sağlanan gerilimi ikiye ayırmak için dirençlerden oluşan bir reosta sistemi kullanılmıştır.

Ekstraktör elektrodu ile toprak elektrodu arası mesafe bütün deneylerde sabit tutulmuş ve 7 mm'dir. 3 mm, 3.8 mm ve 5.2 mm ekstraktör elektrodu çapı için deneyler gerçekleştirilmiştir. Deneyler 2 mm ve 3 mm emitör – ekstraktör mesafeleri için uygulanmıştır. Dielektrik sıvı olarak etanol kullanılmıştır. Sıvıya uygulanan voltaj, şırınga pompadan gelen boru ile emitörü birbirine bağlayan metal bağlantı elemanına gerilim uygulanmasıyla sağlanmıştır. 0 ile 6 kV arası gerilim değerleri 250 V'luk artırımlarla uygulanmıştır. Bu voltaj değerleri sıvıya uygulanırken, ekstraktör voltajı da farklı reosta oranları sayesinde sağlanmıştır. Şekil 7b'de görüldüğü gibi, (ekstraktör voltajı) / (sıvı voltajı) = A/B olarak gösterilebilir. Burada A ve B değerleri direnç sayısıdır. B değeri sıvıya uygulanan voltaj değerini temsil etmektedir bu da toplam direnç sayısına eşittir, yani 10'dur. A değeri ise 1 ile 7 arasındadır.

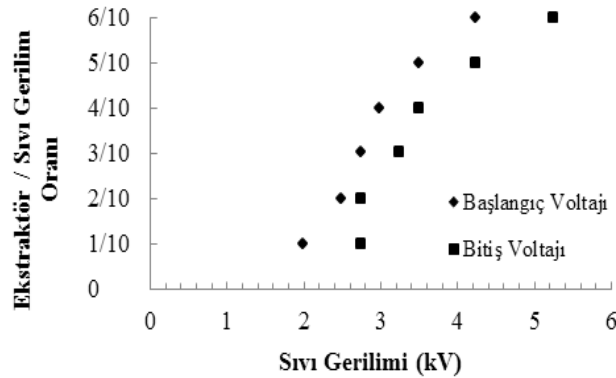
A/B oranı arttıkça, bir başka deyişle ekstraktöre uygulanan voltaj değeri arttıkça elektrospreyin oluşması için gereken sıvı başlangıç voltajı değerinde artış gözlemlenmiştir. 8/10 ve 9/10 oranı uygulandığında, sıvıya uygulanması gereken değer neredeyse 6 kV'u geçmiştir. Reostadaki elemanların direnç değerleri bu gerilime dayanamadıkları için bu oranlar için ölçüm alınmamıştır. Bu yüzden deneylerde 6 kV'un üzerine çıkılmamıştır.

Elektrosprey enjeksiyonu sırasında, sıvıya uygulanan voltaj değeri belirli bir değere ulaştığında, sıvının ekstraktör elektroduna temas etmeye başladığı gözlemlenmiştir. Böyle durumlarda ampermetrede okunan, belirli bir oranda artması gereken elektrosprey akımı değeri artmamıştır. Bu durum özellikle çoklu elektrosprey sistemlerinde istenmeyen bir durumdur. Bu yüzden, sıvının temas etmeye başladığı voltajdan, bir önceki voltaja elektrosprey bitiş voltajı denmiştir ve bu voltaj değerinden sonra ölçüm alınmamıştır. Şekil 18 ve Şekil 19'da, 3 mm ekstraktör çapı ile yapılan deneyler doğrultusunda, 2 mm ve 3 mm emitör – ekstraktör elektrodu arası mesafe için başlangıç ve bitiş voltajları gösterilmiştir. Grafiklerdeki noktalar gösterilirken, sıvı geriliminin kV cinsinden değeri ile ekstraktör/sıvı gerilim oranı esas alınmıştır.



Şekil 18. 3 mm ekstraktör çapı ve 2 mm emitör – ekstraktör mesafesi için başlangıç ve bitiş voltajları.

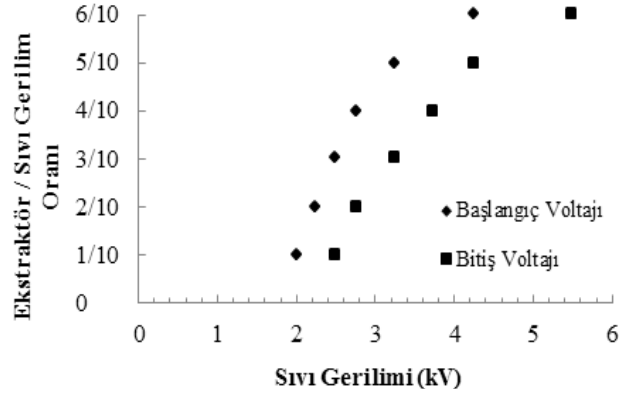
Grafiklerde görüldüğü üzere, ekstraktör elektrodu ile sıvıya uygulanan gerilim oranı (A/B) arttıkça, başlangıç ve bitiş voltajının artması gerektiği gözlemlenmiştir. Şekil 18 ve Şekil 19 karşılaştırıldığında, emitör ile toprak elektrodu arası mesafenin artması ile başlangıç ve bitiş voltajı değerlerinin biraz arttığı gözlemlenmiştir. Şekil 18 incelendiğinde, her A/B oranında elektrosprey enjeksiyonunun belirli bir voltaj aralığında olması gerektiği görülmüştür. A/B oranı arttıkça, bazı değerlerde bu çalışma aralığı sabit kalırken, bazı oranlarda bu değer arttığı gözlemlenmiştir. Bu aralık 1/10'dan 4/10 oranına kadar 0.5 kV olurken, 5/10 ve 6/10 oranlarında 1 kV olmuştur. Şekil 19'daki çalışma aralıklarında, özellikle 1/10 ve 2/10 voltaj oranları değerinde deneysel belirsizlikler oluşmuştur. Daha sonraki oran değerlerinde aralığın A/B oranı arttıkça çalışma voltajı aralığı artmış ve önceki şekilde olduğu gibi 6/10 oranında 1 kV olmuştur.



Şekil 19. 3 mm ekstraktör çapı ve 3 mm emitör – ekstraktör mesafesi için başlangıç ve bitiş voltajları.

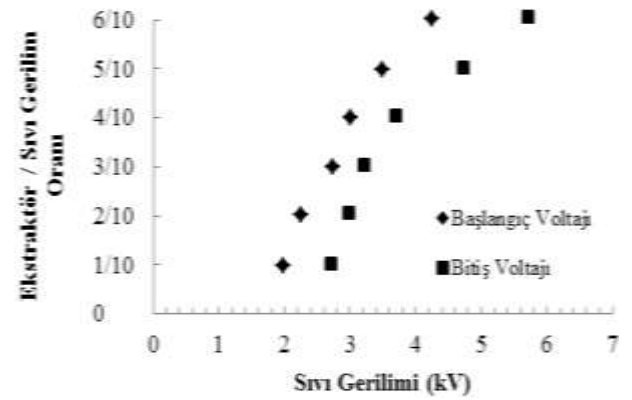
3.8 mm ekstraktör çapı ile yapılan deney sonuçları incelendiğinde, önceki sonuçların burada da geçerli olduğu görülmüştür. Şekil 20'de görüldüğü üzere, elektrosprey çalışma aralığı A/B oranı arttıkça artmış, 1/10 oranında 0.5 kV iken, 6/10 oranına ulaşıldığında 1.25 kV olmuştur. Şekil 21'de ise, 3/10 oranındaki deneysel belirsizlik dışında, çalışma aralığı diğer grafiklerde olduğu gibi artmış 1/10 değerinde 0,75 kV iken, 6/10 oranında 1.5 kV'a yükselmiştir. Ayrıca deney sonuçları incelendiğinde, ekstraktör delik çapı artınca, başlangıç voltajı aynı kalırken, bitiş voltajında artış

gözlemlenmiştir. Bunun nedeni delik çapının artması ile sıvı ile ekstraktör elektrodu temasının yüksek voltaj değerlerinde gerçekleşmesidir.



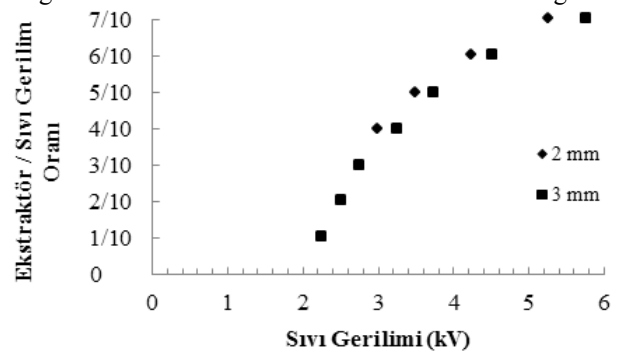
Şekil 20. 3.8 mm ekstraktör çapı ve 2 mm emitör – ekstraktör mesafesi için başlangıç ve bitiş voltajları.

Çoklu elektrosprey sistemlerinde emitörler belirli mesafe oranlarıyla yerleştirilmektedir. Karşısına yerleştirilen ekstraktör üzerinde bulunan delikler de emitörler ile eş merkezli olacağından bu mesafe oranıyla yer alırlar. Bu yüzden açılacak maksimum delik çapı belli bir değerde olacaktır. Böyle sistemlerde, ekstraktöre uygulanabilecek maksimum voltaj olan bitiş voltajının önceden bilinmesi, tasarımda faktörleri için ölçüt olarak sayılabilir.

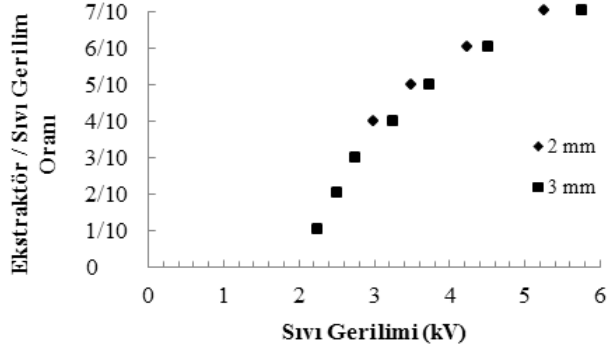


Şekil 21. 3.8 mm ekstraktör çapı ve 3 mm emitör – ekstraktör mesafesi için başlangıç ve bitiş voltajları

Deneyler, 5.2 mm ekstraktör elektrodu çapı için de uygulanmıştır. Yalnız bu çap değeri oldukça büyük olduğu için, hiçbir voltaj değerinde sıvı ekstraktör elektroduna temas etmemiştir, bu yüzden bitiş voltajı değeri söz konusu değildir.

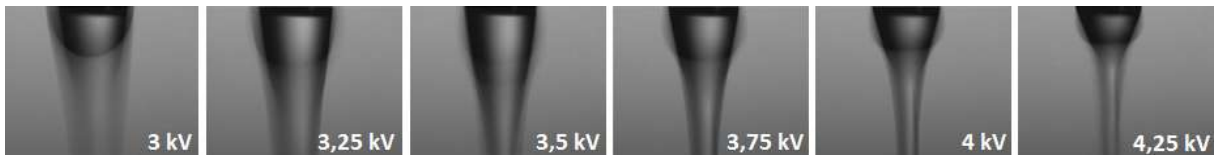


Şekil 22’de 2 ve 3 mm emitör – ekstraktör arası mesafe için başlangıç voltajı değerleri görülmektedir. 1/10, 2/10 ve 3/10 oranları için başlangıç voltajı değeri, her iki delik çapı için aynı olurken, daha sonraki değerlerde, delik çapının artması ile artmıştır. Ayrıca her iki delik çapı değerinde de değerler logaritmik olarak artış göstermiştir. Bitiş voltajının ölçülmesi gerekmediğinden, 7/10 oranında başlangıç voltajı ölçülebilmştir. 1/10 oranında başlangıç voltajı 2 kV mertebesinde gerçekleşmişken, 7/10 oranında 5 kV mertebesinde gerçekleşmiştir.

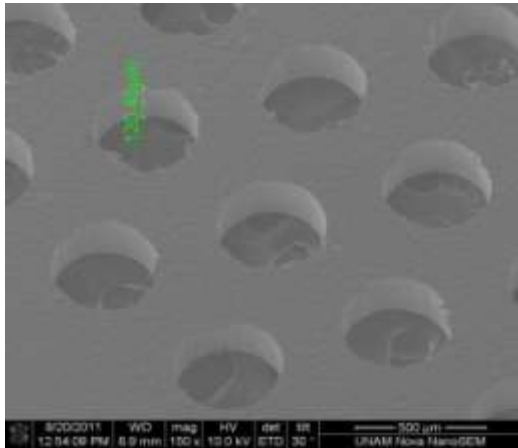


Şekil 22. 5.2 mm ekstraktör çapı ve 2 mm ve 3 mm emitör – ekstraktör mesafesi için başlangıç ve bitiş voltajları

Şekil 23’te 3.8 mm ekstraktör elektrodu çapı için, A/B=5/10 reosta direnç oranı için, farklı voltajlardaki elektrosprey fotoğrafları gösterilmiştir. Bu çalışmada emitör – ekstraktör arası mesafe 2 mm olarak alınmıştır. İlk fotoğraftaki görünüm, her ne kadar konik jet modunu andırırsa da, atomize olmuş bir spreyci değildir. Çünkü bu akışın olduğu esnada ampermetrede, elektrosprey enjeksiyonu esnasında gerçekleşmesi gereken akım değişimi olmamıştır. Akım değişiminin



Şekil 23. 5/10 direnç oranı ve 3,8 mm ekstraktör çapı kullanılmış, çeşitli voltajlarla oluşturulmuş elektrosprey fotoğrafları. Ekstraktör elektrodu - emitör arası mesafe 2 mm’dir.



Şekil 24. Ekstraktör elektrodu (150x büyütme)

gerçekleşmediği, ancak görünümü konik jet moduna benzeyen bu yapı, mikro damlama modudur. Elektrosprey enjeksiyonu 3.25 kV değerinde başlamıştır. Bu voltaj değerindeki elektrosprey akımı yaklaşık 4.7×10^{-5} amper olarak ölçülmüştür. Voltaj arttırıldıkça jet akışı daha ince bir hal almaya başlamıştır. Bu inceleme bize, ekstraktör elektrodunun görevini doğru yaptığını gösterir. Çünkü çoklu elektrosprey sistemlerinde, bu inceleme sayesinde, emitörlerin uçlarında oluşan konik jetler birbirlerini etkilemezler, her biri tek bir elektrospreyin davranışını gösterebilir. 4.25 kV ise bitiş voltajıdır, bu voltajda ölçülen akım değeri ise 1.2×10^{-4} Amperdir. Bu voltajdan sonraki değerlerde sıvı, ekstraktör elektrodunu ıslatmaya başlamıştır, bu yüzden ölçüm bu voltaj değerinde sona erdirilmiştir.

TARTIŞMA

Başlangıç voltajı değeri, teorik olarak 2.5 kV, deneysel olarak 2.2 kV olarak bulunmuştur. Bu %12 lik fark deney düzeneğindeki kararsızlıklar nedeniyle olmaktadır. Şekil 11, Şekil 13 ile son olarak Şekil 23’de yer alan elektrosprey fotoğrafları, deney düzeneğinin düzgün çalıştığını göstermektedir. İleriye yönelik çalışmalarda yüksek yoğunluklu çoklu elektrosprey sistemleri (100, 250, 500, 1000 lüle/cm²) üretimi üzerinde durulacaktır. Bu deney düzeneğinde, MEMS teknolojisi ile üretilen çoklu düzlemsel elektrosprey sistemleri kullanılacak, aynı deneyler o sistem için de uygulanacaktır.

Tek bir lüleden çıkan akış debisi 2 ml/h mertebesinde. Bu değer, tipik bir hidrokarbon yakıt için (alt ısıl değer 40 MJ/kg civarında) hemen hemen 17 W termal güce eşittir. Mevcut teknolojide, termoelektrik jeneratörlerin tipik enerji dönüşümü verimliliği yaklaşık



Şekil 25. Emitör elektrodu (150x büyütme)

% 4'tür. Bu değer, tek bir lüle için 0.67 W elektrik gücüne karşılık gelir. Bunun sonucunda, 100 W elektrik gücü elde etmek için, 150 lüleye ihtiyaç duyulur. Bu yüzden, çoklu elektrosprey sistemleri kullanılmalıdır. Yüksek yoğunluklu çoklu elektrosprey sistemlerinin üretimi ise MEMS teknolojisi ile mümkündür. İTÜ-MEMS laboratuvarında devam eden çalışmalarda, 1000 lüle/cm² yoğunluklu çoklu elektrosprey sistemi üretimi hedeflenmektedir. Bu, bir santimetrekare birim alana sahip elektrosprey sisteminde 17 kW termal güç elde edilebileceğini düşündürmektedir. Bu termal güç, termoelektrik enerji dönüşümü sistemi sayesinde elektrik gücüne dönüştürülebilir.

Dolayısıyla incelenen bu tip elektrosprey enjektörler ister tekil isterse düzlemsel çoklu geometride olsunlar, son derece küçük debilerde çalışmaktadırlar, dolayısıyla da hemen akla gelebileceği gibi taşıt motorlarında (otomobil, uçak motoru v.b.) kullanılmaları hiçbir şekilde fizibil değildir. Bu tip yakıt enjektörlerinin ancak ve ancak MEMS ölçeğindeki enerji dönüşüm sistemlerinde kullanılmaları uygun olacaktır. Örneğin cm mertebesinde büyüklüğü olan Stirling motorları yahut termo-elektrik enerji dönüşüm sistemleri bunlar arasında sayılabilir. Bunun yanısıra benzer enjektörlerin kolloid itki sistemlerinde de kullanım alanı buldukları bilinmektedir.

Ekstraktör elektrodu ile yapılan deneyler, çoklu elektrosprey üretiminde kullanılabilecek parametreler elde edilmesini sağlamıştır. Çünkü çoklu elektrosprey sistemlerinde ekstraktör elektrodu ile emitörler karşılıklı olarak eşmerkezli oldukları için, ekstraktör elektrodunda yer alan deliklerin çakışmaması, delik çapı belli bir değeri geçmemelidir. Bazı ekstraktör delik çapı ve diğer değerlere göre, başlangıç ve bitiş voltajlarının bulunması, tasarımda kullanılacak maksimum delik çapı için fikir verebilir. Çalışma kapmasında elde edilen bilgiler aynı zamanda bir kolloid itici tasarımında da kullanılabilir.

Hâlihazırda yürütülen çalışmalar neticesinde 250 lüle/cm² yoğunluklu enjektör ve ona karşılık gelen ekstraktör elektrodunun üretimleri tamamlanmıştır. Bunlara ait SEM görüntüleri **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.** ve **Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**'de gösterilmiştir. Üretimde RİDA (reaktif iyonlar ile derin aşındırma) yöntemi kullanılmıştır (Abdullahoğlu, 2012). Bu proseslerin ölçeklenmesi ile daha yüksek yoğunluklara ulaşılması hedeflenmektedir.

TEŞEKKÜR

Çalışmaya maddi destek sağlayan Türkiye Bilimsel ve Teknik Araştırma Kurumu'na (Proje No: 109M449), İTÜ Rektörlüğü Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (Proje No: 33796) ve İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'ne (Proje No: 33611) şükranlarımızı sunarız. Son olarak olanaklarını bizlerle paylaştıkları için ise Bilkent Üniversitesi Ulusal Nanoteknoloji Araştırma Merkezi'ne (UNAM) teşekkürü borç biliriz.

KAYNAKÇA

Abdullahoğlu, M.R., (2012), Mikro Ölçekte Elektrosprey Sistemi Üretimi ve Karakterizasyonu, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

Bocanegra R., Galan D. Marquez M., Loscertales I.G., Barrero A., (2005), Multiple Electrosprays Emitted from an Array of Holes, *Journal of Aerosol Science*, **36**, 1387-1399.

Cheng, X., Camp, D. G., Wu, Q., Bakhtiar, R., Springer, D. L., Morris, B. J., Bruce, J.E., Anderson, G. A., Edmonds, C. G., Smith, R. D., (1996), Molecular Weight Determination of Plasmid DNA Using Electrospray Ionization Mass Spectroscopy, *Nucleic Acids Research*, **24(11)**, 2183-2189.

Cloupeau, M. and Prunet-Foch, B., (1994), Electrohydrodynamic Spraying Functioning Modes: A Critical Review, *Journal of Aerosol Science*, **25**, 1021.

Deng, W., Klemig, J.F., Xiaohui, L., Reed, M.A., Gomez, A., (2007), Liquid Fuel Microcombustor Using Microfabricated Multiplexed Electrospray Sources, *Proceedings of the Combustion Institute*, **31**, 2239-2246.

Deng, W., Waits, C.M., Morgan, B., Gomez, A., (2009), Compact Multiplexing of Monodisperse Electrosprays, *Aerosol Science*, **40**, 907-918.

Dole, M., Mach, L.L., Hines, R.L., Mobley, R.C., Ferguson, L.D., Alice, M.B., (1968), Molecular Beams of Macroions, *J. Chem. Phys.*, **49**, 2240-2247.

Fenn, J. B., Mann, M., Meng, C.K., Wong S.F., Whitehouse, C.M., (1989), Electrospray Ionization for Mass Spectroscopy of Large Molecules, *Science*, **246**, 64-71.

Fernandez de la Mora, J. (1992), The Effect of Charge Emission from Electrified Liquid Cones, *J. Fluid Mech.* **243**, 561-574.

Fernandez de la Mora, J., Loscertales I. G. (1994), The Current Emitted by Highly Conducting Taylor Cones, *J. Fluid Mech.*, **260**, 155-184.

Feynman, R. P., (1992), There is Plenty of Room at the Bottom, A Reprint of the 1959 Talk, *Journal of Microelectromechanical Systems*, **1 (1)**, 60-66.

Karakaya, M.C., (2012), Elektrosprey Enjeksiyon Sistemi Tasarım ve Karakterizasyonu, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi.

Krpoun, R. (2009), Micromachined Electrospray Thrusters for Spacecraft Propulsion, *Doktora Tezi*, École Polytechnique Fédérale de Lausanne.

- Kyritsis, D. C., Guerrero-Arias, I., Roychoudhury, S., Gomez, A., (2002) Mesoscale Power Generation by a Catalytic Combustor Using Electrospayed Liquid Hydrocarbons, *Proceedings of the Combustion Institute*, **29**, 965-972.
- Lenggoro, I.W., Lee, H.M., Okuyama, K., (2006), Nanoparticle Assembly on Patterned Plus/Minus Surfaces from Electrospay of
- Macky, W. A. (1931), Some investigations on the deformation and breaking of water drops in strong electric fields, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A*, **133(822)**, 565–587.
- Martinez-Sanchez, M., (2006), Space Propulsion Lecture Notes, Massachusetts Institute of Technology
- Tang K., Lin Y., Matson D. W., Kim, T., Smith R.D., (2001), Generation of Multiple Electrospays using microfabricated emitter arrays for improved mass spectrometric sensitivity, *Anal. Chem.*, **73**, 1658-1663.
- Taylor, G. (1964), Desintegration of water drops in an electric field, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences* **280(1382)**, 383–397.
- Velasquez-Garcia, L.F., Akinwade, A.I., Martinez-Sanchez, M., (2006a), A Micro-Fabricated Linear Array of Electrospay Emitters for Thruster Applications, *Journal of Microelectromechanical Systems*, **15**, 1260-1271.
- Velasquez-Garcia, L.F., Akinwade, A. I., Martinez-Sanchez, M., (2006b), A Planar Array of Micro-Fabricated Electrospay Emitters for Thruster Applications, *Journal of Microelectromechanical Systems*, **15**, 1272-1280.
- Valesques-Garcia, L.F, Akinwande, A., Martinez-Sanchez, M., (2008), Fabrication of a Fully Integrated Electrospay Aarray with Applications to Space Propulsion, 21st IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS 2008), 976-979.
- Zeleny, J. (1914), The Electrical Discharge from Liquid Points and a Hydrostatic Method to Measure Electric Intensity at Their Surface, *Phys. Rev.*, **3**, 69–91.