

# AKIŞKAN–MİKROELEKTROMEKANİK SİSTEMLER FLUIDIC–MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS

**L. Berrin ERBAY**

*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü*

**Levent İNAL**

*Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Makina Mühendisliği Bölümü*

**Mehmet Mete ÖZTÜRK**

*Anadolu Üniversitesi Porsuk Meslek Yüksekokulu*

## ÖZET

Akışkan akışını içeren mikroelektromekanik sistemler (MEMS) sağlık bilimlerinden uzay araştırmalarına uygulamalarının hızla artmasıyla günümüze meydan okumaktadır. Bu çalışmanın amacı bu özel sayı okuyucularının mikrokanallardaki taşınım ısı geçişi için teorik ve deneysel araştırmalarla ilgilenmeden önce akışkan akışını içeren MEMS'lerle ilgili bilgilendirilmesini sağlamaktır. Mikro-ısı değiştiricileri, mikropompalar, mikrotürbinler, mikro-ısı boruları, mikro-kriyojenik-soğutucular ve absorpsiyonlu ısı pompaları akışkan-MEMS'lerle ilgili tasarım değişkenlerini anlamayı sağlamak için bu çalışmada tartışılan örneklerdir. .

**Anahtar Kelimeler:** MEMS, Akışkan-MEMS, Mikro-Isı Değiştiriciler, Mikropompalar, Mikrotürbinler, Mikro-Isı boruları, Kriyojenik-soğutucular

## ABSTRACT

The microelectromechanical (MEMS) systems including fluid flow have been challenging with increasing range of applications from the health sciences to the space explorations. The attempt of this study is to provide an introduction for the readers of the special issue about MEMS including fluid flow before dealing with the theoretical and experimental researches for convective heat transfer in microchannels. Micro-heat exchangers, micropumps, microturbines, micro-heat pipes, micro-cryocooler and absorption heat pumps are examples discussed in this study to provide insight into design parameters relevant to fluidic-MEMS.

**Keywords:** MEMS, Fluidic-MEMS, Micro-Heat Exchangers, Micropumps, Microturbines, Micro-Heat pipes, Cryocoolers

## Giriş

**M**EMS karakteristik boyutları 1 µm'den 1 mm'ye değişen ve mekanik optik akışkan elemanları elektroniklerle birleştiren mikroskobik mekanik sistemler olarak tanımlanır. 25 yıllık araştırmaları takiben, MEMS parçalarının ufak boyutlarının faydalarını düşük maliyetleri ve yüksek hassasiyetini fark ederek, otomotiv endüstrisi ilk olarak hava yastığı akselometresinde MEMS parçalarını benimsemişlerdir. Günümüzde MEMS'ler sayesinde tekil çipler üzerinde entegre edilmiş akselometreler ve elektroniklerin maliyeti 10\$'ın altındadır[1]. Böylece imalatçılar yan darbe hava yastıklarını arabalara ilave etmiş güvenliği artırmışlardır. MEMS'lerin çarpıcı gelişmesi telekomünikasyon alanında gözlenir. MEMS'ler mürekkep püskürtmeli yazıcılarda mikro-enjektör olarak görülebilirler.

Akışkan akışını içeren MEMS'ler, akışkan-MEMS olarak ya da mikro-akışkan sistemler olarak adlandırılır.

## INTRODUCTION

**T**he microelectromechanical systems (MEMS) are defined as microscopic mechanical systems having characteristic dimensions ranging from 1 µm to 1 mm and combine mechanical, optical and fluidic elements with electronics. Following 25 year research, the automotive industry first embraced MEMS devices commercially as airbag accelerometers, recognizing the benefits of MEMS devices' small size, relative low cost and high degree of sensitivity. Today, because of MEMS, the accelerometer and electronics are integrated on a single chip at a cost of under \$10 [1]. Therefore manufacturers added side impact airbags in automobiles and increased safety. Significant growth of MEMS are observed in telecommunication. MEMS can be seen as micronozzles for ink direction in inkjet printers.

MEMS including fluid flow are called as fluidic-MEMS or microfluidic systems. Since the miniaturization offers

Minyatürleştirme pek çok avantaj önerdiğinden akışkan-MEMS'ler sağlık bilimlerinden, yarı iletkenlerden uzay araştırmalarına kadar çeşitli sistemlerde kullanılır. MEMS'ler giderek geniş uygulamalara sahip olacak ve yakın gelecekte büyük bir pazar sunacaklardır. Akışkan-MEMS'ler böylece araştırmacılar ve imalatçılar için verimli bir alandır.

Bu çalışmada, bu konu dışındaki bir okuyucunun dahi dikkatini çekmek için en çok bilinen akışkan-mühendislik sistemlerinin mikro ölçekli çalışmaları tanıtılacaktır.

### Mikro-Isı Değişiriciler

Silikon-tabanlı mikrokanal ısı değişiricileri içeren yüksek ısı akılarına sahip artan bir paketleme yoğunluğu ile mikro-elektronik sistemlerin soğutulması gerçekleştirilmektedir. 1 cm<sup>2</sup> lik silikon yonga üzerinden 790 W ılık ısı çekilmesi [3] üzerine Tuckerman ve Pease [2] tarafından yapılan orijinal sıvı taşınımı çalışmasından sonra mikrokanallarda sıvı ve sıvı-buhar taşınımı vasıtasıyla ısı çekilmesi olayı dikkatleri üzerine toplamıştır. Mikro-ısı değişiriciler küçük sıcaklık basamakları için etkili ısı çekme araçlarıdır. Bau [4]'nün açıkladığı gibi sıcaklık basamakları, düzensiz ısı genleşmeye, ısıl gerilmelere ve kısmen de farklı malzemeler arasında mekanik yorulmalara neden oldukları için istenmezler. Aslında, son on yılda yapılan çeşitli çalışmalar, elektronik parçaların etkili soğutulması için mikrokanallar (d çapı mikrondan yüz mikronlara kadar değişen) veya mini-kanallar (karakteristik çapı d~1 mm) kullanmaya kuvvetli ilgi göstermektedir [5].

Mikro-ısı değişiricilerin ayırıcı özelliği kanal ve kanatçıkların fantastik boyutlarıdır. Kanat ve kanal genişliği genellikle 20 ila 400 µm mertebesinde, kanalın yüksekliği birkaç yüz mikron kadar büyüktür, kanalın uzunluğu genellikle 0.1 ila 1.0 cm arasındadır (belki biraz daha uzun olabilir) ve katı alt taban kalınlığı yaklaşık olarak 100 µm'dir [6]. Mikroişlemcilerin artışındaki

many advantages, fluidic-MEMS are used in a variety of systems from the health sciences, semiconductors to the space explorations. MEMS will have an increasing wide range of applications and offer great market in near future. The fluidic-MEMS, therefore, is a fertile area for both researchers and manufacturers.

In this study, micro-scale studies of the most famous fluidic-engineering systems will be introduced to attract attention of a reader even outside the field.

### Micro-Heat Exchangers

The micro-electronic systems have resulted in increased packaging density with high heat fluxes which must be cooled involving the silicon-based microchannel heat exchangers. Forced liquid and liquid-vapor convection in microchannel heat sinks have received attention since the original liquid convection research by Tuckerman and Pease [2], which removed 790 W from a 1 cm<sup>2</sup> silicon chip [3]. Micro-heat exchangers are efficient means for heat removal for small temperature gradient. As Bau [4] explained that, temperature gradients are undesirable since they may cause non-uniform thermal expansion, thermal stresses, and mechanical fatigue, particularly at the interface between two dissimilar materials. In fact, several studies conducted during the last decade have shown the strong interest to use mini-channels (characteristic dimension d~1 mm) or microchannels (d varying from several microns to several hundred of microns) for cooling efficiently electronic components [5].

The distinctive feature of micro-heat exchangers is the fantastic size of the channels and fins. The fin width and channel width are usually on the order of 20 to 400 µm, the channel height as great as several hundred microns, the channel length is usually on the order of 0.1 to 1.0 cm (but may be much longer), and the solid substrate thickness as small as approximately 100 µm [6]. Due to ever-increasing speed of microprocessors, Sun microsystems project that future heat removal

hıza bağlı olarak, Sun mikrosistemleri ısı çekme gereksinimlerinin bir işlemci başına 150 W olacağını ve bunun da güç tüketimini artıracığını dile getirmişler, ayrıca işlemci kalıp boyutunu devam eden azaltma eğilimi, işlemcilerin ısı akısının eksponansiyel oranını artırması anlamını taşımaktadır [7].

Harris ve diğerleri [8] düzlemsel mikro -çapraz- akışlı ısı değiştiricileri üretmişler ve basınç düşümünün ihmal edilebildiği çapraz akışın olduğu tasarımlarda birim ağırlık ve hacim başına yüksek oranlarda ısı geçişinin gerçekleştirilebileceklerini ifade etmişlerdir. Jiang ve diğerleri [3] çevrimdeki akışkan için elektroozmotik pompa kullanan kapalı -çevrimli iki- fazlı mikrokanaal soğutma sistemi geliştirmişlerdir. Şekil 1 mikrokanaal ısı değiştiricinin düzlemsel ve kesit görünüşünü vermektedir. Tablo 1 ısı değiştiricinin boyutlarını göstermektedir.

Şekil 2 düşük basınç değişimlerine sahip ısı taşınım katsayısı 10000'den 35000 Watt/m<sup>2</sup>°C'e kadar değişen tipik bir mikro ısı değiştiricini göstermektedir. Benzer bir ısı değiştiricinin kesit resmi de Şekil 3'te görülmektedir. Şekil 4'te tipik mikrokanaallar A-Å gibi kesitte incelenebilir.

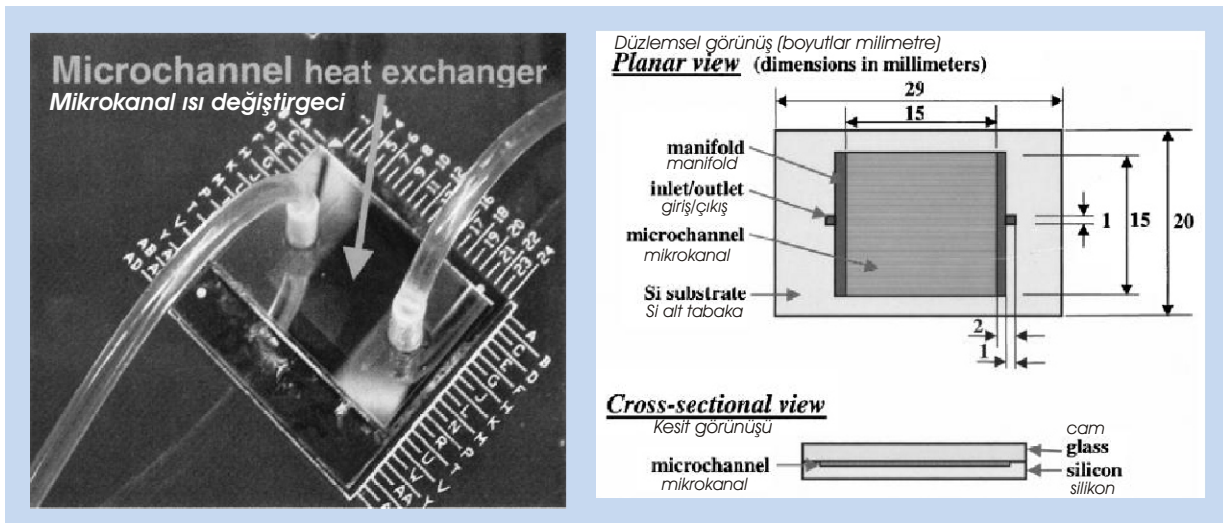
Karlsruhe Araştırma Merkezinde geliştirilen mikro ısı

requirements will be approximately 150 Watts per processor and this increased power consumption, in addition to the continuing trend for decreasing processor die size, means the heat-flux of the processors is increasing exponential rate [7].

Harris et al. [8] have fabricated planar micro-cross-flow heat exchangers and reported that it is possible to achieve very high ratios of heat transfer per unit volume and heat transfer per unit weight with a negligible pressure drop penalty with the cross-flow designs. Jiang et al. [3] have developed a closed-loop two-phase microchannel cooling system using electroosmotic pumping for the working fluid. Figure 1 represents a photograph of the microchannel heat exchanger and its planar- and cross-views. Table 1 includes the dimensions of the heat exchanger.

Figure 2 shows a typical micro-heat exchanger with convective heat transfer coefficients from 10000 to 35000 Watts/m<sup>2</sup>°C with low pressure drops. A similar heat exchanger seen in Figure 3 includes the line indicating a cross-section. Typical microchannels can be observed in such a cross-section of A-Å as in the Figure 4.

An example for commercialized micro-heat exchangers is one developed in Karlsruhe Research



Şekil 1. a) Fotoğraf b) mikrokanaal ısı değiştiricinin düzlemsel ve kesit görünüşü[3].

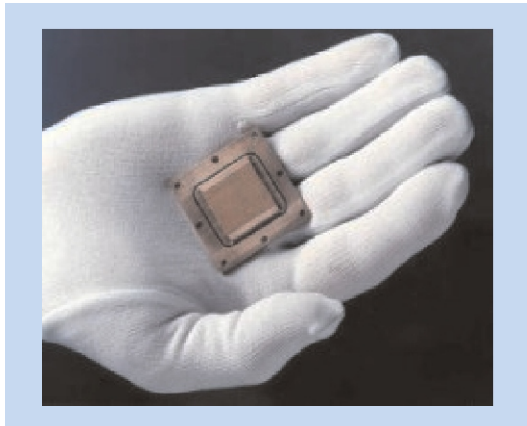
Figure 1. a) Photograph b) planar and cross-sectional view of the microchannel heat exchanger [3].

**Tablo 1.** Isı değiştiricilerin boyutları [3]

Yapı	Boyut
Isı değiştirici	20 mm x 29 mm x 500 $\mu$ m (genişlik x uzunluk x kalınlık)
Kanal geometrisi	100 $\mu$ m x 100 $\mu$ m x 15 mm (genişlik x derinlik x uzunluk)
Kanal no.su	40 (350 $\mu$ m aralık ile)
Giriş/çıkış manifoldu	1 mm x 100 $\mu$ m x 1 mm (genişlik x derinlik x uzunluk)

değiştiricilerin bir örneği Şekil 5’de gösterilmiş ve özellikleri Tablo 2’de özetlenmiştir.

Bu alt bölümde, giriş amaçlı olduğu için mikro ısı değiştiricilerin sınırlı bakış açısıyla ele alınmıştır, bu özel konu mikro-ısı değiştiricilerdeki mikro-kanallarda taşınım ısı geçişinde ele alınmıştır.



**Şekil 2.** Ulusal Kuzeybatı Pasifik Laboratuvarı tarafından üretilen bir mikro-ısı değiştirici [9].

**Figure 2.** A microheat exchanger produced by Pasific Northwest National Laboratory [9].

**Tablo 2.** Karlsruhe araştırma merkezi tarafından geliştirilen mikro-ısı değiştiricinin karakteristik verileri [12]

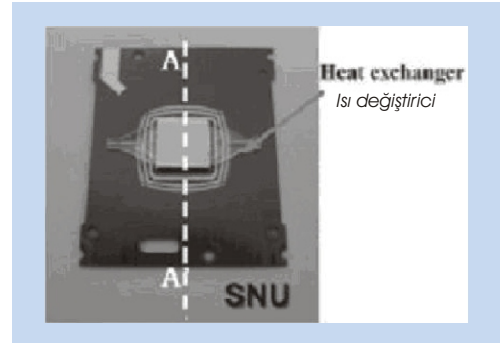
Kanal Kesiti	100 x 70 $\mu$ m ... 200 x 200 $\mu$ m
Belirli iç yüzey	< 30,000 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Mikro-ısı değiştirici hacmi	1; 8; 27 cm <sup>3</sup>
Mikro-ısı değiştirici ısı gücü (Su için)	< 200 kW
Mikro-ısı değiştiricide maksimum ısınma miktarı	< 15,000 K/s
Birim başına geçen hacim miktarı (Su için)	< 7,000 kg/h
Basınç direnci	> 100 bar
Vakum sıklığı	10-8 mbar / l s

**Table 1.** Dimensions of the heat exchangers [3]

Structure	Dimension
Heat exchanger	20 mm x 29 mm x 500 $\mu$ m (width x length x thickness)
Channel geometry	100 $\mu$ m x 100 $\mu$ m x 15 mm (width x depth x length)
No.of channels	40 (with pitch of 350 $\mu$ m)
Inlet/outlet manifold	1 mm x 100 $\mu$ m x 1 mm (width x depth x length)

Center, which is shown in Figure 5 and the characteristic data is summarized in Table 2.

In this sub-section, micro-heat exchangers are considered at a limited perspective for only the purpose of introduction since this special issue is already devoted to convective heat transfer in microchannels in micro-heat exchangers.



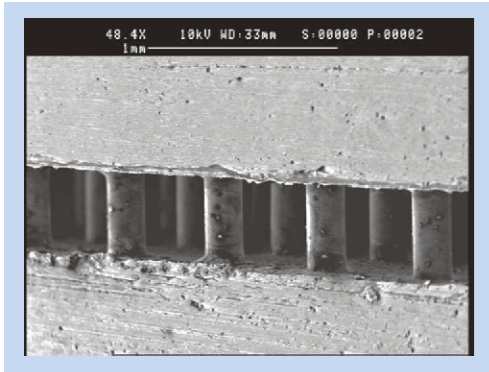
**Şekil 3.** Mikro-sistem ve nano teknoloji (MINT) laboratuvarının ürettiği mikro-ısı değiştirici çip yüzeyine yerleştirilmiştir [10].

**Figure 3.** Micro heat exchanger produced by microsystem and nano technology (MINT) laboratory is attached on a chip’s surface [10].

**Table 2.** Characteristic data of the microheat exchanger developed by karlsruhe research center [12]

Channel cross sections	100 x 70 $\mu$ m ... 200 x 200 $\mu$ m
Specific inner surface	To 30,000 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup>
Volume of micro-heat exchanger	1; 8; 27 cm <sup>3</sup>
Micro-heat exchanger thermal power (for water)	To 200 kW
Maximum heating rate in a micro-heat exchanger	To 15,000 K/s
Throughput per unit (for water)	To 7,000 kg/h
Pressure resistance	> 100 bar
Vacuum tightness	10-8 mbar / l s





**Şekil 4.** Mikro-ısı değiştiricinin kesiti [11].  
**Figure 4.** The cross-section of a microheat exchanger [11].

### Mikropompalar

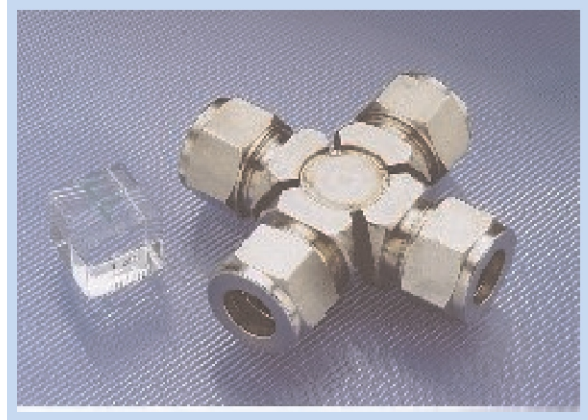
1980'lerin başında, Jan Smith ilk mikropompayı diyabetiklerin kan şeker seviyelerinin korunması için sık sık iğne yapılmasının yerine insülin dağıtım sistemi kullanılması için geliştirdi [13]. Mikropompaların 25 yıllık gelişimi Laser ve Santiago tarafından hazırlanan çalışmada bulunabilir [13]. Pompalar ve mikropompalar şekil 6'da verildiği gibi yerdeğiştirme pompaları ve dinamik pompalar olarak sınıflandırılır.

Yerdeğiştirme pompalarında basınç kuvvetleri, piston ya da periyodik davranıştaki diyafram ve dişli ya da valf gibi döner elemanlarla aracı akışkan üzerine uygulanır. şekil 7 TUDelft [14] tarafından tasarlanan, gaz ve sıvılar derin reaktif iyon aşındırmalı mikropompalar ve valfsiz peristaltik mikropompalar için kullanıldıktan sonra atılabilen ilaç dağıtım sisteminde silikon kontrol valf pompasını göstermektedir.

Döpper vd. [15] çapı 596  $\mu\text{m}$  ve 1192  $\mu\text{m}$  ve yüksekliği 500  $\mu\text{m}$  olan 1 ml/dakikaya çıkan akış hızıyla yağı pompalama ortamı olarak kullanan dişli pompaları (şekil 8) incelemişlerdir ve viskoz akışkanların tam doz ayarlarının olasılıklarını önermişlerdir.

Dişlinin özellikleri ve deneysel sonuçların özeti Tablo 3 ve 4'de sırasıyla gösterilmiştir.

Mikropompaların ticari bir uygulaması olarak, Tablo 5'de özellikleri verilen ve şekil 9'da fotoğrafı gösterilen Alldoo Mikropompa şirketinin [16] bir ürünü, yüksek pnömatik performanslı mikropompa olarak sunulmuştur.



**Şekil 5.** apraz akışlı mikro-ısı değiştirici [12].  
**Figure 5.** Cross flow microheat exchanger [12].

### Micropumps

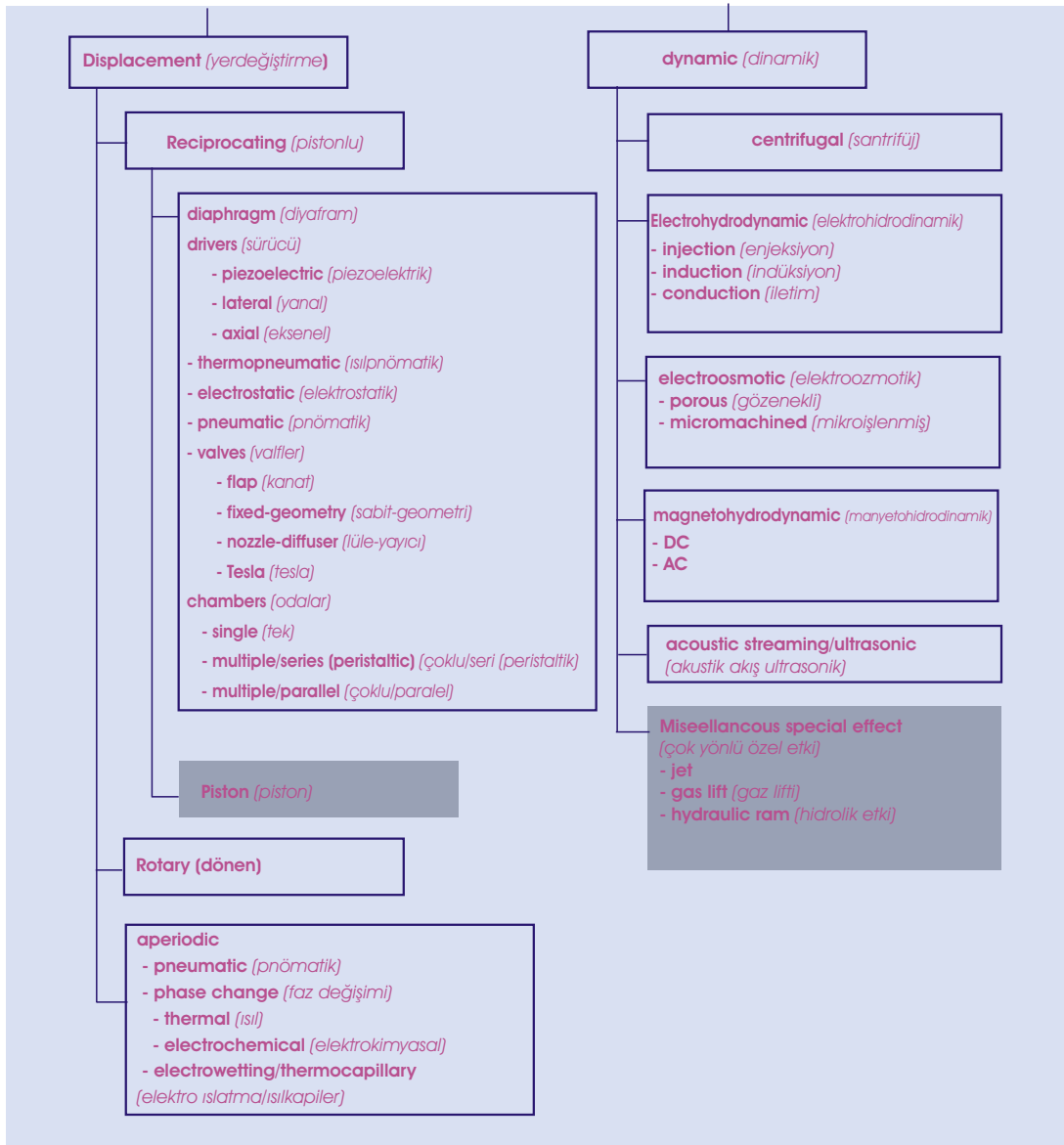
At the beginning of 1980s, Jan Smits developed the first micropump for use in controlled insulin delivery systems for maintaining diabetics' blood sugar levels without frequent needle injections [13]. The progress over the past 25 years in the development of micropumps can be found in the review provided by Laser and Santiago [13]. The pumps and micropumps are classified as displacement pumps and dynamic pumps as given in Figure 6.

In the displacement pumps, pressure forces are exerted on the working fluid by a piston or a diaphragm in a periodic manner and a rotary element such as gears or valves. Figure 7 shows a silicon check valve micropump for disposable drug delivery systems, for gas and liquids deep reactive ion etched (DRIE) micropumps, and a valveless peristaltic micropump designed by TUDelft [14].

Döpper et al. [15] reported that gear pumps (Figure 8) using micro gear wheels with diameters of 596 and 1192  $\mu\text{m}$  and a height of 500  $\mu\text{m}$  using oil as pumping medium with the flow rates of up to 1 ml min<sup>-1</sup> have been realized and they offer the possibility of very precise dosing of viscous fluids.

The properties of gear wheels and the summary of the experimental results are given in Table 3 and 4, respectively.

A product of Alldoo Micropump Co., Ltd [16] presented as a high pneumatic performance



Şekil 6. Pompalar ve mikro-pompaların sınıflandırılması [13].  
Figure 6. Classification of pumps and micropumps [13].

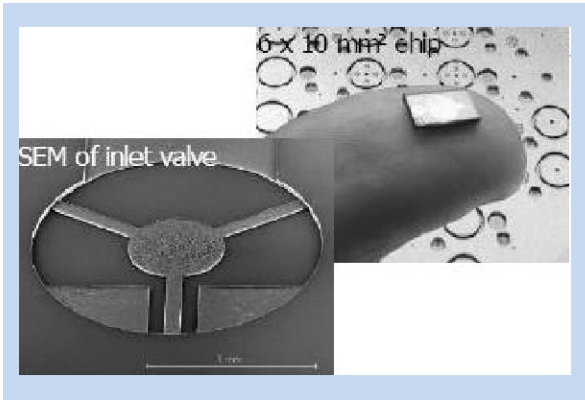
1980'den beri Tablo 6 'da konfigürasyon, valf tipi ve sürücülerine bağlı olarak özetlenen, gidip gelme yer değiştirmeli mikropompalar, birkaç konstrüksiyon için geniş olarak çalışılmış ve rapor edilmiştir. Bu tablo da uygulanabilir mikropompa prototipleri düşünülmüştür.

Dinamik pompalar; santrifüj, elektrohidrodinamik, elektrostatik, manyetohidrodinamik gibi çeşitli gruplara ayrılır. Aracı akışkan dinamik pompanın tipine bağlıdır. Örneğin dielektrik akışkanlar elektrohidrodinamik pompalar için gerekli iken, elektroozmotik ve bazı

micropump whose properties are given in Table 5 and its photo in Figure 9, since it constitutes an example for the commercialization of micropumps.

Since 1980, reciprocating displacement micropumps have been reported mostly and studied widely for a number of constructions which are summarized in Table 6 with respect to configurations, valve types and drivers. In this table, reported and applicable prototype micropumps are considered.

Dynamic pumps are further divided into various groups



**Şekil 7.** Atılabilir ilaç salınım sistemi için silikon kontrol valfleri [14].

**Figure 7.** Silicon check valve for disposable drug delivery systems [14].

**Tablo 3.** Dişli çark özellikleri [15]

	Pompa 1	Pompa 2
Çap $d_h$ ( $\mu\text{m}$ )	596	1192
Modül $m$ ( $\mu\text{m}$ )	38	76
Yerdeğiştirme mesafesi $\alpha_0$ ( $^\circ$ )	20	20
Şaft mesafesi $a_k$ ( $\mu\text{m}$ )	515	1030
Diş sayısı $Z$	12	12
Yükseklik $h$ ( $\mu\text{m}$ )	500	500

**Tablo 4.** Dişli pompaların deneysel sonuçlarının özeti [15]

	Pompa 1	Pompa 2
Çap $d_h$ ( $\mu\text{m}$ )	596	1192
Devir sayısı başına yer değiştirme hacmi (nl)	82	213
Su sızıntı oranı ( $\mu\text{l min}^{-1} \text{hPa}^{-1}$ )	ölçülmemiş	2.5
Su-gliserin sızıntı oranı ( $\text{nl min}^{-1} \text{hPa}^{-1}$ )	20.3	67

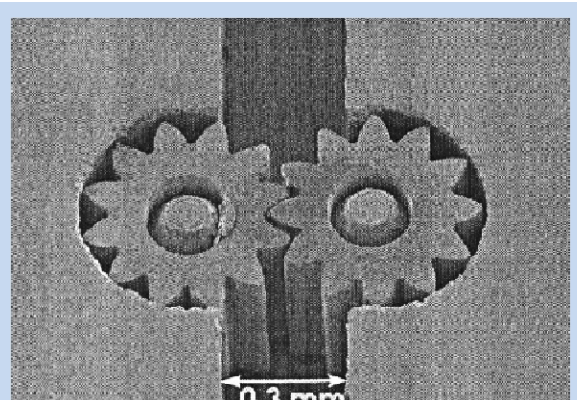
**Tablo 5.** Bir yüksek pnömatik mikro-pompanın özellikleri [16]

Tip	Voltaaj	Serbest akış	Maksimum vakum	Maksimum basınç	Akım	Boyut
CMP-11A	1.5-3V DC	0-0.5L/min	-500mbar	600mbar	0.4A	17.5x26.5x36.5mm
CMP-11B	3 V DC	2 L/min	-700mbar	1 bar	0.7A	17.5x26.5x45mm

**Table 5.** Properties of a high pneumatic micropump [16]

Type	Voltage	Free flow	Max vacuum	Max pressure	Current	Size
CMP-11A	1.5-3V DC	0-0.5L/min	-500mbar	600mbar	0.4A	17.5x26.5x36.5mm
CMP-11B	3 V DC	2 L/min	-700mbar	1 bar	0.7A	17.5x26.5x45mm

manyetohidrokinamik pompalar çeşitli aracı akışkanlara sahip olabilirler. Şekil 10 elektronik parçaları soğutmak için elektroosmotik pompaları ve mikro



**Şekil 8.** 596  $\mu\text{m}$  çaplı mikro dişli pompasının taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü [14,15].

**Figure 8.** An scanning electron microscopy (SEM) view of a micro gear pump with gear wheels of diameter 596  $\mu\text{m}$  [14,15].

**Table 3.** Gear wheel properties [15]

	Pump 1	Pump 2
Diameter $d_h$ ( $\mu\text{m}$ )	596	1192
Module $m$ ( $\mu\text{m}$ )	38	76
Engagement angle $\alpha_0$ ( $^\circ$ )	20	20
Distance of shafts $a_k$ ( $\mu\text{m}$ )	515	1030
Number of teeth $Z$	12	12
Height $h$ ( $\mu\text{m}$ )	500	500

**Table 4.** Summarized experimental results of the gear pumps [15]

	Pump 1	Pump 2
Diameter $d_h$ ( $\mu\text{m}$ )	596	1192
Displaced volume per revolution (nl)	82	213
Leak rate water ( $\mu\text{l min}^{-1} \text{hPa}^{-1}$ )	not measured	2.5
Leak rate water-glycerin ( $\text{nl min}^{-1} \text{hPa}^{-1}$ )	20.3	67

as centrifugal, electrohydrodynamic, electrostatic, magnetohydrodynamic etc. Working fluid depends on the type of the dynamic pump. For example,

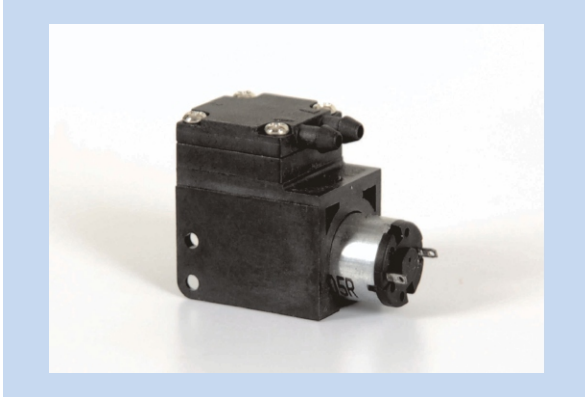
Tablo 6. Gıdip Gelime Yaratıştırmeli Mikro-Pompalar [13]

Yazar ve yıl	Sürücü	Valfler	Malzeme	Pompa odaları	Diyafram malzemesi	Sp (yaklaşık.) (mm <sup>2</sup> )	Diyafram kalınlığı (mm)	Kullanılan akışkan	V (V)	f (Hz)	µpmaks (kPa)	Qmaks (ml min <sup>-1</sup> )
van Lintel 1988	Piezoelektrik (yanal)	Kanat (Diaphragmanın gs mesa)	cam-Si-cam	1	Cam	4100	0.3 0.19	Su Su	125 100	0.1 1	24 9.8	0.0006 0.008
Stemme 1993	Piezoelektrik (yanal)	Sabit Geometri (Lüle-yayıcı)	Pirinç	1	Pirinç	2500	0.2	Su Su Hava	20 20 20	310 100 0 600 0	21 4.9 0.78	4.4 16 35
Gass 1994	Piezoelektrik (yanal)	Kanat (Diaphragmanın gs mesa)	cam-Si-cam	1	Cam	11800	0.3	Su	250	40	9	0.55
Carozza 1995	Piezoelektrik (yanal)	Ball	Polimer-Pirinç	1	Pirinç	1270	0.1	Su	300	70	25	2.7
Gerlach 1995	Piezoelektrik (yanal)	Sabit Geometri (Lüle-yayıcı)	Si-Si- cam	1	Cam	200	0.12	Su Metanol	50 50	300 0 500 0	3.2 7	0.39 0.32
Olsson 1995	Piezoelektrik (yanal)	Sabit Geometri (Lüle-yayıcı)	Pirinç	2 (P)	Pirinç	1600	0.35	Su	130	540	16	16
Olsson 1997	Piezoelektrik (yanal)	Sabit Geometri (Lüle-yayıcı)	Si-cam	2 (P)	Cam	260	0.5	Su	200	350 0	74	1.1
Bohm 1999	Piezoelektrik (yanal)	Kanat (Diaphragmanın gs mesa)	Kalip plastik	1	Pirinç	290	0.075	Su	350	50	12	1.9
Schabmu eller	Piezoelektrik	Sabit Geometri	Si-Si	1	Silikon	120	0.07	Etanol	190	240 0	1.0	1.5
Li 2000	Piezoelektrik (eksenel)	Kanat (Diaphragmanın gs mesa)	Si, Cam (7 tabakalı)	1	Silikon	3300	0.025 (Bossed)	Silikon Yağ	1200	350 0	304	3
Van de Pol 1990	Isil-pnömatik (hava)	Kanat (Diaphragmanın gs mesa)	cam-Si-Si	1	Silikon	3000	0.018	Su	6	1	5.1	0.034
Wego 2001	Isil-pnömatik (hava)	Kanat (Diaphragmanın gs mesa)	Basilmiş devre karı (4 tabakalı)	1	Polimid	780	0.0078	Su	---	2	12	0.53
Yoon 2001	Isil-pnömatik (Su/faz-değişimi)	Kanat (Cantilever)	Si-cam	1	Silikon kauçuk	72	0.03	Su	10	0.5	0.1	0.006
Bohm 1999	Elektromanyetik	Kanat (Diaphragmanın gs mesa)	Kalip plastik	1	Silikon kauçuk	1000	0.2	Su	5	50	10	2.1



Table 6. Reciprocating Displacement Micropumps [13]

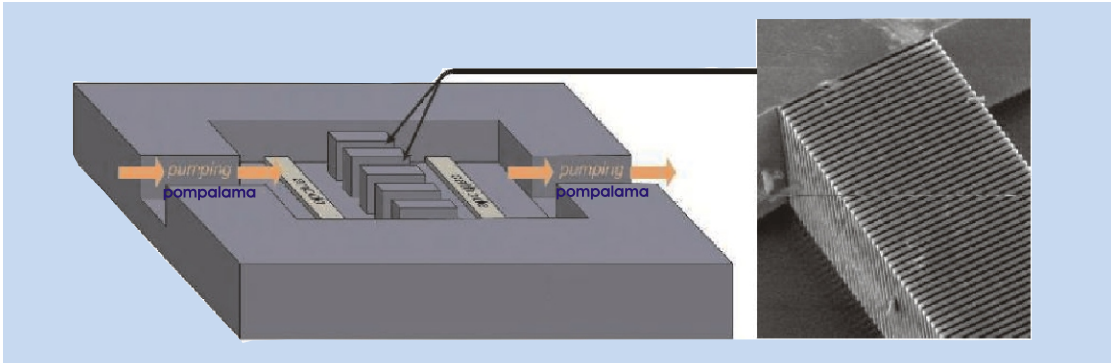
Author and year	Driver	Valves	Construction	Pump chambers	Diaphragm material	Sp (approx.) (mm <sup>3</sup> )	Diaphragm thickness (mm)	Working fluid	V (V)	f (Hz)	$\mu\text{pmax}$ (kPa)	Q <sub>max</sub> (ml min <sup>-1</sup> )
van Lintel 1988	Piezoelectric (lateral)	Flap (Diaphragm in gs mesa)	glas-Si-glass	1	Glass	4100	0.3 0.19	Water Water	125 100	0.1 1	24 9.8	0.0006 0.008
Stemme 1993	Piezoelectric (lateral)	Fixed Geometry (Nozzle-difuser)	Brass	1	Brass	2500	0.2	Water Water Air	20 20 20	310 1000 6000	21 4.9 0.78	4.4 16 35
Gass 1994	Piezoelectric (lateral)	Flap (Diaphragm in gs mesa)	glas-Si-glass	1	Glass	11800	0.3	Water	250	40	9	0.55
Carozza 1995	Piezoelectric (lateral)	Ball	Polymer-Brass	1	Brass	1270	0.1	Water	300	70	25	2.7
Gerlach 1995	Piezoelectric (lateral)	Fixed Geometry (Nozzle-difuser)	Si-Si-glass	1	Glass	200	0.12	Water Methanol	50 50	3000 5000	3.2 7	0.39 0.32
Olsson 1995	Piezoelectric (lateral)	Fixed Geometry (Nozzle-difuser)	Brass	2 (P)	Brass	1600	0.35	Water	130	540	16	16
Olsson 1997	Piezoelectric (lateral)	Fixed Geometry (Nozzle-difuser)	Si-glass	2 (P)	Glass	260	0.5	Water	200	3500	74	1.1
Bohm 1999	Piezoelectric (lateral)	Flap (Diaphragm in gs mesa)	Molded Plastic	1	Brass	290	0.075	Water	350	50	12	1.9
Schabmueller	Piezoelectric	Fixed Geometry	Si-Si	1	Silicon	120	0.07	Ethanol	190	2400	1.0	1.5
Li 2000	Piezoelectric (axial)	Flap (Diaphragm in gs mesa)	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> Glass (7 layers)	1	Silicon	3300	0.025 (Bossed)	Silicon Oil	1200	3500	304	3
Van de Pol 1990	Thermo-pneumatic (air)	Flap (Diaphragm in gs mesa)	glas-Si-Si	1	Silicon	3000	0.018	Water	6	1	5.1	0.034
Wego 2001	Thermo-pneumatic (air)	Flap (Diaphragm in gs mesa)	Printed circuit board (4 Layers)	1	Polyimide	780	0.0078	Water	---	2	12	0.53
Yoon 2001	Thermo-pneumatic (water/phase-change)	Flap (Cantilever)	Si-glass	1	Silicon Rubber	72	0.03	Water	10	0.5	0.1	0.006
Bohm 1999	Electromagnetic	Flap (Diaphragm in gs mesa)	Molded Plastic	1	Silicon rubber	1000	0.2	Water	5	50	10	2.1



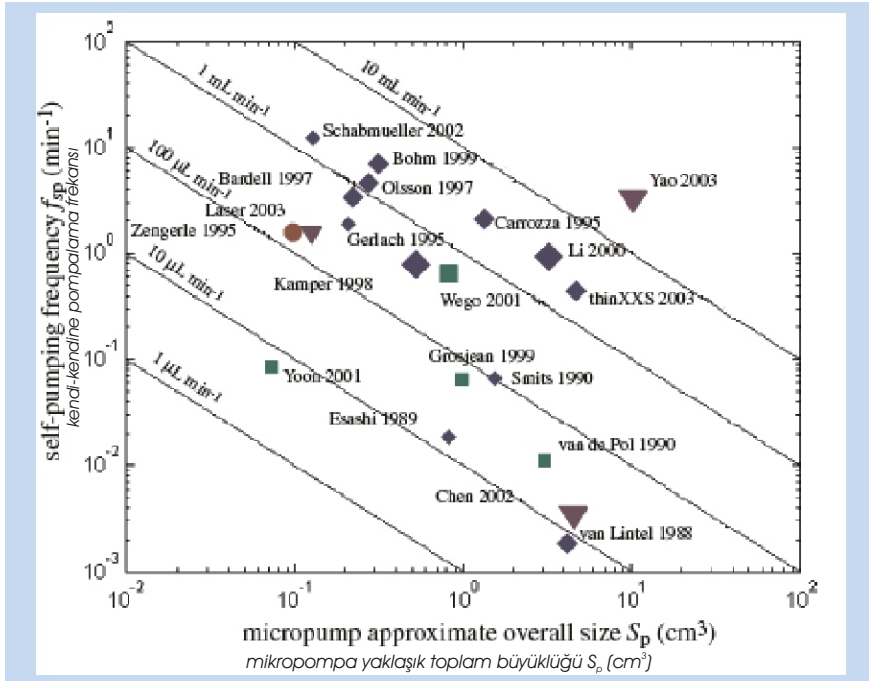
Şekil 9. Pnömatik mikropompa [16].  
Figure 9. Pneumatic micropump [16].

electroosmotic and some magnetohydrodynamic pumps may have various working fluids where as dielectric fluids are necessary for electrohydrodynamic pumps. Figure 10 gives an idea about an electroosmotic micropump for cooling electronic devices and a micromachined electrohydrodynamic micropump.

Figure 11 includes a comparison of piezoelectric, thermopneumatic and electrostatic driven reciprocating displacement micropumps and electroosmotic dynamic micropumps by considering the figures of merit for micropumps, namely, the flow rate, pressure generation



Şekil 10. Elektronik parçaların soğutması için elektroosmotik pompa [14].  
Figure 10. Electro osmotic micropump for cooling electronic devices [14].



Şekil 11. Çeşitli mikropompaların karşılaştırması [13]. ( $S_p$  : Paket Boyutu,  $f_{sp}$  : kendi-kendine pompalama frekansı)  
Figure 11. Comparison of several reported micropumps [13]. ( $S_p$  : package size,  $f_{sp}$  : Self-pumping frequency)

makinalı elektrodinamik pompalar hakkında fikir vermektedir.

Şekil 11 piezoelektrik, termopnömatik ve elektrostatik sürücülü gidip gelen yer değiştirmeli mikropompalarla, elektroozmotik dinamik mikropompaları; isimleri, akış oranları, basınç üretimleri ve genel boyutları ile sayarak kıyaslamalarını içerir. Laser ve Santiago [13] piezoelektrik sürücülü gidip gelme hareketi yapan mikro pompalar özel bir ilgi alanı konusu olduğunu ve ticari olarak ele alınabildiğini dinamik mikropompaların artan bir ilgi alanı olduğunu, elektroozmotik mikropompaların entegre devre ısı yönetiminin birkaç uygulama için uygulanabilir olduğunu belirtmişlerdir.

### Mikrotürbinler

Mikrotürbinler, durağan enerji üretimi uygulamalarında kullanılan yanmalı türbinlerin yeni bir tipidir. Mikrotürbinler üzerine birçok araştırmacı tarafından çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Kaneko vd. [17] biyokütle (organik atıklar) gaz ile yakılan küçük boyutlu SOFC-MGT hibrid sistemi üzerine çalışmıştır. Traverso vd. [18] Dıştan Yanmalı Mikro-Gaz Türbininin sürekli ve geçici rejimde elde edilen performanslarını göstermişler ve çevrimin kapalı durumda tasarımını gerçekleştirebilmek ve dinamik davranışlarını inceleyebilmek için birçok test uygulamışlardır.

Mikrotürbinlerin uygulamaları ve geniş açıklamaları Barney L.C.[19] tarafından verilmiş ve aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Şekil 12 ve 13'te görüldüğü gibi nispeten küçük boyutlarda hem ısı hem de elektrik üreten bir tip yanmalı türbinlerdir. Mikrotürbinler, diğer küçük boyutlardaki güç üretim teknolojilerine göre kıyaslandığında birçok avantaja sahiptir. Mikrotürbin güç üniteleri genel olarak iki sınıfa ayrılabilirler: Reküperatörsüz mikrotürbinler (ya da basit çevrimler) ve reküperatörlü mikrotürbinler [19]. Verimleri %15 iyileştirilmemiş ve %20-30 iyileştirilmiş olarak söylenebilir. Düşük NOx emisyon oranlarına (<9-50 ppm) sahiptirler.

and overall size. Laser and Santiago [13] concluded that piezoelectrically driven reciprocating displacement micropumps have been the subject of particular attention and now available commercially; Dynamic micropumps are a subject of increasing interest; Electroosmotic micropumps are emerging as a viable option for a number of applications, including integrated circuit thermal management.

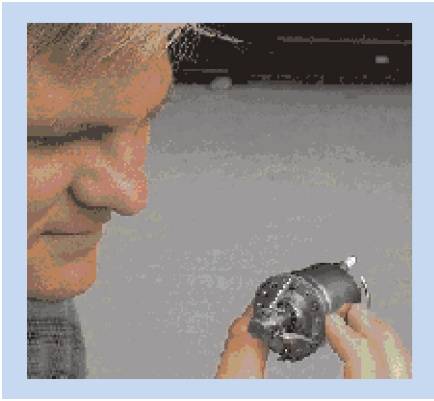
### Microturbines

Microturbines are the newest type of combustion turbines that are being used for stationary energy generation applications. Various studies about microturbines were made by several researchers. Kaneko et al. [17] studied a control strategy for a small sized SOFC-MGT hybrid system fueled by biomass gas. Traverso et al. [18] presented the steady-state and transient performance obtained by an Externally Fired micro-Gas Turbine (EFmGT) demonstration plant and performed several tests to assess the off-design behaviour of the cycle and then the dynamic behaviour.

The extended definitions and applications of microturbines are given by Barney L.C. [19] and summarized as follows:

They are a type of combustion turbines that produces both heat and electricity on a relatively small scale as shown in Figure 12 and 13. Microturbines offer several potential advantages compared to other technologies for small-scale power generation. Microturbine generators can also be divided into two general classes: unrecuperated (or simple cycle) microturbines and recuperated microturbines[19]. Their efficiencies are 15% (unrecuperated) and 20-30% (recuperated). They have low NOx(<9-50 ppm) emission.

Microturbines are small combustion turbines approximately the size of a refrigerator with outputs of 25 kW to 500 kW [19]. They evolved from automotive and

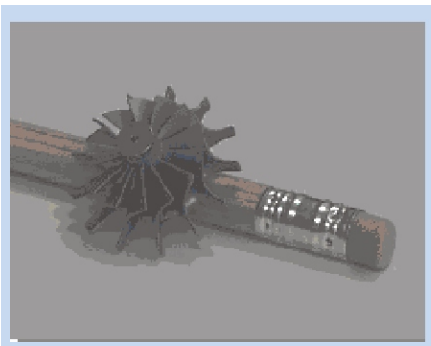


**Şekil 12.** Mikro hava araçları için mikrojet motorlar [20].

**Figure 12.** Microturbojet engine for micro air vehicles [20].

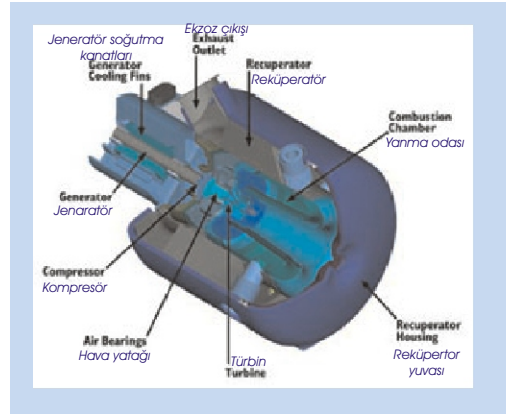
Mikrotürbinler, yaklaşık olarak bir soğutucu boyutlarında olup 25 kW'tan 500 kW'a kadar çıkış gücü olan küçük yanmalı türbinlerdir[19]. Bunlar, otomotiv ve kamyon turboşarj ünitelerinden, uçaklarda yardımcı güç üniteleri ve küçük jet motorları geliştirilmiştir. Çoğu mikrotürbinler yanma odası, kompresör, alternatör, türbin, reküperatör ve jeneratörden oluşur. Şekil 14 ve 15 bir mikrotürbinin kesit görünüşünü vermektedir.

Mikrotürbinler çoğunlukla dakikada 40,000 devir ile dönerler. Havalı veya yağlı yatak seçimi kullanıma bağlıdır. Dakikada 90,000 ile 120,000 gibi yüksek devir sayılarına sahip tek şaftlı mikrotürbinler kurulumu daha kolay ve ucuz olan tasarımlar olduğundan en yaygın olanıdır. Bunun tersine parçalı şaft, AC gücün frekansını



**Şekil 13.** Taşınabilir elektrik gücü için mikroturboalternatör [20].

**Figure 13.** Microturboalternator for portable remote electric power [20].

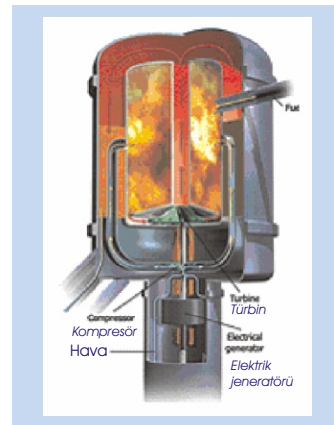


**Şekil 14.** Bir mikrotürbinin şeması [19].

**Figure 14.** Schematic of a microturbine [19].

truck turbochargers, auxiliary power units (APUs) for airplanes, and small jet engines. Most microturbines consist of a combustor, compressor, alternator, turbine, recuperator, and generator. The Figure 14 and 15 illustrates a cross-sectional view of a microturbine.

The microturbines generally rotate over 40,000 revolutions per minute. The bearing selection oil- or air-is dependent on usage. A single shaft microturbine with high rotating speeds of 90,000 to 120,000 revolutions per minute is the more common design, as it is simpler and less expensive to build. Conversely, the split shaft is necessary for machine drive applications, which does not require an inverter to change the frequency of the AC power [19]. Khanna [21] stated that Epstein have been made various studies on micro turbines under MIT Microengine Project. A microturbine is shown in Figure 16.



**Şekil 15.** Reküperatörlü mikrotürbin [19].

**Figure 15.** Recuperated microturbine [19].



değiştirecek dönüştürücüye ihtiyaç duymayan makine kullanma uygulamaları için gereklidir [19]. Khanna [21] Epstein'in MIT Mikromotor Projesi dahilinde mikrotürbinler üzerine birçok çalışmalar yaptığını ifade etmiştir. Bir mikro türbin Şekil 16'da gösterilmiştir.

### Mikro ve Minyatür Isı Boruları

İçinde sinterlenmiş toz metal halinde keçe bulunan ve doymuş sıvı ihtiva eden geleneksel ısı boruları (Şekil 17) ısı transfer cihazı olarak elverişlidirler. Isı borusunun çok önemli bir özelliği küçük bir sıcaklık düşümüyle boru boyunca büyük miktarlarda enerjiyi buharlaştırıcıdaki (ısı kaynağı) sıvının buharlaşması, yoğunlaştırıcıdaki (ısı kuyusu) buharın yoğunlaşması ve keçe içinde kılcal kuvvet yardımıyla ters yöndeki sıvı hareketi aracılığıyla aktarma yeteneğidir. Esas olan HP boyunca ısı akısının yönünü anlık olarak değiştirebilmesi ve HP'lerin ısıtma ve soğutma amaçlı kullanılabilmesidir [22].

Mikro ısı borularındaki (MHP) mikro kanallar küçük hidrolik çaplarındaki akışkan akışının olduğu kanallardır. MHP'lerin hidrolik çapları 10-500  $\mu\text{m}$ , minyatür ısı borularının (mHP) hidrolik çapları 2-4 mm aralığındadır [23]. MHP'ler sensör ve pompalarda, elektronik kol saatlerinde, aktif data aktarma sistemlerinde, sıcaklık ölçüm görüntüleme sistemlerinde ve sıcaklık uyarı sistemlerinde kullanılmaktadır. MHP'ler aynı zamanda bazı biyolojik mikro-nesnelerin ısıtılması ve soğutulmasında ümit vermektedir [22].

Minyatür HP'lerde sinterlenmiş gözenekli ince kanallara sahiptir. Üçgensel küçük oluklar şeklinde metal iki duvar



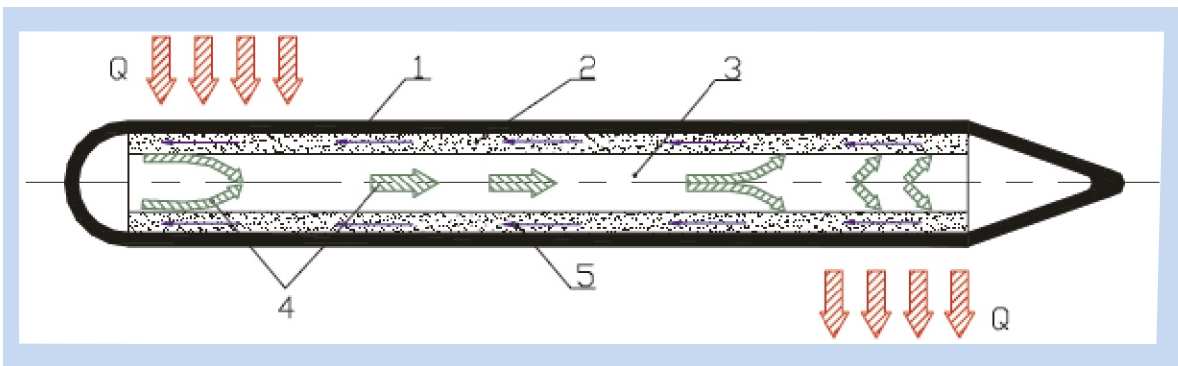
Şekil 16. Bir yonga tabanlı türbinin prototipi [21].

Figure 16. A prototype of a chip-based turbine [21].

### Micro and Miniature Heat Pipes

Conventional heat pipes (Figure 17) with sintered metal powder wick inside saturated with liquid are convenient as heat transfer devices. A very important feature of the heat pipe (HP) is the ability to transport a large amount of energy over its length with a small temperature drop by means of liquid evaporation at the HP evaporator (heat source), vapour condensation at the condenser (heat sink) and liquid movement in the opposite direction inside a wick by capillary force. Essential is the possibility to change the direction of heat flow along the HP in time and to use HPs for cooling and heating alternately [22].

Microchannels in micro-heat pipe (MHP) are fluid flow channels with small hydraulic diameters. The hydraulic diameter of MHPs is on the order of 10-500  $\mu\text{m}$ , the hydraulic diameter of miniature heat pipe (mHP) is

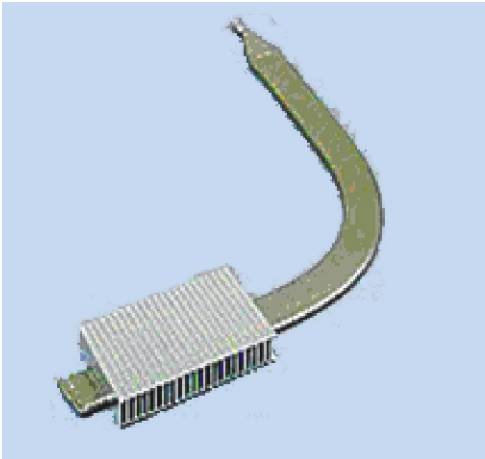


Şekil 17. Geleneksel ısı borusu şeması. (1) HP kabı, (2) gözenekli fitil, (3) buhar kanalı, (4) buhar ve, (5) sıvı [22].

Figure 17. Conventional heat pipe schematic. (1) HP case, (2) porous wick, (3) vapour channel, (4) vapour, and (5) liquid [22].

arasının iç yüzeyine yerleştirilmiş bu ince kanallar mikro ısı boruları gibi çalışırlar.

Aracı akışkan olarak su, metanol ve propan kullanılmaktadır. mHP'ler genellikle düz veya düzeltilmiş (1-3 mm kalınlık), 4-6 mm genişlikte ve 150-300 mm uzunluktadır [23]. Launay vd. [24] elektronik soğutma amaçları için geliştirdikleri silikon yapıtlı ince kanalların içine yerleştirilmiş mikro ısı boruları üzerine çalışmışlardır. Lefèvre ve Lallemand [25] düz MHP duvarları içinde hem sıvı hem de buhar akışı için MHP duvarlarındaki sıcaklığın analitik çözümü için bazı çözümler ortaya koymuşlardır. Bağlanmayan devre kartlarından ısı geçişini artırabilmek için geliştirilen 90° eğimli MHP'lerin etkili bir keçe tasarımına ihtiyacı vardır, Şekil 18.



**Şekil 18.** Mikro-ısı boruları kullanan bir yüksek performans ısı kuyusu [26].

**Figure 18.** A high performance heat sink using micro heat-pipes [26].

Alüminyum ve bakır şeritler ısı kuyusunun üzerinde sırasıyla 40 °C'den 95 °C'ye sıcaklık artışı gösterirken bazı mHP'ler boru boyunca ısı kuyusu üzerinde sadece 5-7 °C'lik sıcaklık artışıyla neredeyse izotermal sıcaklık bölgesini sağlarlar.

### Kryojenik-Soğutucular

Düşük sıcaklıklarda çalışan sistemler kryojenik soğutucular olarak tanımlanırlar. Kryojenik sıcaklık aralığı 120 K'nin altındaki sıcaklıklar olarak tanımlanırlar ve kryojenik soğutucular kryojenik sıcaklıktan oda sıcaklığına kadar olan aralıkta çalışırlar.

on the order 2-4 mm [23]. MHPs are interesting to be used in implanted neural stimulators, sensors and pumps, electronic wrist watches, active transponders, self-powered temperature displays, temperature warning systems. MHPs are promising to cool and heat some biological micro-objects [22].

Miniature HPs have a sintered porous wafer with arteries. This wafer is sintered between two metal walls with triangular mini-grooves on its inner surface working as micro-heat pipes. Working fluid is water, methanol and propane. The mHPs are used often flat, or flattened (1-3 mm thick), 4-6 mm in width and 150-300 mm in length [23]. Launay et al. [24] studied micro-heat pipe arrays etched into silicon wafers have been investigated for electronic cooling purposes. Lefèvre and Lallemand [25] presented an analytical solution for both the liquid and vapour flows inside a flat micro-heat pipe (MHP) coupled to an analytical solution for the temperature inside the MHP wall. The mHPs require an effective wick design because they are made with 90° bend to improve heat transfer from circuit boards that do not plug in, Figure 18.

Some mHPs ensure nearly isothermal temperature field along its entire length with a temperature rise above the sink only 5-7°C, when the copper and aluminum strips exhibit a temperature rise above the heat sink near 40°C to 95°C respectively [27].

### Cryocoolers

The systems work in the lower temperatures defined as cryogenic refrigerators. Cryogenic temperature range defined as temperatures below 120 K and cryogenic refrigerators operates in the temperature range from cryogenic up to room temperature.

Radebaugh [28] summarized the ways to achieve cryogenic temperatures as follows: First, the solubility of lubricating oil in the working fluid at such low temperatures is extremely small and excess will freeze and cause plugging of the expansion channels; thus

Radebaugh [28] kroyjenik sıcaklıkların gerçekleştirildiği yolların şu şekilde özetlemiştir: Birincisi, böyle düşük sıcaklıklarda, aracı akışkandaki makine yağının çözünebilirliği oldukça düşüktür ve fazla olanlar donar ve genişleme kanallarının tıkanmasına neden olur; bu yüzden kompresör yağsız olmalıdır ya da sistem böyle düşük sıcaklıklara ulaşmadan önce yağı uzaklaştırmak için karmaşık proses sistemi kullanımında yağ ayırıcı ekipmana sahip olmalıdır; ikincisi oda sıcaklıklarından kroyjenik sıcaklıklara gerçekleşen izentalpik (sbt. entalpi) işlemlerinde genişleyebilecek bir sıvının olmaması gerekir ve hatta iyileştirme işlemi ile ilgili basınç genişleme sonrası böyle sıcaklıklar gerçekleştirmek için ilk basıncın çok yüksek olması gerekir. Böylece Joule-Thomson kroyjenik-soğutucudaki gibi genişlemeden önce yüksek basınçlı gaza ön soğutma gereklidir.

Radebaugh [28] geçmiş yıllarda kroyjenik sıcaklıkların genel olarak rejeneratif kroyjenik-soğutucuların kullanımı ile gerçekleştirildiğini rapor etmiştir. Termo akustik, Stirling vuruş tüplü soğutucu gibi rejeneratif ısı sistemlerde minyatürleştirme artan çalışma frekansları ile sağlandı. Stirling kroyjenik-soğutucu ve vuruş tüplü kroyjenik-soğutucu tipik olarak 20'den 70 Hz'e kadar olan frekans aralıklarında çalışırlar ve kompresörlerinde valf yoktur. Yüksek frekanslı Stirling kroyjenik-soğutucularda valf eksiği soğutucuya yüksek verim sağlar.

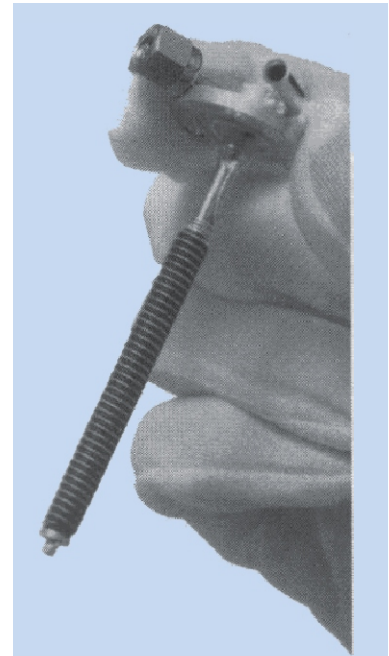
Yüksek çözünürlüklü gece görüşü için kızıl ötesi sensörlerin 80 K civarına soğutulması kroyjenik-soğutucuların en büyük uygulamalarından bir tanesidir. Şekil 19 kızıl ötesi sensörlerin hızlı soğutulmasında kullanılan küçük Joule-Thomson kroyjenik-soğutucuların soğuk ısı değiştirgecini ve genişleme ağızını göstermektedir. Joule-Thomson kroyjenik-soğutucusunun soğuk ucunda hareketli parça olmamasından dolayı küçük ölçekte olabilir [28].

Görüntüleme işlemi için genel olarak kızıl ötesi sensörlerin 80 K'e soğutulmasının ticari uygulamalarında kullanılan küçük ticari Stirling kroyjenik-soğutucuları şekil 20'de görülmektedir. 80 K'de 0.15 W'lık bu soğutucuda sadece 3 W'lık giriş gücüne ihtiyaç duyulmaktadır.

the compressor must be oil free or the system must have oil removable equipment utilizing complex process to remove the oil before it reaches such low temperatures; second, no fluid exists which can be expanded in an isenthalpic process from room temperature to cryogenic temperatures; even with a recovery process the initial pressure would need to impractically high to achieve such low temperature after expansion; thus, it is necessary to precool the high pressure gas in heat exchanger prior to the expansion like in the Joule-Thomson cryocooler.

In the past decades cryogenic temperatures are commonly achieved by the use of regenerative cryocoolers which have been reported by Radebaugh [28]. In regenerative thermal systems, such as thermoacoustic, Stirling, and pulse tube refrigerators, miniaturization is often accompanied by increased operating frequencies. The Stirling cryocoolers and some pulse tube cryocoolers typically operate at about 20 to 70 Hz frequency and have no valves in compressor. The lack of valves in the higher frequency Stirling cryocoolers gives them higher efficiency.

The cooling of infrared sensors to about 80 K for high resolution night vision, primarily for the military has been one of the largest applications of cryocoolers. Figure 19 shows the cold heat exchanger and expansion orifice of a small Joule-



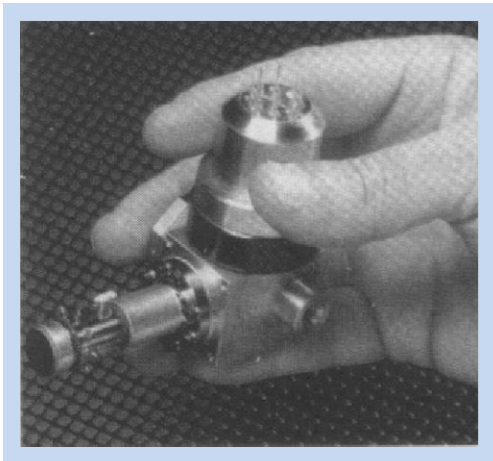
Şekil 19. Joule-Thomson mikro-kroyjenik soğutucu [28].  
Figure 19. Joule-Thomson micro cryocooler [28].

Şekil 21'de kızıl ötesi sensörlerini ya da uzay uygulamalarında  $T_c$  süper iletken elektroniklerinin soğutulması için geliştirilen minyatür vuruş tüplerini göstermektedir. 80 K'de 0.5 W'lık soğutma gücü sağlar. Soğuk yüzey bu parçaların ortasındadır.

Yüksek frekanslı yeniden yapılandırılmalı kroyojenik soğutucular, ısı girişim az olması gerektiğinden, hidrolik çapları genel olarak 50  $\mu\text{m}$ 'den az olanları kullanılmaktadır.

Uzay uygulamaları ayrıca mikro ölçekli ısı değıştirgecindeki büyük ilgiyle meydana gelen kroyojenik soğutucuların boyutlarının azaltılmasından yararlanırlar.

Uzay ve askeri uygulamaların yanında kroyojenik soğutucu kateter gibi tıbbi uygulamalarda da kullanılırlar. 3 mm yada daha düşük çaplı kateterler, atar ve toplar damarlar boyunca iç organlara geçme yeteneğine sahiptir. Tıp camiasına, vücudu kesmeden dahili organların üzerinde cihazlarla operasyon yapabilmeyi sağlar. Sonuç olarak kateter kullanımı iyileşme süresini hızlandırır, maliyetleri azaltır ve sıkça riskleri azaltır. Kroyojenik kesip-çıkarma süresince kanser, tümör yada yanlış işlevli dokular gibi istenmeyen dokuların alımı kroyojenik kateterlerle gerçekleşir. Radebaugh [29] kroyojenik kateterleri ve tıp bilimindeki uygulamaları çalışmış ve bazı durumlarda Joule-Thomson çevriminin yüksek ve düşük basınçlı akışkanların arasında minyatür ısı değıştirgecine soğuk uçta ihtiyaç



Şekil 20. Stirling mikro-kroyojenik soğutucu [28].  
Figure 20. Stirling micro cryocooler [28].

Thomson cryocooler used to rapidly cool infrared sensors. Because there are no moving parts at the cold end of the joule Thomson cryocooler it can be scaled down to smaller sizes [28].

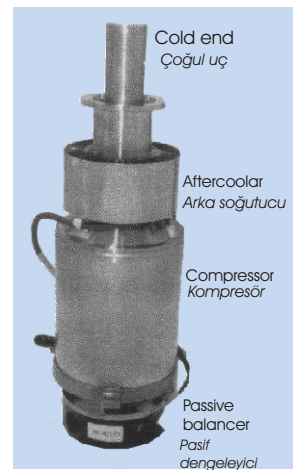
The smallest commercial Stirling cryocooler used primarily for commercial applications of infrared sensor cooling to 80 K, such as for process of monitoring is shown in Figure 20. Only 3 W of input power are required for this cooler to produce 0.15 W of cooling at 80 K.

Figure 21 shows a miniature pulse tube cooler developed for cooling infrared sensors or high  $T_c$  superconducting electronics in space applications. It provides about 0.5 W of cooling at 80 K. The cold surface is in the middle between these components.

Hydraulic diameters less than 50  $\mu\text{m}$  are commonly used in high frequency regenerative cryocoolers since the hydraulic diameters must be less than thermal penetration.

Space applications also benefit from a reduction in the size of cryocoolers, which has brought about considerable interest in microscale heat exchangers.

Besides the space and military applications the cryocoolers are used in medical applications such as catheters. Catheters with diameters of 3mm or smaller are capable of accessing many internal organs through arteries and veins. They provide the medical community with tools to operate on internal organs without the need to cut through the body to gain access. As a result the use of catheters greatly speeds recovery times, reduces costs, and often reduces risks. The removal of unwanted tissue, such as cancer tumors or malfunctioning



Şekil 21. Stirling kroyojenik soğutucu [28].  
Figure 21. Stirling cryocooler [28].



duyulacağını ve böyle ısı değiştirgeçlerinde 100  $\mu\text{m}$ 'den az hidrolik çapların yüksek verim ve yüksek ısı akısı yoğunluğu sağlayacağını not etmiştir. Dik sıcaklık basamaklarına, normal dokulara fazla zarar vermeden kanser tümörleri ya da istenmeyen dokuların yok edilmesi için ihtiyaç vardır. Böyle bir ihtiyaç kateter ucunu mümkün olduğunca soğutarak karşılanabilir. Bununla beraber Joule-Thomson çevrimi ile böyle düşük sıcaklıkları gerçekleştirebilmek yüksek soğutucu akısına ihtiyaç duyar çünkü düşük sıcaklık soğutucularının buharlaşma ısısı yüksek kaynama noktası olan soğutucudan daha azdır. Soğutucu akış oranı kateter çapıyla sınırlıdır [29].

Şekil 22'de buz topla çevrilmiş tipik kateter uç görünmektedir. Soğutucu uca küçük tüpler gelir. Soğutucu ucun içinden ısı emer ve eş eksenli tüplerle oluşturulmuş halkalı bölgede uçtan ayrılır. Pek çok durumda soğutucu, kateterleri terk edince, atmosfere çıkar. Başka durumlarda küçük iç tüpler boyunca kateterde çevrilmek üzere kompresöre giriş yapar [29].

Eğer kateter boyunca sıcaklık vücut sıcaklığındaysa ve sadece uç kısmı soğutuluyorsa, tasarım amacı olan 150 K'nin altındaki sıcaklıklarda, kateter ucunda minyatür ısı değiştirgeci içermelidir. Şekil 23 ısı değiştirgecinin ve kateterin ucunun fotoğrafıdır. Soğuk uçtaki mikro ısı değiştiricileri paslanmaz çelik pullarla ardışık bakırın delinmiş plakalarla birleştirilmesiyle imal edilir. Şekil 24'de



**Şekil 22.** Buzla çevrilmiş eşeksenli kateterin kesit görünüşü [29]

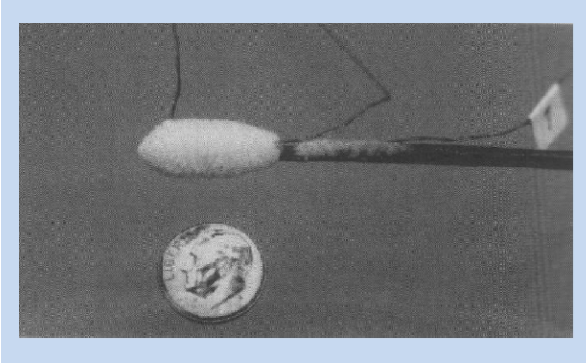
**Figure 22.** Cutaway view of a coaxial catheter surrounded by an ice ball [29].

tissue can be carried out through cryoablation with cryogenic catheters. Radebaugh [29] studied the cryogenic catheters and their applications in medical science and noted that in some cases a miniature heat exchanger between high and low pressure streams of a Joule-Thomson cycle may be required at the cold tip and hydraulic diameters less than 100  $\mu\text{m}$  are required in such miniature heat exchangers to provide high effectiveness and high heat flux densities. Steep temperature gradients are required for the destruction of cancer tumors or other unwanted tissue without excessive damage to surrounding normal tissue. Such a requirement can be met by making the catheter tip as cold as possible. However, achieving lower temperatures with a Joule-Thomson cycle requires higher refrigerant flow rates because the heat of vaporization of lower temperature refrigerants is less than that of refrigerants with higher boiling points. The refrigerant flow rate is limited by the catheter diameter [29].

A typical cryogenic catheter tip with a surrounding ice ball is shown in Figure 22. The refrigerant is brought in to the tip through the smaller inside tube. The refrigerant absorbs heat from inside the tip and exits from the tip through the annular region formed by the coaxial tubes. In many cases the refrigerant may be vented to the atmosphere once it leaves the catheter. In other cases it will enter a compressor to be circulated back into the catheter through the small inner tube [29].

If the length of the catheter is to be at body temperature and only the tip is to be cooled, a miniature heat exchanger must be incorporated in the catheter tip when temperatures below 150 K are required which is the design goal. Figure 23 is a photo of the heat exchanger and tip of the catheter. The micro-heat exchanger at the cold end is fabricated by diffusion bonding perforated plates of copper alternated with stainless steel spacers. The catheter shown in Figure 24 fast cool downs and warm ups of about 2 minutes between room temperature and 150K. The lowest temperature achieved was 85K with no load on the cold end. Typical

gösterilen kateter oda sıcaklığı ve 150 K arasında 2 dakika civarında hızlı ısınır ve soğur. Soğuk uçta yüksüz gerçekleştirilen en düşük sıcaklık 85 K'dir. Tipik çalışma koşulları soğuk uca ilave ısı eklenmesinin 3 W olmasıyla 140 K'dir.



**Şekil 23.** Bir dime (= 10 sent) yanında kateter soğuk ucu [29].  
**Figure 23.** Catheter cold end resting on dime [29].

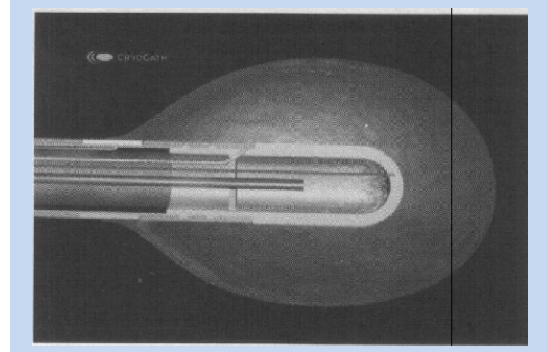
#### Absorpsiyonlu Isı Pompaları

Kloroflorokarbon (CFC) bileşeninin ozon tabakası üzerinde yıkıcı etkileri, araştırmaları alternatif soğutma sistemlerine yöneltmiştir. CFC'nin yıkıcı etkilerini azaltmak için ve küresel ısınma için çeşitli sistemler yoğun olarak çalışılmıştır. Bu problemlere cevaplardan biri CFC-tabanlı ozona zarar veren iklimlendirme cihazlarının alternatifleri olan çevreci Absorpsiyonlu Isı Pompalarının kullanımınıdır. Absorpsiyon sistemleri genel olarak iki çeşit akış çifti kullanır. Amonyak-su çifti sıvı ve buhar fazlarını her ikisinde sıcaklık ve konsantrasyon basamaklarının

**Tablo 7.** Absorplayicili prototip boyutları [30]

Boru dış çapı, mm	1.575
Boru iç çapı, mm	1.067
Boru duvar malzemesi ve ısı iletkenliği	Paslanmaz Çelik,
Boru boyu, m	0.140
Sıra başına boru sayısı	27
Geçiş başına boru sayısı	16
Geçiş sayısı	5
Boru çapraz aralığı, mm	4.76
Sıra dikey aralığı, mm	4.76
Emici yüksekliği, m	0.508
Toplam yüzey alanı, m <sup>2</sup>	1.50

operating conditions were 140 K with about 3 W of additional heat added to the cold end.



**Şekil 24.** Havaya maruzken 140 K'e soğutulma sırasında ucunda mikro-ısı değiştirgeçli kroyjenik kateterler [29].  
**Figure 24.** Cryogenic catheter with microheat exchanger in tip during cooling to 140 K while exposed to air [29].

#### Absorption Heat Pumps

The destructive effect of chlorofluorocarbons (CFC) compounds on ozone layer prompted the researches to alternative refrigeration systems. To decrement the destructive effect of CFC and the global warming various systems are studied heavily. One response to this problem is the use of the absorption heat pumps which are environmentally sound and energy-efficient alternatives to CFC-based, ozone depleting space-conditioning systems. Absorption systems commonly utilize two different kinds of fluid pairs. The ammonia-water fluid pair has a volatile absorbent, presenting heat and mass transfer resistances across the respective

**Table 7.** Prototype absorber dimensions [30]

Tube outer diameter, mm	1.575
Tube inner diameter, mm	1.067
Tube wall material and thermal conductivity	Stainless Steel,
Tube length, m	0.140
Number of tubes per row	27
Number of rows per pass	16
Number of passes	5
Tube transverse pitch, mm	4.76
Row vertical pitch, mm	4.76
Absorber height, m	0.508
Total surface area, m <sup>2</sup>	1.50

kendilerini ısı ve kütle geçişi direnci boyunca gösteren buharlaşabilen emiciye sahiptir. Amonyak su akışkan çifti sıvı buhar ara yüzeyinde sıvıdan soğutucuya geçiş olması gereken absorbe edilen ısının bir miktarını serbest bırakır [30].

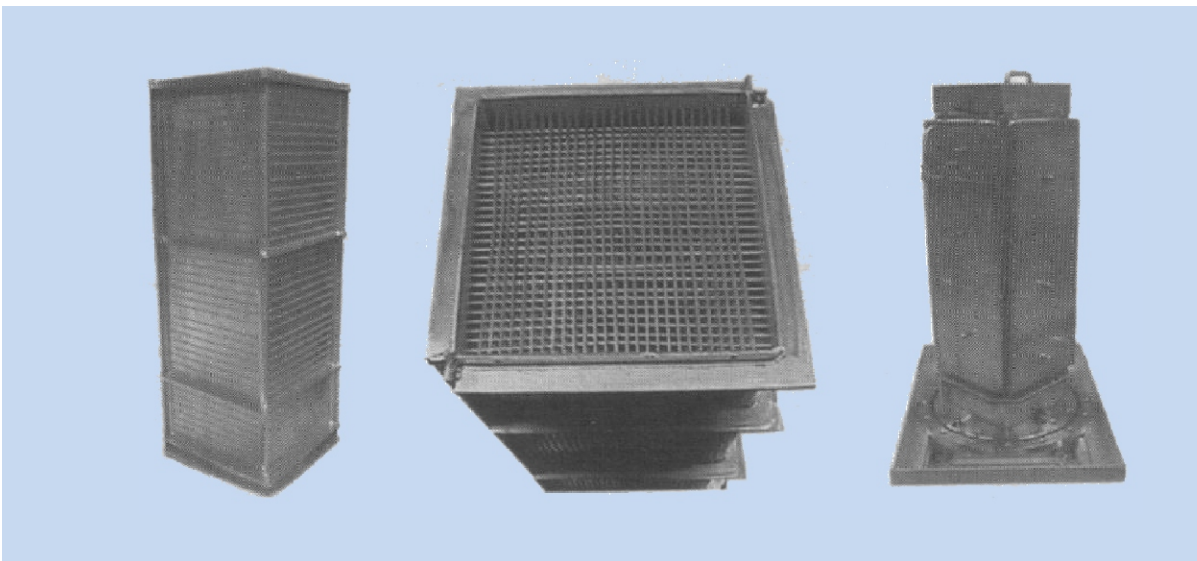
Garimella [30], giriş modeli olarak seçilen tipik tasarım koşullarıyla tek-etkili ısı pompasında hidrolik soğutuculu emici tasarımını yapmak için kullanılan amonyak-su absorpsiyonu için yarı ampirik model geliştirdi. Bu emici 10.55 kW özel ısı pompası soğutma yükü için ve 19.3 kW absorpsiyon yükü için tasarlandı. Analizde sonuç tasarımı 1.587 mm x 17 mm lik 40 uzun tüplü 15 tüp sıralı 5 geçişten oluşur. Emici prototipi bu analize bağlı olarak imal edilmiştir. Şekil 25 ve Tablo 7 emici tüp düzenini, tüpün kesit yapısını ve termokupullar ile levha kaplamaları sırasıyla gösterir.

Garimella buharlaşabilen emiciler yanında buharlaşamayan emicileri de çalışmıştır [30]. Garimella tarafından geliştirilen distribütör bütün sıra boyunca tüplerin üzerinde damla oluşmasını çözümü sağlayan tabanda pirinç ile kaplanmış 15.9 mm uzunluğunda pek çok mikrokanala sahip tabalardan oluşur [30].

temperature and concentration gradients in both the liquid and vapour phases. The ammonia-water fluid pairs release a considerable amount of heat of absorption at the vapour-liquid interface that must be transferred across a liquid into the coolant [30].

The semi-empirical model for ammonia-water absorption developed by Garimella [30] was used to design a hydraulic cooled absorber for a single-effect heat pump with representative design conditions selected as inputs to the model. This absorber was designed for a 10.55 kW cooling load residential heat pump i.e. an absorption load of about 19.3 kW. The resulting design in that analysis consisted of 5 passes of 15 tube rows each with 40, 1.587mm OD x 127 mm log tubes per row. A prototype absorber was fabricated based on the analyses. Figure 25 and Table 7 shows the absorber tube array, crisscross structure of the tube, baffle covers with thermocouples, respectively.

Besides the volatile absorbents, non volatile absorbents are studied empirically by Garimella [30]. The distributor developed by Garimella [30], the tray has numerous microchannel tubes of 15.9 mm length brazed into the bottom to ensure that solution supply droplets form directly above the tubes across the entire array.



Şekil 25. Mikrokanal absorplayıcı prototipi [30].  
Figure 25. Microchannel absorber prototype [30].

Minyatürleşmeyle ilgili iki önemli gözlem yapılmıştır; birincisi mikrokanal tüpleri kullanımı amonyak-su gibi buharlaşabilen emicili buharlaştırıcı sistemlerde parça boyutlarında önemli azalmalara neden olur. İkincisi sıvı faz akışı üç modelde gerçekleşir: Düşen film, damla formasyonu, damla düşüşü etkisidir [31].

Killion ve Garimella [31], düşen film absorpsiyonunda ısı ve kütle geçiş çiftinin modellenmesi üzerine çalışmışlardır. Killion ve Garimella [32] ısı ve kütle absorpsiyonu LiBr/H<sub>2</sub>O'nun laminer dikey filmde absorplamanın özellikle basitleştirilmiş hali üzerine odaklanmışlar ve damlacıklar ve Waveson yatay tüp ve film hidrodinamiği yüzey ıslaklığı ve buhar fazındaki ısı geçişi işlemlerinde ısı ve kütle geçişinin potansiyel etkileşimi üzerine yoğunlaşmışlardır.

## SONUÇ

En çok bilinen akışkan-MEMS araçları, tasarım parametrelerini anlamayı sağlamak için, araştırılmıştır.

Mikro-ısı değiştiriciler, mikropompalar, mikrotürbinler, mikro ve minyatür ısı pompaları, kriyojenik-soğutucular ve absorpsiyonlu ısı pompaları ayıncı özellikleri belirtilerek tanımlanmıştır. Yakın gelecekte büyüyecek pazar için, son on yılda ortaya çıkan MEMS araştırmaları, önemli kanıttır.

## KAYNAKÇA

1. <http://www.memscap.com/profile.html>, (2006)
2. **Tuckerman D. B. and Pease R. F. W.**, High Performance Heat Sinking for VLSI, IEEE Electron Device Lett., vol.2, pp.126-129, (1981)
3. **Jiang L., Mikkelsen J., Koo J., Huber D., Yao S., Zhang L., Zhou P., Maveety J.G., Prasher R., Santiago J.G., Kenny T.W. and Goodson K.E.**, Closed-Loop Electroosmotic Microchannel Cooling System for VLSI Circuits, IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, Vol. 25, No.3, (2002)
4. **Bau H.H.**, Optimization of Conduits' Shape in Micro Heat exchangers, Int. J. Heat and Mass Transfer 41 (1998)2717-2723.

Two key observations are made about the miniaturization; First, the use of microchannel tubes leads to considerable reductions in component size for absorption systems with volatile absorbents such as ammonia water. Second, the liquid phase flow occurs in three models: falling-film, droplet formation and droplet fall / impact [31].

Killion and Garimella [31] reviewed the models of coupled heat and mass transfer in falling film absorption. Killion and Garimella [32] found that heat and mass transfer absorption focused on the particularly simplified case of absorption in laminar vertical films of LiBr/H<sub>2</sub>O and the attention must be paid to droplets and waveson horizontal tubes and the potential interaction of the heat and mass transfer process on the film hydrodynamics, surface wetting, and heat transfer in the vapour phase.

## COCLUSION

The most famous fluidic-MEMS devices have been investigated to provide an insight into their design parameters.

Micro-heat exchangers, micropumps, microturbines micro and miniature heat pipes, cryocoolers and absorption heat pumps have been introduced by indicating their distinctive features. Emerging researches during the last decay on MEMS have been important evidence for the growing market in near future.

5. **Gao P., Person S. L. and Favre-Marinet M.**, Scale Effects on Hydrodynamics and Heat Transfer in Two-Dimensional Mini and Microchannels, Int. J. Thermal Sciences 41 (2002) 1017-1027.
6. **Philips R. J.**, Microchannel Compact Heat Exchanger, in Compact Heat Exchangers Ed. by R. K. Shah, A.D. Kraus and D. Metzger, (1990)
7. **Dickinson R. D., Novotny S., Vogel M and Dunn J., A** System Design Approach To Liquid-cooled Microprocessors, Proceedings of 2002 Inter Society Conference on Thermal Phenomena, pp.413-420.
8. **Harris C., Kelly K., Wang ., McCandless A. and Motakef S.**, Fabrication, Modeling, and Testing of



- Micro-Cross-Flow Heat Exchangers, J. Microelectromechanical Systems, Vol.11, No.6, (2002)
9. [Http://www.pnl.gov/microcats/fullmenu/microheatexch.html](http://www.pnl.gov/microcats/fullmenu/microheatexch.html); (2006)
  10. **Lee H., Shin J., Kim M. and Chun K.**, Package Embedded Heat Exchanger for Stacked Multi-chip Module, MINT, Seoul National University, [www.mrs.org.sg/icmat2005/downloads/SymF-Template.doc](http://www.mrs.org.sg/icmat2005/downloads/SymF-Template.doc), (2006)
  11. [http://me.lsu.edu/tier/ni\\_micro.html](http://me.lsu.edu/tier/ni_micro.html), (2006)
  12. <http://hikwww4.fzk.de/imvt/englisch/micro.htm>, (2006)
  13. **Laser D.J. and Santiago J.G.**, A Review of Micropumps, J. Micromech. Microeng. 14 (2004) R35-R64.
  14. **TU Delft**, Technische Universiteit Delft, <http://www.tudelft.nl>, (2006)
  15. **Döpfer J, Clemens M, Ehrfeld W, Jung S,** Kamper K-P and Lehr H, Micro Gear Pumps for Dosing of Viscous Fluids, J. Micromech. Microeng., Vol. 7, (1997), 230-232.
  16. [Http://www.chinamicropump.com/CMP-111.htm](http://www.chinamicropump.com/CMP-111.htm), (2006)
  17. **Kaneko T., Brouwer J., Samuelsen G.S.**, Power and temperature Control of Fluctuating Biomass Gas Fueled Solid Oxide Fuel Cell And Micro Gas Turbine Hybrid System, Journal of Power Sources, Article in Press
  18. **Traverso A., Massardo A.F., Scarpellini R.**, Externally Fired micro-Gas Turbine: Modelling and Experimental Performance, Applied Thermal Engineering, Article in Press
  19. **Barney L. Capehart, PhD**, CEM College of Engineering, University of Florida, <http://www.wbdg.org/design/microturbines.php>
  20. <http://www.m-dot.com/page8.html>, (2006)
  21. **Khanna R.**, MEMS Fabrication Perspectives From the MIT Microengine Project Surface and Coatings Technology, Vol. 163 164, (2003) 273280
  22. **Vasliev L.L.**, Micro and Miniature Heat Pipes Electronic Component Coolers, Applied Thermal Engineering, Vol. 25, (2005) 119.
  23. **Vasliev L.L.**, Micro and Miniature Heat Pipes, in Microscale Heat Transfer - Fundamentals and Applications Ed. by Kakac S., Vasilev L.L., Bayazitoglu Y., Yener Y., Nato Science Series Vol. 193, (2005) 413-428.
  24. **Launay S., Sartre V.**, Lallemand M., Experimental Study on Silicon Micro-heat Pipe Arrays Applied Thermal Engineering, Vol. 24, (2004) 233243.
  25. **Lefèvre F., Lallemand M.**, Coupled Thermal and Hydrodynamic Models of Flat Micro Heat Pipes for the Cooling of Multiple Electronic Components, Applied Thermal Engineering, (2006) Article in Press.
  26. [http://www.furukawa.co.jp/english/what/mhpd000417\\_e.htm](http://www.furukawa.co.jp/english/what/mhpd000417_e.htm), (2006)
  27. **Vasilev L.L.**, Heat Pipes in Modern Heat Exchangers, Applied Thermal Engineering, Vol. 25, (2005) 119.
  28. **Radebaugh R.**, Microscale Heat Transfer at Low Temperatures, in Microscale Heat Transfer - Fundamentals and Applications Ed. by Kakac S., Vasilev L.L., Bayazitoglu Y., Yener Y., Nato Science Series Vol. 193, (2005) 93-124.
  29. **Radebaugh R.**, Heat Transfer Issues in Cryogenic Catheters, in Microscale Heat Transfer - Fundamentals and Applications Ed. by Kakac S., Vasilev L.L., Bayazitoglu Y., Yener Y., Nato Science Series Vol. 193, (2005) 445-464.
  30. **Garimella S.**, Binary-Fluid Heat and Mass Transfer in Microchannel Geometries for Miniaturized Thermally Activated Absorption Heat Pumps, in Microscale Heat Transfer - Fundamentals and Applications Ed. by Kakac S., Vasilev L.L., Bayazitoglu Y., Yener Y., Nato Science Series Vol. 193, (2005) 339-368.
  31. **Killion J.D. And Garimella S.**, A Critical Review of Models of Coupled Heat and Mass Transfer in Falling-Film Absorption, International Journal of Refrigeration, Vol. 248, (2001) 755-797.
  32. **Killion J.D. and Garimella S.**, Gravity- Driven Flow of Liquid Film and Droplets in Horizontal Tube Banks, International Journal of Refrigeration, Vol. 26(5), (2003) 516-526.