

### 3. DENGE-BASAMAĞI İŞLEMLERİ

#### [\(Ref. e makaleleri\)](#)

Bir sınıf kütle-transferi cihazları ferdi birimler veya basamakların (kademeler) biraraya gelmesiyle oluşur. Sistemden iki akım karşılıklı yönlerde akar; her basamakta birbiriyle temas ederler, karışırlar ve sonra ayrılırlar. Kütle transferinin gerçekleşmesi için herbir basamağa giren akımların birbiriyle dengede olmamaları gerekir. Basamağı terkeden akımlar da dengede değildir, fakat giren akımlara göre dengeye daha yakındırlar. Bir basamaktaki karışma çok etkin ve yeterli sürede olduğunda, basamağı terkeden akımlar dengeye ulaşmışlardır; bu "ideal basamak" tır. Böyle çok basamaklı sistemlere "kaskad (şelale)" sistemler denir. Kaskad sistemlere örnek olarak, (a) distilasyon ve (b) katı ekstraksiyon cihazları gösterilebilir.

#### **a. Tipik Distilasyon Cihazı**

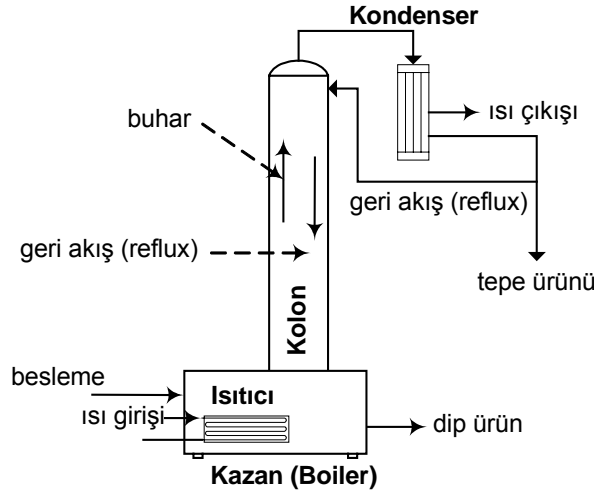
Sürekli bir distilasyon sistemi Şekil-19'da görülmektedir. A kabı distillenecek sıvı karışımı ile beslenir. B ısıtıcı yüzeyden ısı transferi ile sıvı kısmen buharlaşır. Kapta oluşan buhar, uçucu bileşence (hafif) daha zengindir. İki sıvının uçuculukları arasında büyük bir fark olmadıkça buhar her iki bileşeni de içereceğinden, yoğunlaştırıldığında saf bir madde yerine bir karışım elde edilir. Buhardaki uçucu bileşen miktarını artırmak ve yüksek kaynama noktalı bileşeni bu akımdan uzaklaştırmak için, kaptan çıkan buhar akımı kolondan (veya C kulesinde) geri-akan sıvı ile karşılaştırılır.

Düşük kaynama noktalı bileşence zengin bir sıvı akımı kolonun tepesinden verilir. Bu akıma geri-akış (reflux) denir. Kolonun tepesinden giren reflux soğuksa, buharla hemen kaynama noktasına kadar ısınır ve kolon boyunca sıvı kaynama, buhar yoğunlaşma sıcaklıklarında olurlar.

Buhardaki düşük kaynama noktalı bileşenin konsantrasyonunu artırmak için refluktaki hafif ürün miktarının, kabı terkeden buharın denge konsantrasyonundaki değerinden daha yüksek olması gerekir. Kolon içinde her seviyede bir miktar hafif ürün buhara difüzenir ve tekrar buharlaşır. Gerekli buharlaşma ısı, buhar fazındaki ağır ürünün eşdeğer miktardaki yoğunlaşma ısıyla sağlanır. Ağır ürün anında buhardan sıvı hale geçer. Net etki, buhardan ağır ürünün sıvıya transferi ve sıvıdan eşdeğer miktarda hafif ürünün buhara geçmesidir. Buhar kolonda yük-

selirken hafif ürünle iyice zenginleşmiştir. Kolondan aşağı inen sıvı ise, ağır ürünce (veya daha az uçucu bileşence) zenginleşir. Hafif ürünce zengin karışım kolonun tepesinden, ağır ürünce zengin akım altından alınır. Fazlar arasında iki-yönlü madde transferi olduğundan, toplam buhar miktarındaki değişiklik küçüktür.

Buhar akımının kolondan geçerken refluxs ile karşılaşarak hafif ürün konsantrasyonunun artmasına "zenginleşme (rectification)" denir.

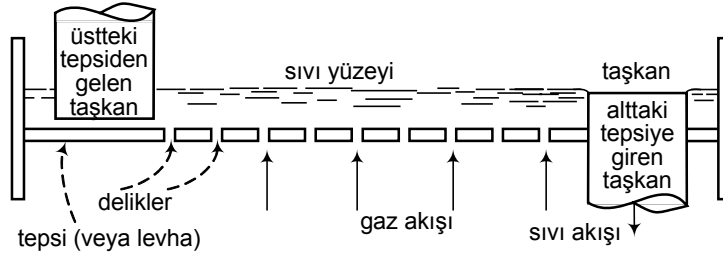


Şekil-19: Fraksiyon kolonlu bir kazan

Şekil-19'da görülen kolonda birbiri üzerine yerleştirilmiş çok sayıda delikli levha, veya tepsi bulunur. Böyle bir tepsiler kaskadı "elek-tepsili kolon" olarak bilinir.

Şekil-20'de tek bir elek-tepsi görülmektedir. Burada yatay bir A tepsisi vardır; buna bağlı ve aşağı doğru yerleştirilmiş, üst kısmı set görevi yapan bir taşkan (C) boru bulunur. Tepside çok sayıda ve hepsi aynı büyüklükte (1/4-1/2 inç dış çaplı olabilir) delikler vardır. Bir üstteki tepsinin taşkan borusu (D), A tepsisinin hemen hemen üzerine oturur. Böyle bir yapım sıvı ve buharın akışına izin verir. Sıvı, tepside tepsie geçerek kolondan aşağı akar; bu sırada tepsinin iki ucunda bulunan D ve C taşkanlarından geçer. Set, sıvı seviyesinin en düşük düzeyde kalmasını sağlar, seviyenin sıvı akış hızına bağımlılığını kaldırır. Buhar akımı, tepside B delikleri yoluyla çıkar. Normal çalışma koşullarında deliklerden geçen buharın hızı, deliklerde sıvı sızıntısına veya deliklerin "ıslanması" na olanak vermez. Buhar deliklerden geçerken çok sayıda küçük kabarcıklara bölünür, tepsideki sıvı

havuzundaki sıvı ile temas eder ve geçer. Buhar kabarcıklarının sıcaklığı nedeniyle sıvı kaynayan köpüklü bir kütle halindedir. Köpüğün üstü ile bir sonraki tepsinin altındaki bölge, kabarcıkların sönmesi nedeniyle sis halindedir. Bu sisin büyük bir kısmı, tekrar tepsideki sıvı içinde çökerken, bir kısmı buharla üstteki tepsiye taşınır. Tepsili kolonlar denilen cihaz sınıfı, elek-tepsili kolonlarla tanımlanabilir.



Şekil-20: Bir tepsinin şematik tanımı.

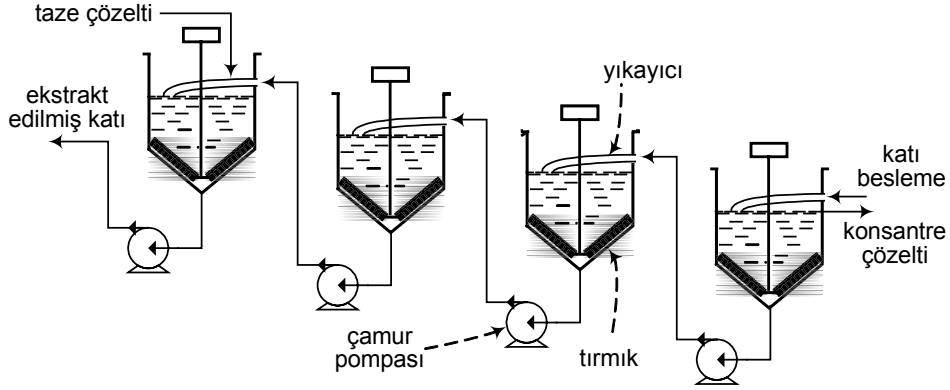
### b. Tipik Katı Ekstraksiyon (Leaching) Cihazı

Katı ekstraksiyonda, katı bir karışımda bulunan maddelerden biri, bunu çözebilen, fakat diğerlerine karşı inert olan bir çözücü ile çekilir. Tipik bir karşı-akımlı katı ekstraksiyon sistemi Şekil-21'de verilmiştir. Sistemde bir dizi birim bulunur; birimlerin herbirinde çözücü ile karıştırılmış ve katı kısmın çökmesi için bir süre dinlendirilmiş sıvı-katı karışımı vardır. Üstteki sıvı faz üst akımla bir önceki birime geçerken, katı kısım alttan karşı akımla, bir sonraki üniteye transfer edilir. Sıvı akım birimden birime akarken çözünebilir maddece zenginleşir ters yönde akan katı kısım ise aynı maddece fakirleşir. Sistemin bir ucundan alınan katı, ekstrakt edilmiş ve içerdiği çözünebilir maddeden arındırılmıştır. Diğer uçtan çıkan çözeltili, istenilen maddenin çoğunu çekmiştir. Ekstraksiyonun başarısı, çözücünün miktarına ve birimlerin sayısına bağlıdır. Yeteri kadar çözücü ve birim kullanılarak ekstraksiyon verimi istenilen düzeye çıkarılabilir.

### Basamak (Kademe) İşlemlerinin İlkeleri

Şekil-19 ve 21'de görülen elek-tepsi kulesi ve karşı-akımlı katı ekstraksiyon sistemi, birbirine bağlı bir dizi basamaklar veya birimlerden oluşan bir kaskattır. Ferdi basamaklar arasından geçen akımları inceleyebilmek için, sistemi bir bütün olarak ele almak gerekir. Basamaklı-temas sisteminde bir birime, kendisine bitişik

olan birimlerden birinden V fazı, diğerinden L fazı olmak üzere iki akım gelir, birbiriyle etkileşirler ve bir sonraki birimlere geçerler. Etkileşim birimleri üst üste (elektepsi kolonundaki gibi) veya yan yana (basamaklı katı ekstraksiyon işlemindeki gibi) yerleştirilir. Her iki yerleşim şekli için de aynı madde-dengeseli denklemleri kullanılır.

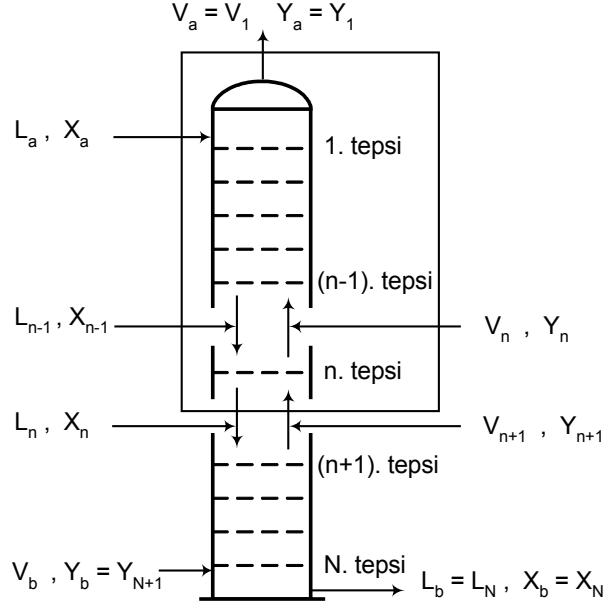


Şekil-21: Karşı akımlı bir ekstraksiyon sisteminin şematik görünümü.

### Basamaklı-Etkileşim Sistemleri İçin Terminoloji

Bir kaskadtaki etkileşim birimleri, bir uçtan başlanarak numaralanır. Burada numaralama, L fazının akış yönüne göre yukardan aşağı doğru yapılır. Sistemde toplam N tane basamak olduğuna göre sıralama en üstteki basamaktan (tepsi) başlanarak 1, 2, ... n - 1, n, n + 1, ...N şeklinde gösterilebilir. n basamağının üstünde n - 1, altında n + 1 basamakları bulunur. Sistemin son basamağı N inci basamaktır.

Şekil-22'de bir tepsili kolonun numaralanması görülmektedir. Basamaklardan herhangi birindeki akım ve konsantrasyon, basamak sayısı alt indis yazılarak tanımlanır. Örneğin, iki-bileşenli bir sistem için  $Y_{n+1}$ , n+1 basamağını terkederek V fazındaki A bileşeninin mol kesrini,  $L_n$ , n inci basamağı terkederek L fazının molal akış hızını gösterir. Sisteme giren ve çıkan akımlarla, bir basamaklı kuledeki giriş ve çıkış basamakları Şekil-22'de gösterilmiştir. Tablo-2'deki  $V_a$ ,  $L_b$ ,  $Y_a$  ve  $X_b$  tanımları, burada sırasıyla  $V_1$ ,  $L_N$ ,  $Y_1$  ve  $X_N$  e eşdeğerdir.



Şekil-22: Tepsili kolon için madde dengesi.

### Madde Dengeleri

Şekil-22'deki kaskadın 1 den n ye kadar olan basamaklarını ele alalım. Bu bölgedeki toplam madde girişi ve toplam madde çıkışlarını yazalım:

$$\text{Toplam madde girişi} = L_a + V_{n+1} \text{ mol / sa.}$$

$$\text{Toplam madde çıkışı} = L_n + V_a \text{ mol/sa}$$

Kararlı akış koşullarında madde toplanması veya azalması olmayacağından giriş ve çıkış birbirine eşittir.

$$L_a + V_{n+1} = L_n + V_a \quad (12)$$

Bu eşitliğe "toplam madde dengesi" denir. Diğer bir denge, A maddesi için giriş ve çıkışlar eşitlenerek yazılabilir. A maddesinin bir akımdaki mol sayısı, "akış hız $X_A$  nın akımdaki mol kesri" olduğundan, bölgedeki A bileşeni girişi, çıkışı (iki-karışımli bir sistem için), ve madde dengesi yazılır.

$$\text{A bileşeni girişi} = L_a X_a + V_{n+1} Y_{n+1} \text{ mo l/ sa}$$

A bileşeni çıkışı =  $L_n X_n + V_a Y_a$  mol / sa

$$L_a X_a + V_{n+1} Y_{n+1} = L_n X_n + V_a Y_a \quad (13)$$

B bileşeni için de bir madde dengesi yazılabilir, fakat iki bileşenli bir sistem için böyle bir eşitlik Denklem(12) ve (13) ten bağımsız olamaz. Çünkü Denklem(13), (1) den çıkarıldığından, kalan kısım B bileşeninin madde dengesi eşitliğini verir.

Kaskadın tümünü kapsayan denge denklemleri aynı yorumla çıkarılır. Bunlar,

$$\text{Toplam madde dengesi} = L_a + V_b = L_b + V_a \quad (14)$$

$$\text{A bileşeni madde dengesi} = L_a X_a + V_b Y_b = L_b X_b + V_a Y_a \quad (15)$$

### Entalpi Dengesi

Pekçok denge-basamağı işleminde genel enerji dengesi, mekanik-potansiyel-kinetik enerji terimleri ihmal edilerek basitleştirilir. Ayrıca, işlemde iş yapılmıyorsa ve sistem adyabatikse, basit entalpi-dengesi eşitliği uygulanır. İki-bileşenli bir sistemde, ilk n basamak için,

$$L_a H_{L,a} + V_{n+1} H_{V,n+1} = L_n H_{L,n} + V_a H_{V,a}$$

dır.  $H_L$  ve  $H_V$ , L ve V fazlarının entalpileridir (Btu / lb. mol). Tüm kaskad için entalpi dengesi aşağıdaki eşitlikte verilir.

$$L_a H_{L,a} + V_b H_{V,b} = L_b H_{L,b} + V_a H_{V,a} \quad (16)$$

(İkiden fazla bileşen içeren sistemlerde, ilk n basamaktaki toplam madde dengeleri ve tüm kaskadtaki madde dengeleri, iki-bileşenli sistemlerde olduğu gibidir. Herbiri bileşen için, alt indislerle ayrı eşitlikler yazılması gerekir.)

### İki - Bileşenli Sistemler İçin Grafik Yöntemleri

İki-bileşenli sistemlerde kütle-transferi problemleri grafik yöntemlerle çözülebilir. Yöntemlerden bazıları madde dengelerine, bazıları madde ve entalpi dengelerine dayanır.

#### Madde-Dengesi Hattı (Çalışma Hattı)

Bir bileşen için verilen madde dengesi denklemi (Denklem-13), kolonun bir basamağını terk eden L fazının konsantrasyonu ( $X_n$ ) ve aynı basamağa giren V fazının

konsantrasyonu ( $Y_{n+1}$ ) arasındaki ilişkiyi gösterir. Denklem(13), aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$Y_{n+1} = \frac{L_n}{V_{n+1}} X_n + \frac{V_a Y_a - L_a X_a}{V_{n+1}} \quad (17)$$

$X_n$  apsis,  $Y_{n+1}$  ordinat alınarak Şekil-23'deki gibi bir eğri çizilir. Kolondaki  $Y_{n+1}$  ve  $X_n$  gibi koordinatlı tüm noktalar bu eğri üzerine düşer. Bir karşı-akımlı kaskadın her noktasında V ve L akımlarının konsantrasyonları arasında böyle bir ilişkiyi gösteren bir hatta "çalışma hattı" denir. Bu hatlar karşı-akımlı etkileşim cihazlarının grafiksel çözümlerinde temel bilgilerdir.

### Çalışma Hattının Çizilmesi

Bir çalışma hattı çizebilmek için  $V_{n+1}$  ve  $L_n$  akımlarına ait bilgiler gerekir. Uygulamada normal olarak karşılaşılan pekçok durum, iki basit hal içinde yorumlanabilir.

1. L ve V, tepsideen tepsiye önemli bir değişme göstermez; bu durum zenginleşme (rectification) işlemi için doğrudur. Böyle bir halde, Denklem(17) deki  $L_n$  ve  $V_{n+1}$  sabittir ve çalışma hattı düz bir doğru şeklini alır, dolayısıyla iki uç nokta (veya herhangi iki nokta) verileriyle çizilebilir.

Çalışma hattı düz bir doğru olduğunda eğimi, L/V ye, veya L fazı akışı/V fazı akışına eşittir. Bu yorumla tüm-denge aşağıdaki şekilde yazılır.

$$\frac{Y_b - Y_a}{X_b - X_a} = \frac{L}{V} \quad (18)$$

(2) Herbir (sıvı ve gaz) akımın bir bileşeni fazlar arasında transfer edilmez. Buna göre, L fazındaki inert bileşenin molal akış hızı  $L'$ , V fazındaki diğer inert bileşeninki  $V'$  mol ise, kaskad boyunca  $L'$  ve  $V'$  sabit kalır. V ve  $V'$ , L ve  $L'$  arasındaki bağıntılar,

$$V_{n+1} = \frac{V'}{1 - Y_{n+1}}, \quad L_n = \frac{L'}{1 - X_n} \quad (19)$$

Bu eşitlikler Denklem(13) te yerine konularak, aşağıdaki Denklem(20) elde edilir.

$$L' \left( \frac{X_a}{1 - X_a} - \frac{X_n}{1 - X_n} \right) = V' \left( \frac{Y_a}{1 - Y_a} - \frac{Y_{n+1}}{1 - Y_{n+1}} \right) \quad (20)$$

$L'$  ve  $V'$  sabit olduğundan, alt indise gereksinim yoktur. Fazlar seyreltikse  $X$  ve  $Y$ , 1 e göre küçük değerler olacağından çalışma hattı düz bir çizgi halini alır.

### ÖRNEK:

Basamaklı bir kolonla, hava ile karışım halde bulunan aseton bir yağ içinde absorblatılmak istenmektedir. Giriş gazı %30 mol aseton içermekte olup, giriş yağında aseton yoktur. Havadaki asetonun %97 sinin absorblanması ve kolon dibindeki konsantre sıvının %10 mol aseton içermesi durumunda çalışma hattını çizin (100 mol/sa hava girdiği kabul ediliyor).

Uzaklaşan havadaki aseton konsantrasyonu, aseton madde dengesiyle bulunur.  $V$  fazındaki inert bileşen (burada hava)  $V'$  moldür.

$$V' = 100 - 30 = 70 \text{ mol hava}$$

Havadaki asetonun %97 si absorblanacağına göre kalan kısım % 3 tür.

$$\text{Çıkış gazındaki aseton} = 0.03 \times 30 = 0.9 \text{ mol}$$

$$\text{Çıkış yağındaki aseton} = 30 - 0.9 = 29.1 \text{ mol}$$

29.1 mol aseton absorblanan kısımdır. Bu miktar, yağ ile %10 luk çözelti halindedir. Buna göre  $L$  fazındaki inert bileşen ( $L'$ ),

$$L' = 29.1 \times 90/10 = 261.9 \text{ mol dür}$$

Bu değerlerden uç konsantrasyonlar bulunur.

$$Y_a = \frac{0.9}{70 + 0.9} = 0.0127, \quad X_a = 0, \quad X_b = 0.10, \quad Y_b = 0.30$$

Denklem(20) den, çalışma hattı eşitliği yazılır.

$$261.9 \left( 0 - \frac{X_n}{1 - X_n} \right) = 70 \left( \frac{0.0127}{1 - 0.0127} - \frac{Y_{n+1}}{1 - Y_{n+1}} \right)$$

$V'$  ve  $L'$  sabit olduğundan, alt indislere gerek yoktur. Eşitlik  $(1 - X)$  veya  $(1 - Y)$  ye göre çözülebilir;  $(1 - Y)$  ye göre aşağıdaki şekli alır.

$$\frac{Y}{1 - Y} = 0.0129 + 3.74 \frac{X}{1 - X}$$

Çalışma hattı  $X = 0$ ,  $Y = 0.0129$  ve  $X = 0.10$ ,  $Y = 0.30$  noktalarından geçer. Diğer noktaların koordinatları da benzer şekilde yukarıdaki eşitlikten bulunur.



Örneğin,

$X = 0.03$  olduğunda,

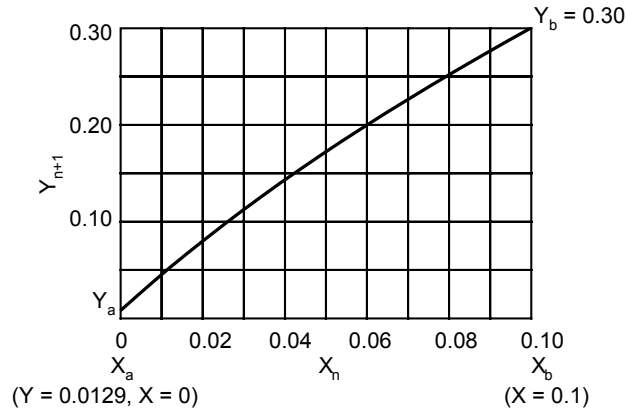
$$\frac{Y}{Y-1} = 0.0129 + \frac{3.74 \times 0.03}{0.97}$$

$$= 0.1286 \quad Y = 0.114$$

$X = 0.05$  olduğunda,  $Y = 0.173$

$X = 0.08$  olduğunda,  $Y = 0.253$

Elde edilen değerlerle, Şekil-23'deki  $Y_{n+1} - X_n$  grafiği elde edilir.



Şekil-23: Örnek problemin  $Y_{n+1}$  grafiği

### İdeal Etkileşim Basamakları

İdeal basamak, gerçek bir basamağın kıyaslanabildiği bir standarttır. İdeal bir basamakta, basamağı terk eden V fazı, aynı basamağı terk eden L fazı ile dengededir. Örneğin, Şekil-22'deki n basamağı ideal ise,  $X_n$  ve  $Y_n$  konsantrasyonları, fazlar arasındaki dengeyi gösteren  $X_e - Y_e$  eğrisi üzerinde bir noktanın koordinatlarıdır. Tepsili bir kolonda ideal basamaklara "mükemmel basamaklar" denir.

(Dizaynlarda ideal basamakların kullanılabilmesi için, bunlarla gerçek bir basamağın bağıntısını sağlayan ve basamak verimi veya tepsi verimi denilen bir düzeltme faktörüne gereksinim vardır.)

## Entalpi-Konsantrasyon Diyagramlarında Karışma ve Ayrılma İşlemlerinin Çizilmesi

Yoğun (intensive) özelliklerin (öz entalpi, konsantrasyon gibi) birbiriyle ilişkisini gösteren çeşitli grafikler hazırlanabilir. Örneğin, Şekil-24(a)'deki basit karışma işlemi ele alalım. İşlem,  $m_R$  lb / sa hızla akan R akımıyla,  $m_S$  lb / sa hızla akan S akımının karışarak,  $(m_R + m_S)$  lb/sa hızla T akımını oluşturmasını göstermektedir. R, S ve T akımlarının konsantrasyonları, sırasıyla  $X_R$ ,  $X_S$  ve  $X_T$  (lb madde/lb akım), öz entalpileri  $H_R$ ,  $H_S$ ,  $H_T$  (Btu/lb) dir. İstenildiğinde, kütle birimleri yerine molal birimler kullanılabilir.

İşlem adyabatikse,  $Q = 0$ ,  $W_S = 0$  dır ve, mekanik-potansiyel-kinetik enerji terimleri ihmal edilerek, Entalpi dengesi:

$$m_R H_R + m_S H_S = (m_R + m_S) H_T \quad (21)$$

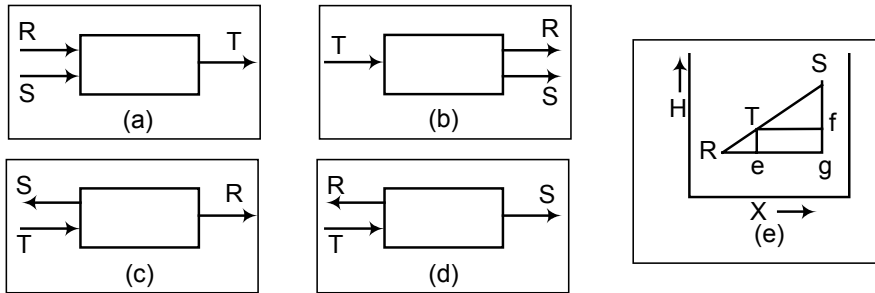
A bileşeninde madde dengesi:

$$m_R X_R + m_S X_S = (m_R + m_S) X_T \quad (22)$$

Bu iki Denklem,  $m_R / m_S$  ye göre düzenlenir ve birbirine eşitlenir.

$$\frac{m_R}{m_S} = \frac{H_S - H_T}{H_T - H_R} \quad \frac{m_R}{m_S} = \frac{X_S - X_T}{X_T - X_R}$$

$$\frac{H_S - H_T}{H_T - H_R} = \frac{X_S - X_T}{X_T - X_R} \quad (23)$$



Şekil-24: Adyabatik karışma işlemleri

Herbir akım grafikte bir nokta ile tanımlanır. Noktanın koordinatları, akımın entalpi ve konsantrasyonudur. Şekil-24(e)'de H ve X ilişkisini gösteren eğri çizilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi (ve Denklem-23den de anlaşıldığı gibi) TSf ve RTe üçgenleri benzer üçgenlerdir; RT ve TS nin eğimleri aynıdır; bu nedenle RTS tek bir düz hat şeklindedir: adyabatik bir karışımda, ürün ve iki akımın HX hatlar tek ve doğru bir hat şeklindedir. Şekil-24(e) diğer üç işleme de uygulanabilir. Bunlar Şekil-24'de (b), (c), (d) de gösterilmiştir.