

## Termoelektrik (Peltier) Soğutma Sistemleri

Halil ATALAY, Prof. Dr. Ali GÜNGÖR

ali.gungor@ege.edu.tr

Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Bornova, İzmir

## ÖZET

Bu çalışmada Termoelektrik (Peltier) soğutma sistemlerinin temelleri üzerinde durulmuş ve bu sistemler üzerindeki termodinamik etki, soğutma gücü ve performans katsayısının hesaplanması, termoelektrik soğutma modülünün dizaynı ve modellenmesi, bu sistemlerde kullanılan metaller ve bu metallerin performans limitleri, termoelektrik soğutma modülleri, bu modüllerin performans parametreleri ve termoelektrik soğutma sistemlerinin diğer soğutma sistemleriyle ilişkisi hakkında bilgi verilmiştir.

## GİRİŞ

Mekanik buhar sıkıştırma sistemlerinin yanı sıra, bir soğutma etkisi elde edilebilmesi amacıyla kullanılan çeşitli yöntemler vardır. Son yıllarda ticari alanda kullanımı önem kazanmaya başlayan termoelektrik soğutma sistemleri de bu yöntemlerden birini teşkil eder.

Prusyalı bilim adamı Seebeck tarafından 1822 yılında yapılan araştırma ve deneyler neticesinde termoelektrik eleman çiftleri ortaya çıkmıştır. Seebeck'in deneyleri, değişik birleşme noktası sıcaklıklarına sahip benzer olmayan iletkenlerden oluşan kapalı bir devrede sıcaklık farkından dolayı bir elektrik akımının ortaya çıktığını göstermiştir. Seebeck bulduğu sonuçları yanlış değerlendirmiş ve sıcaklık farkı dolayısıyla bir manyetik akış doğduğunu ispat ettiği kanısına varmıştır.

Fransız bilim adamı Peltier, 1834 yılında yaptığı deneylerde üzerinden akım geçen iki benzer olmayan iletkenin birleşme noktasında bir ısıl etki olduğunu gözlemlemiş ancak da Seebeck gibi sonuçları yanlış yorumlamıştır.

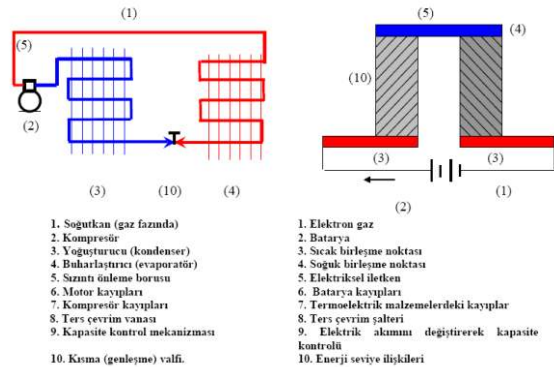
William Thomson (Lord Kelvin) termodinamik analizler neticesinde Seebeck ve Peltier etkilerinin birbirleriyle alakalı olduğunu ispat etmiştir. Ayrıca daha sonraları Thomson etkisi diye anılmaya başlanan üçüncü bir termoelektrik olgu ortaya çıkarmıştır. Ancak yarı iletken malzemelerin kullanılmaya başlanmasından sonra pratik bir önem kazanmıştır.

Termoelektrik soğutma sistemlerinin ilk geliştirilme çalışmalarının büyük bir kısmı A.F. Ioffe yönetiminde S.S.C.B.'de gerçekleştirilmiştir.

Bir termoelektrik sistemin fiziksel prensiplerinin daha kolay anlaşılabilmesi amacıyla gaz sıkıştırma ve termoelektrik soğutma sistemleri arasında geçerli benzetmeler yapılabilir.

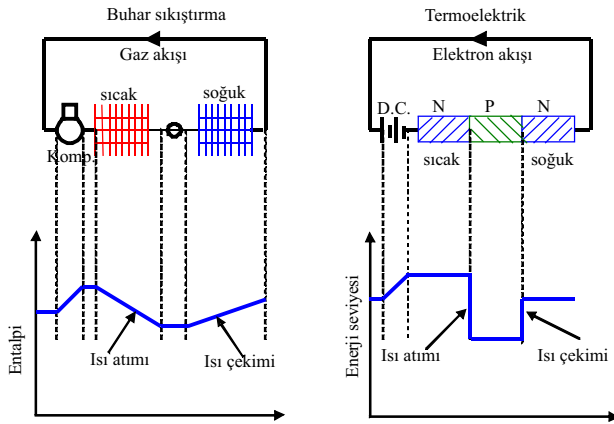
İki sistem arasındaki çeşitli benzerlikler Şekil 1.'de gösterilmiştir. Her iki sistemdeki anahtar nokta sistemin sıcak ve soğuk taraflarındaki iç enerjide bir değişim elde etmektedir.

Buhar sıkıştırımlı soğutma çevriminde iç enerji değişimi, yoğuşurucu ve buharlaştırıcı arasına bir kısma (genleşme) vanası konularak elde edilebilir. Bu vana kullanılmadığı takdirde soğutucu sabit bir basınç ve entalpide olacağından ısı pompalama işlemi meydana gelmez. Aynı prensip termoelektrik devre için de geçerlidir. Eğer n ve p malzemeleri aynı olursa sistemin her tarafında elektron-gaz enerji seviyesi aynı olacak ve ısı pompalama işlemi oluşmayacaktır. Eğer tasarımcı değişken elektron enerji seviyeli malzemeler seçerse akım yönüne bağlı olarak engel veya birleşme noktası boyunca elektron-gaz akışı bir enerji değişimi oluşturur ve sonucunda birleşme noktasında ısı çekilmesi veya atılması olayı gerçekleşir.



Şekil 1. Buhar sıkıştırımlı soğutma çevrimi ile, termoelektrik soğutma çevrimi arasındaki sistem benzerlikleri

Şekil 2.'de Şekil 1.'de gösterilen iki sistem için basitleştirilmiş enerji seviye diyagramları ve benzerlikleri verilmiştir.

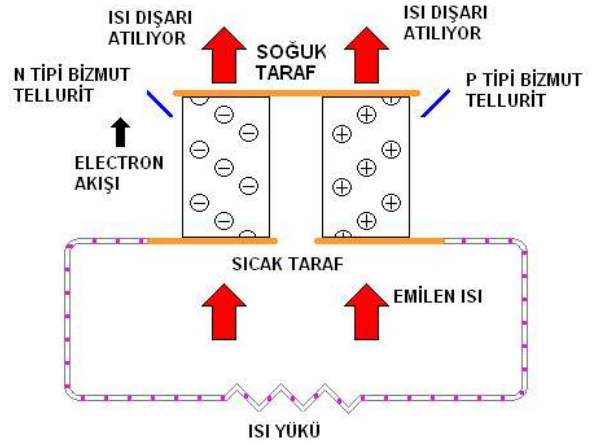


**Şekil 2. Buhar sıkıştırma soğutma çevrimi ve termoelektrik soğutma çevrimi için enerji seviye diyagramları ve benzerlikleri**

Birbirinden ayrı malzemeden yapılmış iki teli uçlarından birbirine bağlar ve devreden elektrik akımı geçirirsek bir ucun ısınırken diğer ucun soğuduğunu görürüz. Eğer ısınan taraftaki ısıyı devreden atarsak, soğuyan taraftan sürekli olarak ısı çekebiliriz. İlk defa Thomas Seebeck tarafından bulunan bu etki soğutma makinesi olarak kullanılabilir. Soğutma makinesi olarak kullanım ilk defa Peltier tarafından gerçekleştirilmiştir ve Peltier etkisi olarak anılır.

Günümüzde bilhassa küçük elektrik devrelerinin soğutulmasında pratik olarak kullanılan bu sistem, COP katsayısı standart soğutma makinesinin verimine henüz ulaşmadığı için büyük sistemlerde pek kullanılmamaktadır. Bu sistemlerin tercih nedeni küçük boyutlarda kullanılabilmesi, sessiz çalışması ve güvenilirliğidir.

Peltier sistemlerinin COP değerlerini arttırmak için yeni metal çiftleri üzerinde çalışmalar sürmektedir, bu çalışmalar sonucunda gelecekte standart soğutma çevriminin üzerinde COP değerlerinin yakalanması mümkün olabilecektir. Şekil 3'de elektronik devreleri soğutmada kullanılan bir Seebeck- Peltier sistemi şematik olarak gösterilmiştir. [2, 3]



**Şekil 3. Seebeck devresiyle ısının dışarıya atılması (sistemin soğutulması)[3]**

Peltier soğutucuları bilhassa ufak alandaki soğutma ihtiyaçlarının giderilmesinde önem kazanmaktadır. Bilgisayar ve elektronik devrelerinin soğutulması, soğutmalı araç koltukları, küçük soğutucu üniteler (örneğin bira soğutucuları) gibi çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadır. Şekil 4.' de bir bilgisayar ana belleğinin bu tür bir Peltier soğutucusu kullanılarak soğutulması görülmektedir. [2, 3]



**Şekil 4. Peltier devresi kullanarak bilgisayarın işlemcisinin soğutulması [3]**

Temel bir termoelektrik soğutma sistemi olan termoelemanlar, pozitif ve negatif kısımlardan oluşmaktadır. Termoeleman (termocouple), genellikle dikdörtgen en kesitli ve benzer uzunluklara sahip iki bölümden oluşmaktadır. Uzunluk değerleri eşit olduğu zaman  $A_p$  ve  $A_n$  alanları arasındaki ilişki:

$$\frac{A_p}{A_n} = \left( \frac{\rho_p \cdot \lambda_n}{\rho_n \cdot \lambda_p} \right)^{1/2} \quad (1)$$

Burada,  $\rho$  ve  $\lambda$  değerleri elektriksel direnç ve termal iletkenlik değerlerini ifade etmektedir. Yine de, normal sıcaklıklarda,  $\rho$  ve  $\lambda$  değerleri pozitif ve negatif metallerde karşılaştırılmalı değerlere sahiptir ve bu yüzden  $A_p$  ve  $A_n$  değerleri eşit olabilmektedir [1].

A/L oranında, L değeri her termoelement için geçerli bir elektrik akımı tarafından meydana gelen uzunluktur. Uygulamada, termal olarak paralel ve elektriksel olarak seri bir diziye sahip bir sistemi termoelektrik bir modül biçimine dönüştürmek amacıyla bir dizi termoeleman birbirine bağlanır. Bağlantılar, yeterli elektriksel direnç meydana gelmedikçe metalik iletkenlerin gerdirilmesiyle biçimlendirilir [1].

Teoride, modüldeki her termoeleman için soğutma gücü ve akım değeri yalnızca, termoelektrik özellikler ve A/L oranı tarafından belirlenir. Böylece, ekonomik metal kullanımı için önerilen hem A hem de L değeri küçük de olsa istenilen oranı sağlarlar [1].

Yine de, çok küçük uzunluklardaki uyum, bu büyüklüklerin bağıntılardaki elektriksel direnç oranına etkisi ve aynı zamanda termoelementlerin kenarlarının etrafındaki kaynaklar arasında kaybolan ısı transferinin çok zor yapılmasından dolayı istenilmez. Bir modüldeki toplam en kesit alanı, kaynaklardaki önemli termal engellerin oluşumu dışında çok küçük olmamaktadır. Uygulamada, termoelementlerin uzunluğu 1 veya 2 mm azaltılarak ticari modüller oluşturulmaktadır [1].

Termoelektrik modüllerin dizaynında, soğutucu gücü ve sıcaklık farkının kaynaklarda özelleştirilmesiyle oluşacağı zannedilmektedir. Daha sonra, termoeleman metaller için optimum performans katsayıları hesaplanır. Optimum performans katsayısı verildiğinde ihtiyaç duyulan elektrik akımı:

$$I = \frac{(\alpha_p - \alpha_n) \times (T_2 - T_1)}{R \times \left[ (1 + Z \times T_m)^{1/2} - 1 \right]} \quad (2)$$

ile hesaplanır. [4]

Burada,  $(\lambda_p - \lambda_n)$  farkı Seebeck katsayısını,  $(T_2 - T_1)$  sıcaklık farkını,  $T_m$  ort.sıcaklık değerini ifade etmektedir. Z şekil faktörünü, R ise iki bölümlü termoeleman dizisinde elektriksel direnci ifade etmektedir. Direnç değeri, verilen bir akım değeri için hesaplanabilir ve bu durum A/L oranı ile belirlenir. Verilen her çift için soğutma gücü:

$$Q_c = (\lambda_p - \lambda_n) \times I \times T_1 - k \times (T_2 - T_1) - I^2 \times \frac{R}{2} \quad (3)$$

bağıntısından hesaplanır.

Maksimum performans katsayısı ise aşağıdaki bağıntı ile hesaplanabilir:

$$V = (\lambda_p - \lambda_n) \times (T_2 - T_1) \times \left[ \frac{(1 + Z \times T_m)^{1/2}}{(1 + Z \times T_m)^{1/2} - 1} \right] \quad (4)$$

Örneğin

$$\frac{(1 + Z \times T_m)^{1/2}}{(1 + Z \times T_m)^{1/2} - 1} = 4, (\lambda_p - \lambda_n) = 4 \times 10^{-4} \text{ volt}$$

ve  $(T_2 - T_1) = 20K$  olarak verildiğinde

$V = 3 \times 10^{-2}$  volt olarak hesaplanır. Doğru akımlı güç kaynaklarında, tek bir çiftten oluşan bir termoelektrik soğutma cihazında küçük bir voltaj etkisinden dolayı yarar sağlanamamaktadır. Tipik ticari modüller, benzer çiftlerde bir veya daha fazla voltaj değerine sahip potansiyel bir model içermektedir[4].

Gerçek bir sistemde, özel bir uygulama için bir termoelektrik modül dizaynı genellikle yapılamamaktadır. Mevcut her üreticiden alınan özel karakteristiklerle belirlenen güçlü bir standart modül, ihtiyaç duyulan yeterli soğutma kapasitesi seçimi ve aynı anda işlem içinde akım veya voltaj gücünün ayrılması vb. işlemler termoelektrik soğutucu dizaynının ön koşullarını oluşturmaktadır[5].

### Termodinamik Etki

Termodinamik ilişkilerle, termoelektrik etkiler üzerindeki mekanizmaları açıklamak mümkündür.

Gerekli olan termodinamik analizler Thomson tarafından açıklanmıştır. Daha özenli davranış modelleri ise Benedict ve Collen tarafından verilmiştir.

Bir termoelektrik çevrim, çok kapalı bir yaklaşım olan "tersinir ısı makinesi" gibi davranabilir. Çok küçük tersinmez ısı kaybı benzer yaklaşımlarda ihmal edilebilir. Termoelektrik çevrimde akım  $10^{-3}$  amperdir. Termoelementlerde, elektriksel direnç küçüktür, genellikle 10 ohm'dan daha küçük bir değere sahiptir. Bu durum,  $10^{-5}$  Watt'tan daha küçük, ihmal edilebilir ısı kaybını vermektedir. Elektriksel enerjiyi  $dE_{AB}/dT$  olarak ifade edebiliriz. Bu bağıntıyı geliştirirsek:

$$I \times E_{AB} = I \times \frac{dE_{AB}}{dT} \times \Delta T \quad (5)$$

akım değerlerini sadeleştirdiğimizde;

$$E_{AB} = \frac{dE_{AB}}{dT} \times \Delta T \quad (6)$$

bağıntısı elde edilir.

Termoelektrik çevrimde diğer enerji faktörleri ise Peltier etkisi (bağlantıdaki ısı içeriğinin değişmesi) ve Thomson etkisi (her bir iletkendeki ısı içeriğinin değişmesi)'dir. Bu termal ifadeler şu şekilde ifade edilebilir:

#### Peltier etkisi:

Sıcak bağlantıda ısı absorbe edilmesi:

$$\Pi_{AB}(T+\Delta T) \quad (7)$$

Soğuk bağlantıda ısı verilmesi:

$$-\lambda_{AB}(T)$$

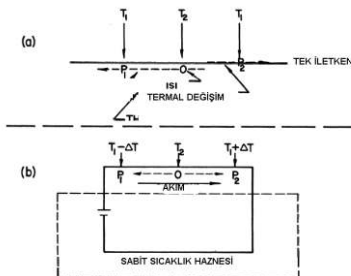
#### Thomson etkisi:

B iletkeninden ısı absorbe edilmesi:  $\beta_B(\Delta T)$

A iletkeninden ısı verilmesi:  $-\beta_A(\Delta T)$

Burada  $\Pi$  ve  $\beta$  sırasıyla Peltier ve Thomson katsayılarını ifade etmektedir.

Şekil 5'te Peltier ve Thomson etkilerinin ilişkileri ifade edilmektedir:



Şekil 5. Peltier ve Thomson Etkilerinin İlişkileri [7]

Bir termoelektrik çevrim, tersinir ısı makinesi yaklaşımında termal ve elektrik enerji eşit olabilmektedir.

$$\frac{dE_{AB}}{dT} \times \Delta T = \frac{\Pi_{AB}(T+\Delta T) - \Pi_{AB}(T)}{\Delta T + (\beta_B - \beta_A)} \quad (8)$$

Bu bağıntı,  $\Delta T$ 'nin sıfıra yaklaşımını ve Peltier etkisinde sıcaklıkla ilgili ani değişim oranlarını vermektedir. Bu eşitlik:

$$\frac{dE_{AB}}{dT} = \left( \frac{d\Pi_{AB}}{dT} \right) + (\beta_B - \beta_A) \quad (9)$$

bağıntısını ifade etmektedir.

Bu ifade, kapalı bir termoelektrik çevrim için temel termodinamik teoremi vermektedir ve elektriksel Seebeck etkisi ile Termal Peltier ve Thomson etkileri arasındaki enerji ilişkisini göstermektedir.

Termoelektrik çevrimde entropi değişimi:

$$\Delta S = \frac{(-\Pi_{AB}(T+\Delta T))}{(T+\Delta T)} + \frac{(\Pi_{AB}(T))}{T} - \left( \frac{\beta_B(\Delta T)}{T} \right) + \frac{\Delta T}{2} + \left( \frac{\beta_A(\Delta T)}{T} \right) + \frac{\Delta T}{2} = 0 \quad (10)$$

İlk iki terim  $\Delta T/\Delta T$  ile çarpıldığında;

$$\Delta S = \left[ \frac{(-\Pi_{AB}(T+\Delta T) + \Pi_{AB}(T))}{\Delta T} \right] \times \Delta T - \beta_B(\Delta T) + \frac{\Delta T}{2} + \beta_A(\Delta T) + \frac{\Delta T}{2} = 0 \quad (11)$$

elde edilir.

$\Delta T$  değeri sıfıra yaklaştığında ;

$$\Delta S \cong \frac{-d}{dT} \left( \frac{\Pi_{AB}}{T} \right) - \beta_B \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta T}{2} + \beta_A \frac{\Delta T}{T} + \frac{\Delta T}{2} = 0 \quad (12)$$

$\Delta T$  ihmal edildiğinde;

$$\frac{d}{dT} \left( \frac{\Pi_{AB}}{T} \right) = \frac{\beta_A}{T} - \frac{\beta_B}{T} \quad (13)$$

türevi alındığında;

$$\frac{T \times d\Pi_{AB}}{T^2 \times (dT - \Pi_{AB})} = \frac{\beta_A}{T} - \frac{\beta_B}{T} \quad (14)$$

olur.

Bu eşitlikte Peltier ve Thomson katsayıları, Peltier cihazlarında kullanılan materyallerin seçiminde yardımcı olacaktır.

$$\frac{-d\Pi_{AB}}{dT} = \left( \frac{-\Pi_{AB}}{T} \right) + (\beta_B - \beta_A) \quad (15)$$

Peltier etkisinin maximum oluşum noktası

$$\frac{d\Pi_{AB}}{dT} = 0 \quad \text{noktasıdır.} \quad (16)$$

Bu durum, iki temel etki arasındaki optimum ilişkide kullanılır.

$$\Pi_{AB} = (\beta_B - \beta_A) \times T \quad (17)$$

Buradaki temel termodinamik teorem:

$$\frac{\Pi_{AB}}{T} = \frac{dE_{AB}}{dT} \quad (18)$$

Seebeck ve Thomson etkileri arasında ifade edilebilen bir başka önemli ilişki ise 18 no'lu ifadenin türevi ile elde edilir.

$$\frac{d\Pi_{AB}}{dT} = \frac{dE_{AB}}{dT} + \frac{d^2E_{AB}}{dT^2} \quad (19)$$

olmaktadır.

Bu ifade düzenlendiğinde;

$$\frac{d\Pi_{AB}}{dT} - \frac{dE_{AB}}{dT} = T \times \frac{d^2E_{AB}}{dT^2} \quad (20)$$

$$\frac{d\Pi_{AB}}{dT} - \frac{dE_{AB}}{dT} = -(\beta_B - \beta_A) \text{ 'dır.} \quad (21)$$

$$T \times \left( \frac{d^2E_{AB}}{dT^2} \right) = -(\beta_B - \beta_A) \text{ olur ve} \quad (22)$$

$$\frac{d^2E_{AB}}{dT^2} = \frac{-(\beta_B - \beta_A)}{T} \text{ haline getirilir.} \quad (23)$$

Son ifadenin integrali alındığında;

$$\frac{dE_{AB}}{dT} = \int \frac{(\beta_B - \beta_A)}{T} dT \quad (24)$$

Thomson ve Peltier katsayıları arasındaki bir başka önemli ilişki ise :

$$\Pi_{AB} = \frac{dE_{AB}}{dT} \times T = \left( \int \frac{\beta_A}{T} dT - \int \frac{\beta_B}{T} dT \right) \times T \quad (25)$$

olmaktadır.

$$\Pi_{AB} = \Pi_A - \Pi_B \quad (26)$$

olarak yazılabilir.

Buradaki  $\Pi_A$  ve  $\Pi_B$ , termoelektrik bağlantı biçiminde her bir elemanın entropi değerlerini ifade etmektedir.

### Termoelektrik Soğutmada Soğutma Gücü

Burada ilk olarak termoelektrik soğutma gücü teorisinden bahsedeceğiz. Bu teori, Peltier ve Seebeck etkilerine rağmen, termoelementler arasındaki bağlantı isteğini ve bu termoelementlerin hacimlerinin, metallerin yüzey özelliklerinden daha fazla güvenli olduğunu anlamak için önemlidir. Böylece, devreden bir elektrik akımı geçirildiği zaman bir iletkenin taşınan ısı Peltier etkisi olarak karşımıza çıkar. Buradaki ısı transferi şu şekilde ifade edilir:

$$Q_p = \alpha_p \times I \times T - \lambda_p \times A_p \times \frac{dT}{dx} \quad (27)$$

$$Q_n = \alpha_n \times I \times T - \lambda_n \times A_n \times \frac{dT}{dx} \quad (28)$$

$\alpha$  - sayısı Seebeck katsayısını,  $I$  - devreden geçirilen

akımı,  $\lambda$  - termal iletkenliği ve  $\frac{dT}{dx}$  ise sıcaklık değişimini ifade etmektedir. Kelvin'in ikinci kanunundan yola çıkılarak, Peltier katsayısı  $\alpha T$  bulunmaktadır. Buradaki  $T$  mutlak sıcaklıktır. Joule etkisinden  $\frac{I^2 \times \rho}{A}$  ifadesi elde edilir. Buradaki

elektriksel dirençtir. Buna bağlı olarak;

$$-\lambda_p \times A_p \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{I^2 \times \rho_p}{A_p} \quad (29)$$

$$-\lambda_n \times A_n \times \frac{d^2T}{dx^2} = \frac{I^2 \times \rho_n}{A_n} \quad (30)$$



Seebeck katsayısı sıcaklıktan bağımsızdır. Bunun nedeni Thomson etkisinin ortadan kalkmasıdır. Sınır koşulu  $x=0$ 'da  $T=T_1$  ve  $x=L_p$  ve  $L_n$ 'de  $T=T_2 \times a + x$  olarak alındığında;

$$\lambda_p \times A_p \frac{dT}{dx} = I^2 \times \rho_p \times \frac{\left(x - \frac{L_p}{2}\right)}{A_p} + \lambda_p \times A_p \times \left(\frac{T_2 - T_1}{L_p}\right) \quad (31)$$

$$-\lambda_n \times A_n \times \frac{dT}{dx} = \rho_n \times \frac{\left(x - \frac{L_n}{2}\right)}{A_n} + \lambda_n \times A_n \times \left(\frac{T_2 - T_1}{L_n}\right) \quad (32)$$

$x=0$  için;

$$Q_p(x=0) = \alpha_p \times I \times T_1 - \lambda_p \times A_p \times \left(\frac{T_2 - T_1}{L_p}\right) - I^2 \times \rho_p \times \left(\frac{L_p}{2}\right) \times A_p \quad (33)$$

$$Q_n(x=0) = \alpha_n \times I \times T_1 - \lambda_n \times A_n \times \left(\frac{T_2 - T_1}{L_n}\right) - I^2 \times \rho_n \times \left(\frac{L_n}{2}\right) \times A_n \quad (34)$$

Eğer,  $x=0$ 'da  $q_p$  ve  $q_n$  sonradan eklenirse, soğutucu gücü  $q_c$  elde edilir.

$$Q_c = (\alpha_p - \alpha_n) \times I \times T_1 - k \times (T_2 - T_1) - \frac{I^2 \times R}{2} \quad (35)$$

Buradaki termal iletkenlik ( $k$ ):

$$K = \left(\lambda_p \times \frac{A_p}{L_p}\right) + \left(\lambda_n \times \frac{A_n}{L_n}\right) \quad (36)$$

Elektriksel Direnç ( $R$ ):

$$R = \rho_p \times \frac{L_p}{A_p} + \rho_n \times \frac{L_n}{A_n} \quad (37)$$

eşitliklerinden hesaplanarak bulunabilir.

Peltier  $(\alpha_p - \alpha_n) \times I \times T_1$  soğutma terimi bağıntısında çeşitli doğrultulardaki elektrik akımı, Joule ısı terimi bağıntısındaki akım değerine eşittir. Bu durum, soğutma gücünün maksimum değerini ifade etmektedir.

$$\frac{dQ_c}{dI} = 0 \quad (38)$$

bağıntısıyla ifade edilir.

$$I_q = (\alpha_p - \alpha_n) \times \frac{T_1}{R} \quad (39)$$

Maksimum soğutma gücü:

$$(Q_c)_{\max.} = (\alpha_p - \alpha_n)^2 \times \frac{T_1^2}{2} \times R - k \times (T_2 - T_1) \quad (39)$$

olarak ifade edilir.

Bu eşitlik pozitif bir soğutma etkisini ortaya koyar.

Gerçekte, maksimum sıcaklık farkı

$$(T_2 - T_1)_{\max.}, (Q_c)_{\max.} = 0$$

olduğu zaman vardır.

$$(T_2 - T_1)_{\max.} = (\alpha_p - \alpha_n)^2 \times \frac{T_1^2}{2} \times R \times k \quad (41)$$

Termoeleman'ın gösterdiği değer ise aşağıdaki bağıntı ile ifade edilir.

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{R} \times k \quad (42)$$

42 nolu eşitlik değiştirilerek tekrar yazıldığı durumda;

$$(T_2 - T_1)_{\max.} = Z \times \frac{T_1^2}{2} \quad (43)$$

olarak yazılabilir.

Termoelektrik soğutma, maksimum sıcaklık farkında önemli bir kayma olmadıkça, pratikte farklı bir biçimde gerçekleştirilmektedir. Örneğin, bir termoelektrik soğutucuda  $T_1=273K$ ,  $T_2=303 K$  ise  $Z=0,8 \times 10^{-3} K^{-1}$ 'dir.

$$\frac{(L_n \times A_p)}{(L_p \times A_n)} = \left(\frac{\rho_p \times \lambda_p}{\rho_n \times \lambda_n}\right)^{1/2} \quad (44)$$

bu bağıntıya göre;

$$Z = \frac{(\alpha_p - \alpha_n)^2}{\left[(\rho_p \times \lambda_p)^{1/2} + (\rho_n \times \lambda_n)^{1/2}\right]^2} \quad (45)$$

Seebeck katsayısı, geniş ve zıt işaretli iki metale gereksinim duymaktadır. Buna ek olarak, termal iletkenlik ve elektriksel direnç düşük olmalıdır.

## PERFORMANS KAT SAYISI

$(T_2 - T_1)$  sıcaklık farkı maksimum değerden daha düşük bir değere sahip olduğu zaman, soğutucularda genellikle performans katsayısı olarak bilinen bir katsayı tanımlamak mümkündür. Bu ifade  $\varphi$  ile gösterilmiştir ve  $\frac{Q_c}{W}$  oranı olarak tanımlanır.

$$w_p = \alpha_p \times I \times (T_2 - T_1) + I^2 \times \rho_p \times \frac{L_p}{A_p} \quad (46)$$

$$w_n = \alpha_n \times I \times (T_2 - T_1) + I^2 \times \rho_n \times \frac{L_n}{A_n} \quad (47)$$

Bu ifadeler, Joule etkisi gibi Seebeck etkisinin de elektriksel güç olarak kullanılacağını göstermektedir. Toplam güç:

$$W = (\alpha_p - \alpha_n) \times I \times (T_2 - T_1) + I^2 \times R \quad (48)$$

Performans katsayısı:

$$\phi = \frac{q_c}{w} = (\alpha_p - \alpha_n) \times I \times T_1 - \frac{1}{2} \times P \times R - \frac{k \times (T_2 - T_1)}{(\alpha_p - \alpha_n)} \times I \times (T_2 - T_1) + I^2 \times R \quad (49)$$

Bu bağıntı ile optimum akım değeri elde edilir. Maksimum performans katsayısı ise olduğu zaman elde edilir.

$$\frac{d\phi}{dI} = 0$$

$$I \times \phi = \frac{(\alpha_p - \alpha_n) \times (T_2 - T_1)}{R \times \left[ (1 + Z \times T_m)^{1/2} - 1 \right]} \quad (50)$$

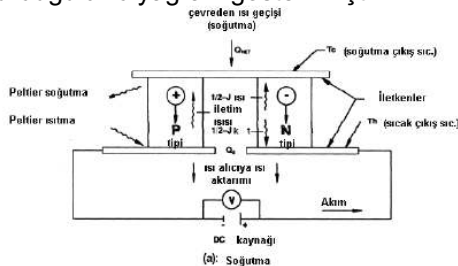
$$\text{Burada; } T_m = \frac{T_1 + T_2}{2} \text{ 'ye eşittir.} \quad (51)$$

Maksimum performans katsayısı ;

$$\phi_{\max.} = \frac{T_1 \times \left[ (1 + Z \times T_m)^{1/2} - \left( \frac{T_2}{T_1} \right) \right]}{(T_2 - T_1) \times \left[ (1 + Z \times T_m)^{1/2} + 1 \right]} \quad (52)$$

## TERMODİNAMİK SOĞUTMA DİZAYNI MODÜLÜ

Termoelektrik soğutma sistemi, bir veya daha fazla n ve p tipi yarı iletken metal parçalarından doğru akım geçirildiği zaman başarılı bir sistem olarak kabul edilir. Şekil 6'da n ve p tipi yarı iletken metal parçalarının oluşturduğu bir diyagram gösterilmiştir.



Şekil 6. n ve p Tipi Yarı İletken Metal Parçalarının Oluşturduğu Diyagram [4]

$$Q_{net} = \alpha \times T_c \times I - \frac{1}{2} \times I^2 \times R - K \times \Delta T \quad (53)$$

Burada, Q- soğuk bağlantıdan absorbe edilen ısı oranı (Watt)

$\alpha = \alpha_{pn} = \alpha_p - \alpha_n$  n ve p metallerinin Seebeck katsayıları farkı .

$\Delta T = (T_h - T_c)$ -sıcaklık farkı ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_h$ =Sıcak bağlantı sıcaklığı(K)

$T_c$ =soğuk bağlantı sıcaklığı(K)

$R = R_n + R_p$  - Elektriksel Direnç

İdeal olarak, soğuk tarafta absorbe edilen ısı miktarı ve Peltier katsayısının ürüne bağlı olarak sıcak taraftan dağıtılan ısı ve yarı iletken metalden geçirilen akımdır. Pratik olarak da, Peltier etkisinden dolayı soğuk taraftan absorbe edilen net ısı miktarı, iletilen ısı ve joule ısısı adı altında iki kaynak tarafından azaltılır. Sıcaklık farkından dolayı soğuk ve sıcak taraftaki yarı iletken metaller arasında, ısı, yarı iletken metalde sıcak taraftan soğuk tarafa doğru iletilecektir. Akım arttığında, sıcaklık farkı ve böylece ısı iletkenliği artar. Çünkü Peltier soğutma etkisi artmaktadır. Akım artmaya devam eder ve Joule ısısı baskın faktör olarak karşımıza çıkar, net ısının azaltılması sonucunda ilave edilecek akım ile zenginleşir. Soğutmada, uzakta olmayan akım, maksimum akım olmayı başarabilir. Maksimum voltaj ve maksimum sıcaklık farkında verilen ısı değeri için maksimum akım değeri elde edilir.

Sıcak tarafta net ısı dağıtılırken, soğuk tarafta elektrik gücünde uygulanan net ısı absorbe edilir. Performans katsayısı(COP), soğutma etkisinin uygulanan elektrik gücünde soğuk taraftan absorbe edilen ısıya bölünmesiyle elde edilir.

Yarı iletken metallerdeki özellikler, elektriksel direnç, termal iletkenlik ve Seebeck katsayısı, belirli sıcaklıkta maksimum soğutma kapasitesini tanımlamaktadır. Böyle bir termoelektrik soğutucu dizaynı için güvenilir bir çözüm değildir. Soğutma için yaygın olarak kullanılan termoelektrik metalde [(Bi,Sb)<sub>2</sub>,(Te,Se)<sub>3</sub> vb.] sıcaklık değerleri (-120 $^{\circ}\text{C}$  - 230 $^{\circ}\text{C}$ ) arasındadır.

Yarı iletken bir metal için soğutma kapasitesi, metalin Seebeck voltaj değerine, elektriksel direncine, termal iletkenliğine ve soğuk ve sıcak taraf arasındaki sıcaklık farkına bağlıdır. Bu ifadeden yola çıkılarak Z şekil faktörü şu formülle hesaplanır:

$$Z = \frac{\alpha^2}{(\rho \times \lambda)} \quad (54)$$

Her n ve p tipi yarı iletken metallerin özellikleri, değişen bir sıcaklık fonksiyonuna bağlıdır. Bu da, her yarı iletken metal için maksimum sıcaklık farkında Z şekil faktörünü gösterebilir. Bu yüzden, termoelektrik metallerin optimizasyonu ve seçiminde maksimum Z şekil faktörü önemli bir değere sahiptir. Z şekil faktörü, yarı iletken metallerde sıcaklık farkına ve ısı pompası kapasitesine bağlıdır.

## TERMoeLEKTRİK SOĞUTMA SİSTEMLERİN MODELLENMESİ

Termo elektrik soğutma sistemleri belli bir sıcaklıkta termal enerjiyi bir sıvıdan başka bir sıvıya başka bir sıcaklıkta termoelektrik metalleri ve güçleri kullanarak transfer ederler. Isıl termo elektrik model belli sayıda termo elektrik blokların birleşiminden oluşur.

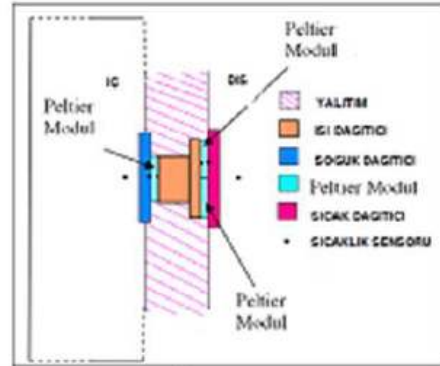
Peltier modülleri, soğutma sistemlerinde pek çok uygulamaya sahiptir. Bu cihazlar uyarıları takip eder veya sıcaklık değişiminin önemli olduğu yerlerde nesne üzerindeki sabit sıcaklığını korur.

Termoelektrik sistemler, soğutma gücünün MW'tan yüzlerce Watt değerine kadar olan referans değerlerini gösteren uygulamalarda kullanılır. Örneğin, askeri alanlarda, uzay uygulamalarında, yiyecek soğutmada, laboratuvar ve tıbbi cihazların yapımında termoelektrik sistemler kullanılmaktadır. Termoelektrik sistemler güvenli sistemlerdir ve kirliliği azaltırlar.

Termoelektrik modeller dizayn edilirken, oda sıcaklığı, Peltier modülü voltaj değeri, kullanılan nümerik metodun zamana bağlı sümülyasyonu göz önünde bulundurulur. Farklı nümerik metodları için sıcaklık değerleri hesaplanır, her metod için hata değerleri belirlenir, değerler birbirleriyle kıyaslanır ve kontrol edilir. Çok katlı bir termoelektrik sistemin dizaynında aşağıdaki işlemler uygulanır :

- Çok katlı termoelektrik soğutucu modülü için hesaplanan bir model geliştirilir.
- Çok katlı bir soğutucu için dizayn ve prototip ürün yapılır.
- Sıcak ve soğuk taraftaki iç sıcaklık ile COP değerleri hesaplanır,
- Tek ve çok katlı termoelektrik soğutucuların üretimi gerçekleştirilir.

Şekil 7'de, geliştirilen bir soğutucunun Peltier Modüllerine göre bölümlerinin tasarlanması gösterilmiştir. Termo elektrik maddelerin akımı elektrik akım akışı vasıtası ile yapılır. **Isı değiştiricinin sıvıyı soğutması için (sıvıdan ısıyı emerek), Isı değiştiricinin sıvıyı ısıtması için. (atık ısı)**



Şekil 7. Soğutucu Sistem Tasarımı [5]

## Termoelektrik Modül

Termoelektrik Modüller bir çok termoelektrik maddeden oluşurlar ki, bunlar genellikle elementlerle ilişkilidir. Bu elementler dönüşümlü olarak birleşir ve elektriksel akımın n ve p tipi yarı iletken metallerini oluşturur. Madde özelliklerine ek olarak, modüller iki ayrı parametreyle tanımlanır. GF termoelektrik elementin geometrik faktörüdür ve n tipi elementler ile p tipi elementlerin modül içindeki toplamına eşittir. Termoelektrik modül ve tek termoelektrik element tanımlanırsa; Bu modelde termoelektrik madde özellikleri tek bir termoelektrik madde ve termoelektriksel modüller için geçerli olup, bunlar birçok n ve p tipi yarı iletken metallerin birbirlerine elektriksel seriler olarak bağlanmış şeklini içerir. Tıpkı elektriksel modüle olduğu gibi bu özellikler seramik plakaların ve elektriksel birleştiricilerin ısı özelliklerini içerir. Bu yaklaşım için şunu söyleyebiliriz: Seramik plakaların ısı sıcaklığı elementin son sıcaklığına eşittir. Takip eden gösterimler ya tek termoelektrik element ya da termoelektrik modülü, Seebeck faktörü ve c ısı iletim katsayısını karşılar. Termoelektriksel direncin soğutulmuş ve ısıtılmış yüzeyler arasındaki farkı şudur: Tek termoelektrik element kullanılırken ısı değiştiriciler elektriği termoelektrik maddeler arasında iletir ve yüzeyler arasında önemsenecek kadar elektriksel direnç meydana gelir. Bu durum, soğutulan taraf için  $R_{co}$  ve ısıtılan taraf için  $R_{he}$  olarak tanımlanır. Her ikisini de denklem olarak ifade edersek;

$$Re_{co} = \frac{Re_{Te}}{2} + R_{co} \quad (55)$$

$$Re_{he} = \frac{Re_{Te}}{2} + R_{he} \quad (56)$$



Modüllerde elektrik bir modülden diğerine kablolarla iletilirler ki bu da boyutlandırılmış modüllerle önemsenmeyecek kadar elektriksel direnç olması için gereklidir ve bu durumda  $R_{coo}=R_{he}=\frac{R}{2}$  'ye eşit olur. (57)

### KATI TERMAL DİRENÇİ

Katıdaki termal direnç,  $R_{tBa}$  (termal direnç, K/W)

**-Su ısı değiştirgeci, termoelektrik metal yüzeyi, su ile temas halinde olan ABa alanı arasında yer almaktadır.**

**-Hava ısı değiştiricisi, termal direnç, termoelektrik metal yüzeyi ve ABa alanı arasında yer değiştirir.**

### Sistem Bloğu İle İlgili Eşitlikler

Soğutucu akışkan pompasındaki termal güç:

$$P_{CO} = S_{TE} \times I \times (t_{TE_{CO}} + 273.15) + R_{e_{CO}} \times I^2 + C \times (t_{TE_{He}} - t_{TE_{CO}}) + C_{AT} \times (t_{Ba_{CO}} - t_{Ba_{CO}}) \quad (58)$$

Soğutma temeli ile bağlantılı termoelektrik metal sıcaklığı:

$$t_{TE_{CO}} = t_{FL_{CO}} + P_{CO} \times (R \times t_{Ba_{CO}} + R \times t_{He_{CO}}) \quad (59)$$

Bu sistem bloğunda 6 eşitlik ve bu eşitliklerde 6 tane bilinmeyen vardır. İşlem koşulları,  $t_{TE_{CO}}, t_{TeHe}, t_{Ba_{CO}}, t_{BaHe}, P_{CO}, P_{He}, I, t_{FL_{CO}}, t_{FLHe}$  'dir.  $S_{te}, C_{te}, R_{e_{CO}}, R_{e_{He}}$  termoelektrik metallerin karakteristikleridir ve ısı değiştirgeci karakteristikleri ( $R_{t_{Ba_{CO}}}, R_{t_{BaHe}}, R_{t_{HyCO}}, R_{t_{HyHe}}, C_{xl}$ ) arasında elektriksel direnç içermektedir. Bu eşitlikler doğrusaldır ve bu sayede sistem kolayca çözümlür. Termoelektrik metallerin karakteristikleri sıcaklığın bir fonksiyonudur ve iterasyon metodu gerektirir.

### Akışkan ve Sıcaklık Hesabı

Akışkan hesabında ilk önce akışkanın gaz ya da sıvı olması durumu göz önüne alınır. Termoelektrik yapı bloğu çeşitli boyutlara sahiptir. Soğuk bağlantıda termoelektrik metalin toplam alanı her yapı bloğu için hesaplanır. Termoelektrik elementlerin alanları, modül  $500 \text{ mm}^2$ 'yi aşabilirse,  $15 \text{ mm}^2$ 'den  $150 \text{ mm}^2$ 'ye kadar değişir.  $150 \text{ mm}^2$  alan için soğutma gücü  $3 \text{ W/cm}^2$ , performans katsayısı (COP) ise 1'dir. Soğutma gücü  $4,5 \text{ W/cm}^2$  olduğu zaman her yapı bloğundaki ısıtıcı gücü  $9 \text{ W/cm}^2$  olur.

Sudaki kütle akış oranı (kütle debisi)  $0,15 \text{ kg/s}$  iken havadaki kütle akış oranı (kütle debisi)  $10 \text{ g/s}$  'dir.  $100 \text{ W}$  lık bir soğutma gücü için hava ve su giriş ve

çıkış sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı hesabı:

$$\text{Hava: } 100\text{W} = (0,010 \text{ kg/s}) \times (1006 \text{ J/kgK}) \times \Delta T \\ \Delta T = 10\text{K}$$

$$\text{Su: } 100\text{W} = (0,15 \text{ kg/s}) \times (4186 \text{ J/kgK}) \times \Delta T \\ \Delta T = 0,6\text{K}$$

olarak hesaplanır.

Burada, termoelektrik sistem modellerinin temel oluşumu hakkında bilgi verilmiştir. Karakteri bilinen bir yapı bloğunun hesabı yapmak bu sistemle mümkündür. Su- su sistemleri, termoelektrik yapı bloğunun sıcak ve soğuk taraftaki akışkan sıcaklığının hesaplanması için gereklidir. Su-hava sistemleri, termoelektrik yapı bloğunun hava devresinin hesaplanması için gereklidir. Hava-hava sistemleri ise, her termoelektrik yapı bloğu için farklı iç koşulların hesaplanmasında gereklidir.

### TERMoeLEKTRİK SOĞUTMA İÇİN KULLANILAN METALLER VE PERFORMANS LİMİTLERİ

İdeal Peltier soğutma oranı, bir termoelektrik modülde;

$$\alpha_p = \Pi \times I = \alpha \times T_c \times I \quad (60)$$

değerine eşittir.

Burada;

$\Pi$ - Peltier Katsayısı,

$\alpha$ -Seebeck Katsayısı,

$T_c$ -Soğuk Tabaka Sıcaklığı(K),

$I$ -Doğru Akımı ifade etmektedir.

Isı sıcak plakadan soğuk plakaya doğru iletilir. Fourier ısı iletimi oranı;

$$Q = K \times \Delta T \quad (61)$$

Burada,

$K$ -Termal İletkenlik ve  $\Delta T$ -Soğuk Plaka ile Sıcak Plaka arasındaki Sıcaklık Farkıdır.

Ek olarak;

$$\text{Joule ısısı} = \frac{1}{2} \times I \times R^2 \quad (62)$$

$R$ -Termoelektrik Elementler'deki Elektriksel Dirençtir. Sonuç olarak, bir termoelektrik modüldeki net soğutma gücü hesaplandığında ;

$$Q_{net} = \alpha \times T_c \times I - K \times \Delta T - \frac{1}{2} \times I \times R^2 \quad (63)$$

olarak hesaplanır. \*

**\*Yazımızın devamı bir sonraki sayımızda yayınlanacaktır.**