

6. GAZ ABSORPSİYONU

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

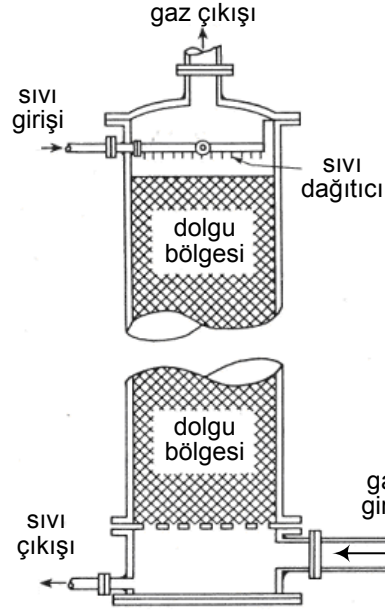
Bu bölümde gaz absorpsiyonu ve stripping veya desorpsiyon olarak bilinen kütle transferi işlemleri incelenmiştir. Gaz absorpsiyonunda çözülebilir bir buhar çözülebilir bir gazın inert bir gazla karışımından az ya da çok çözülebildiği bir sıvı vasıtasıyla absorplanmaktadır. Sıvı suyla amonyak ve hava karışımından amonyağın yıkanması bir örnek olarak verilebilir. Çözünen sıvıdan distilasyon yoluyla ayrılabilir ve absorplanan sıvı ya atılır ya da tekrar kullanılabilir. Bazen çözünenin sıvıdan uzaklaştırılması sıvının inert bir gazla temas yardımıyla yapılabilir ki bu tip operasyonlar gaz absorpsiyonunun tersi şeklinde oluşur ve buna desorpsiyon ya da gaz sıyrılması denir.

1. Dolgulu kulelerin Dizaynı

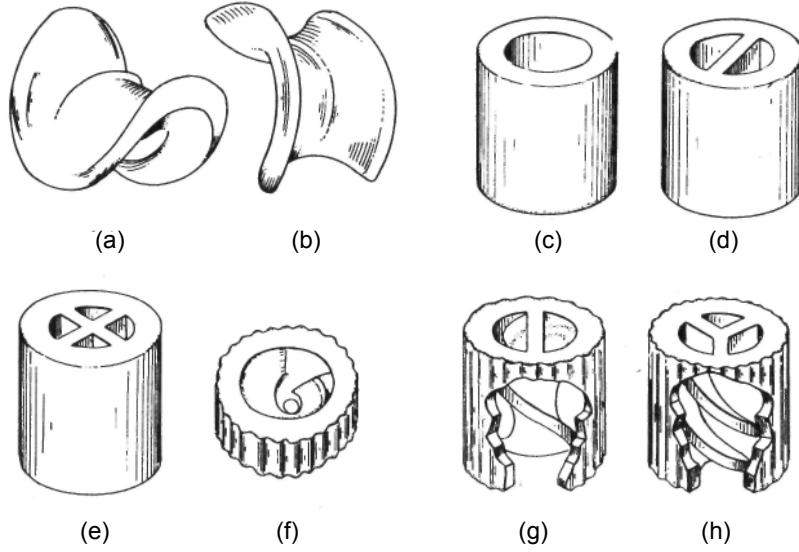
Gaz absorpsiyonu ve benzer operasyonlarda kullanılan cihaz olan dolgulu kulelere bir örnek Şekil-1 de görülmektedir.

Cihaz, altta bir gaz girişi, üstte bir sıvı girişi, altta ve üstte sıvı ve gaz çıkışları ve inert katı şekillerle yapılan beslemenin kütesinin yer aldığı silindirik bir kolon ya da kuleden meydana gelir. Katı şekiller kule dolguları diye adlandırılmaktadır. Saf çözücü veya zayıf likör diye adlandırılan çözücü içindeki çözünenin yer aldığı çözeltiden oluşan giren sıvı bir dağıtıcı yardımıyla dolguların üzerinden yayılır ve ideal bir işlem içinde düzgün bir şekilde dolguların yüzeyini ıslatır. Zengin gaz dağıtılma boşluğuna dolguların altından girer ve yarık içerisinden yukarıya doğru sıvının akış yönünün tersi yönde akar. Dolgular, sıvı ve gaz arasında geniş bir alan ve fazlar arasında daha yakın bir temas sağlar. Zengin gaz içindeki çözünen, kuleye giren taze sıvı tarafından absorplanır ve seyrelen gaz üstten ayrılır. Sıvı, kuleden aşağıya doğru akarken çözünen açısından zenginleştirilir konsantre sıvı, sıvı çıkışı içerisinden geçerek kulenin altından ayrılır.

Çeşitli dolgulu kuleler bulunmuş ve bazı tipleri ortak kullanımdadır. Dolgular kuleye toptan boşaltılan(rasgele dökülen) ve istiflenmiş (elle doldurulan) tipler diye ayrılmaktadır. Dökülen dolgular büyük boyutlar içinde ¼ den 2 inç lik birimlerden oluşur ve daha küçük kolonlarda daha çok kullanılır. Doldurulan dolgular içindeki birimler 2 den 8 inç e kadardır; bunlar sadece geniş kulelerde kullanılır. Sıkça karşılaşılan dolgular Şekil-2 de gösterilmektedir.



Şekil-1: Dolgulu kolon



Şekil-2: Tipik kule dolgu maddeleri; (a) ve (b) sele (veya eyer), (c) ve (d) raşing halkası, (e) çapraz ayırmalı halka, (f) yel-spiral halka, (g) çift-spiral halka, (h) üçlü spiral halka

Şekil-2a dan e ye kadar olan halka ve ağırlıklar dökülen dolguları; Şekil-2f den h ye kadar olanlar içinde spiral bölme halkaları elle doldurulmuştur. Çapı 2 ve 3 inç olan büyük Raschig halkaları sıklıkla doldurulmuştur. Diğer dolgular plastik rozetler ve tel örgülerinden yapılan özel şekiller halinde nadirde olsa uygulama bulur.

Bir kule dolgusundaki temel gereklilikler şunlardır:

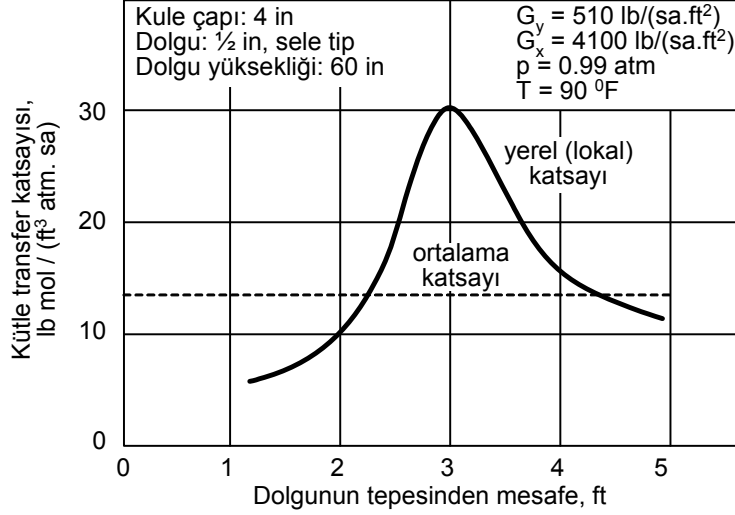
1. Kuledeki sıvıya karşı kimyasal olarak inert olmalıdır.
2. Aşırı ağırlık olmaksızın güçlü olmalıdır.
3. Basınç düşüşü veya aşırı sıvı tutulması olmaksızın her iki akım için uygun yollar ihtiva etmelidir.
4. Sıvı ve gaz arasında iyi bir temas sağlanmalıdır.
5. Fiyatları kabul edilebilir olmalıdır.

Böyle çoğu kule dolguları hamur, porselen veya grafit gibi hafif, inert, ucuz maddelerden yapılmaktadır. Çelik veya alüminyumun ince duvarlı metal halkaları da bazen kullanılmaktadır. Akışkanlar için yüksek boşluklu alanlar ve geniş yollar dolgu birimlerinin düzensiz ya da boş olarak yapılmasıyla başarılabilir, böyle bir durumda %60 veya daha yüksek bir porozite yüzdesiyle açık yapılara bağlanabilirler. Doldurulmuş yataklardan geçerek açık kanallardan kesintiye uğramadan akan kümelenmiş dolgular dökülmüş dolgulardan daha düşük basınç düşüşleri verir ki gaz sıkça hız ve yön değişikliğine uğratılmalıdır. Bu avantaj bir denge olmakla birlikte doldurulmuş dolgular içindeki akışkanlar arasında daha bir bağlantıyı gösterir.

Sıvı ve Gaz Arasında Temas

Sıvı ve gaz arasında iyi bir bağlantı özellikle geniş kulelerde karşılanması zor gerekliliklerdendir. Dolguların üzerinden dağıtılan sıvı kuleden aşağıya doğru dolguların yüzeyinden ince bir film içinde akar.

Gerçekte filmler bazı yerlerde kalınlaşırken diğer yerlerde inceler, bundan dolayıdır ki sıvı küçük akımlar halinde toplanır ve belirli yollardan dolgular içersinden akar. Özellikle düşük sıvı hızlarında dolgu yüzeyinin çoğunluğu kuru olabilir veya durgun bir sıvı ile kaplanır. Bu etki geniş doldurulmuş kulelerin zayıf performansının ana sebebi olan kanallaşma olarak bilinir.



Şekil-3: Havadan karbon tetraklorürün, dibütil ftalat içine absorpsiyonunda yerel kütle transfer katsayılarının değişmesi

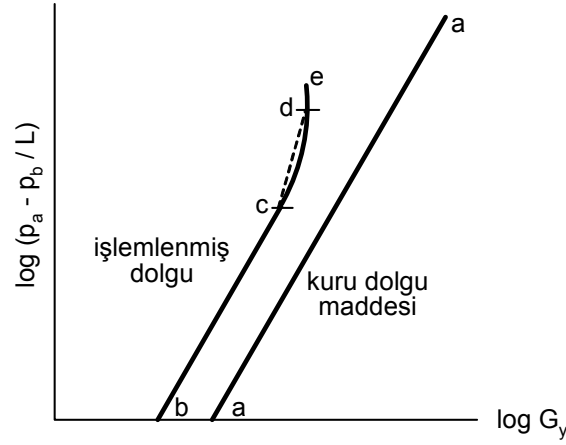
Kanallaşma doldurulmuş dolgulu kulelerde daha şiddetli iken kırılmış katılarla doldurulmuş dolgularda daha az ve halkalar gibi düzenli birimlerin boşaltıldığı dolgularda en az şiddettedir. Orta boyutta kulelerde kanallaşma dolgunun çapından en az sekiz kat fazla kule çapına sahip olarak düşürülebilir. Kule çapının dolgu çapına oranı 8:1 den daha az ise sıvı dolguların dışından ve kolunun duvarlarından akar. Bu gerekliliğin sağlandığı dolgulu küçük kulelerde bile sıvı dağılımı ve kanallaşma kolunun performansı üzerinde büyük bir etkiye sahiptir. Şekil-3, ½ inçlik Berl eyerleriyle doldurulmuş 4inçlik kulede karbon tetraklorün havada dibütil ftalat içerisinde absorpsiyonunda yerel kütle transferi katsayısının dolguların üzerinden uzaklıkla değişimini gösterir. Katsayı sıvı dağılımı geliştikçe dolguların üzerinden 3ft aşağıya kadar yükselir, sonra kanallaşmanın kulenin düşük kısımlarında başlamasıyla belirgin bir biçimde düşer. En büyük yerel katsayı ortalama katsayının neredeyse 2,5 katı kadar olur. Kirschbaum, 8mm lik Raschi halkalarıyla doldurulmuş 12inçlik kolonda yer alan distilasyondaki yerel ısı transfer katsayısındaki benzer değişimi belirtmiştir. Geniş dolgularla doldurulmuş uzun kulelerde kanallaşma etkisinden bahsedilebilir ve sıvıyı tekrar dağıtıcılar normal olarak dolgu bölümü içinde her 10 ile 15 ft te yer almaktadırlar.

Düşük sıvı hızlarında, başlangıç sıvı dağılımı dikkate alınmaksızın dolgu yüzeyinin çoğu akan sıvı tarafından ıslatılmamaktadır. Sıvının hızı yükseldikçe dolgu yüzeyinin ıslanan kesimi tüm dolgu yüzeyinin ıslak ve etkili olduğu kritik sıvına kadar artar. Kritikten daha yüksek sıvı hızlarında kanallaşma etkisi önemli değildir.

Akış Hızları Sınırlaması; Yükleme ve Akma

Verilen dolguları içeren ve belirli bir akış hızıyla sulanan kulede gaz akış hızının bir üst sınırı vardır. Bu sınır seviyesindeki gaz hızı taşma hızı diye adlandırılır. Bu hız, dolguların görüntülenmesiyle sıvının geciktirilmesinin gözlenmesinden dolgulu yatak boyunca basınç düşüşü ve gaz akış hızının arasındaki ilişkinin incelenmesinden bulunabilir. Bu üç farklı etki tarafından tanımlanan taşma hızı tanımlama metoduna bağlı sınırlarda değişir ve tamamıyla tanımlanmış sabitten ziyade akış hızının aralığı olarak görünür.

Şekil-4 dolgulu bir kulede gaz akış hızı ve basınç düşüşü arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Birim dolgu derinliğindeki basınç düşmesi akışkanın sürtünmesinden ileri gelir; bu gaz akış hızı G_v ye karşı logaritmik koordinatlarla gösterilmiştir, genellikle boş kuleye bağlı olarak kesikli alanın birim alanından birim saatte geçen gazın lb olarak ifade edilmesidir. Bundan dolayı G_v yüzey gaz hızına $G_y = \mathbf{V}_{sy} \rho_y$ eşitliği ile ilişkilendirilir, burada ρ_v gazın yoğunluğudur. Dolgular kuru olduğu zaman çizgi düz bir hattır ve eğim 1.8 civarındadır. Böylece basınç düşmesi hızın 1,8 inci kuvvetiyle artar ki türbülent akış içindeki genel sürtünme kaybı kanunu ile örtüşür. Eğer dolgu, kulenin taralı bölümün alanındaki G_z lb/saat hızında sabit bir akışkanla sulanırsa gazın akış hızı ve basınç düşmesi arasındaki ilişki Şekil-4 de gösterilen bcde hattını takip eder.



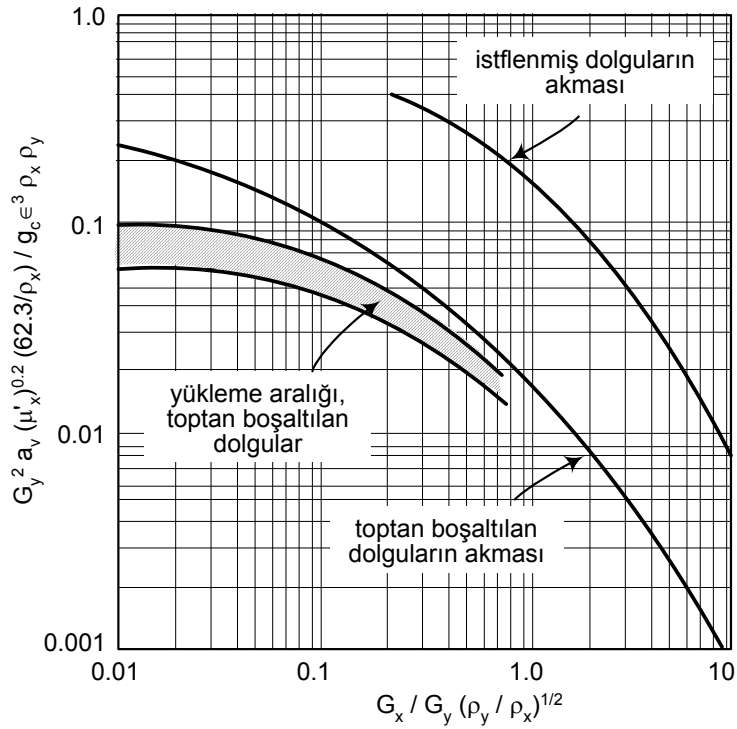
Şekil-4: Dolgulu kulede basınç düşmesi;
c: yükleme noktası, e: akma noktası

Düşük ve orta hızlarda basınç düşmesi akış hızının 1,8 inci kuvvetiyle orantılı olmasına karşın aynı gaz hızında kuru dolgulardakinden daha büyüktür. Gaz hızı artarken çizgi yukarıya doğru şekilde c ile gösterilen başlangıç noktasında eğrilir. Sonra cde hattıyla gösterilen daha yüksek bir hızda basınç düşmesi neredeyse sabit gaz hızında keskinlikte artar. Yükselme cd çizgisiyle gösterildiği gibi düzgün bir eğri olabilir, yada c ve d noktalarında kesikli çizgilerle gösterilen keskin kesilmeler gösterebilir. Basınç düşüşü bc hattı boyunca artarken dolguda tutulan sıvının miktarı sabittir ve gazın hızından bağımsızdır. Dolgudan geçerek aşağıya doğru hareket eden sıvı gazın hareketiyle etkilenmemektedir. Yükleme noktası olarak anılan c noktasında gaz akışı sıvının aşağıya hareketini yavaşlatmaya başlar. Dolgu içerisinde yer yer sıvı toplanmalarına rastlanır. Gaz hızı daha da arttıkça sıvı gecikmesi artar ve basınç düşüşü cde hattı boyunca önceki gaz hızından daha hızlı bir şekilde artarak değişir. Taşma noktası olan e noktasında, dolgunun üzeri yayılan gaz kabarcıkları boyunca sıvı katmanıyla örtülür. Sıvı artık dolgu boyunca aşağıya doğru akamaz ve katman sıvı gazla birlikte kulenin üzerinden çıkıncaya kadar büyür.

İşlem gören bir dolgulu kuledeki gazın hızı taşmaya neden olacak hızdan daha düşük olmak zorundadır. Ne kadar düşük olacağına seçimi dizayn eden kişiye bağlıdır. Ne kadar düşük hız o kadar düşük güç harcanması ve o kadar geniş kule demektir. Hız büyüdükçe güç maliyeti artar ve kule küçülür. Ekonomik olarak, en

tercih edilen gaz hızı ekipmanındaki sabit harcamalarla güç harcaması arasındaki dengeye dayanır. Optimum hız kitap boyunca belirtilen metotlarla tahmin edilebilmektedir. Bu hız genellikle akma hızının yarım katı kadar olmaktadır.

Dolgulu kuleler birim dolgu yüksekliğindeki kesin basınç düşmesine dayanarak dizayn edilmektedir. Absorpsiyon kuleleri için dizayn değeri birim uzunluktaki dolguda 0.25 ile 0.5 inç H₂O iken distilasyon kolonları için bu değer 0.5-0.8 inç H₂O aralığındadır. Şekil-5 de gösterilen yükleme aralığının üst ve alt sınırları sırasıyla 1.00 ve 0.5 inç H₂O/ft teki basınç düşüşü değerlerine benzer.



Şekil-5: Dolgulu kulelerde yükleme ve akma (taşma) hızları

Şekil-5 dolgulu kulelerde tahmini yükleme ve taşma (akma) hızlarının ilişkisini vermektedir. Bu ilişki $G_y^2 a_v (\mu'_x)^{0.2} (62.3/\rho_x) / g_c^3 \rho_x \rho_y$ gurubuna karşı $G_x / G_y (\rho_y / \rho_x)^{1/2}$ gurubunun logaritmik karşılığıdır, burada,

G_z = sıvının kütle hızı, lb/ft²-saat

G_y = gazın kütleli hızı, lb/ft²-saat

ρ_x = sıvının yoğunluğu, lb/ft³

ρ_y = gazın yoğunluğu, lb/ft³

a_v = birim dolgu hacmindeki kuru dolguların yüzey alanı, ft²/ft³

μ'_x = sıvının viskozitesi, sentipoise

g_c = Newton kanunu çevirim faktörü, 4.17x10⁸ft-lb/lb_f-saat²

ϵ = dolgu bölümündeki porozite ya da parça boşluğu, boyutsuz

Şekil-5 in ordinatları boyutsuzdur ve hal birimleri kullanılmak zorundadır. Kütleli hızlar kule bölümlerinin toplamına dayanırlar.

ÖRNEK

1 inçlik seramik Raschig halkalarıyla doldurulmuş bir kule birim saatte 25000ft³ gazı muamele etmek için inşa edilmiştir. Giren gaz hacimce %2 oranında amonyak içermektedir. Amonyak içermeyen su absorban olarak kullanılmaktadır. Sıcaklık 68 °F ve basınç 1 atm dir. Gaz akışının sıvı akışına oranı birim sıvıda 1 lb gaz dir. Eğer gaz hızı taşma hızının yarım katı ise, kulenin çapı ne olmalıdır?

Çözüm

Şekil-5 deki guruplar için kullanılacak değerler aşağıdaki gibidir.

Giren gazın ortalama molekül ağırlığı $29 \times 0.98 + 0.02 \times 17 = 28.7$

$$\rho_y = \frac{28.7 \times 492}{359 (460 + 68)} = 0.0745 \text{ lb/ft}^3$$

$$\rho_x = 62.3 \text{ lb/ft}^3$$

$$g_c = 4.17 \times 10^3 \text{ ft lb/(lb}_f \text{ sa}^2)$$

$$\mu'_x = 1 \text{ cP}$$

$$G_x / G_y = 1.0$$

1 inçlik seramik halkaları için (Tablo1) $a_v = 58 \text{ ft}^2/\text{ft}^3$ ve $\epsilon = 0.73$

$$\frac{G_x}{G_y} \sqrt{\frac{\rho_y}{\rho_x}} = \sqrt{\frac{0.0745}{62.3}} = 0.0346$$

Şekil-5 den,

$$\frac{G_y^2 a_v (\mu'_x)^{0.2} (62.3/\rho_x)}{g_c \epsilon^3 \rho_x \rho_y} = 0.18$$

Taşmadaki kütlese hız,

$$G_y = \sqrt{\frac{0.18 \times 4.17 \times 10^8 \times 0.73^3 \times 0.0745 \times 62.3}{58 \times 1^{0.2}}} = 1.530 \text{ lb}/(\text{ft}^2 \text{ sa})$$

Toplam gaz akışı $25,000 \times 0.0745 = 1,860$ lb/saat olur. Eğer gerçek hız taşma hızının yarısı kadar ise, kulenin taralı alanı S,

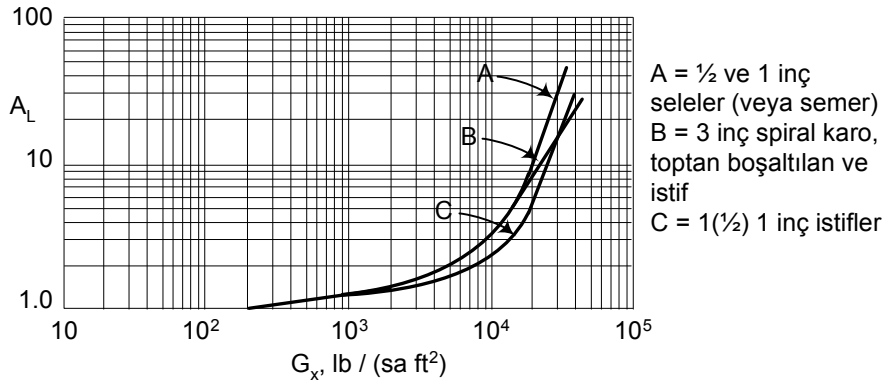
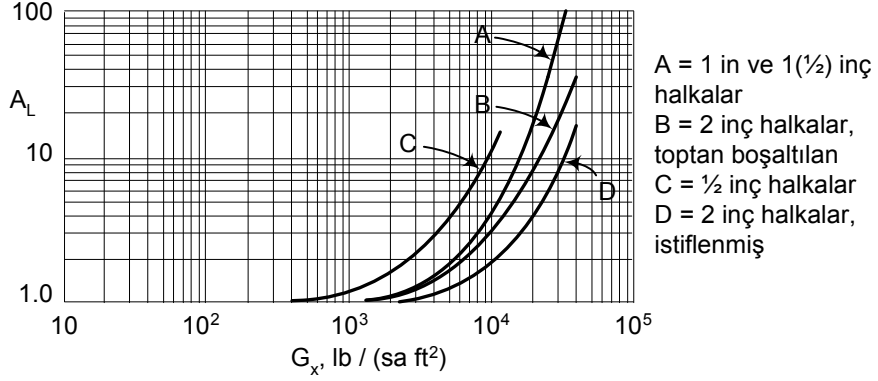
$$S = \frac{1860}{1530/2} = 2.43 \text{ ft}^2$$

Kulenin çapı ise $(2.43/0.7854)^{1/2} = 1(3/4)$ ft olur.

Islak Dolgularda Basınç Düşmesi

Sıvıyla sulanan katı yataklarındaki basınç düşmesi aynı gaz hızına sahip kuru dolgulardakinden daha büyüktür. Islak dolgulardaki basınç düşmesine dair temel ilişkiler güvenilir olmamasına rağmen Şekil-6 kuru yataktaki benzer bir basınç düşmesinden faydalanarak basınç düşmesini tahmin için gerekli basit düzeltme faktörünü verir. Birim saatte birim alandaki lb olarak suyun hızı G_z bilindiği zaman A_L faktörü Şekil-6 dan bulunabilir ve Eşitlik(7-26) den bulunan kuru dolgu içindeki basınç düşmesi için bir çarpan olarak kullanılabilir.

Şekil-6 yükleme noktasından daha az akışlar ve yaklaşık suyunki kadar vizkoziteye sahip olan sıvılar için uygulanabilir. Akışkanın sürtünmesine bağlı küçük basınç düşmeleri hariç dolgulu kuledeki basınç sabittir.



Şekil-6: Islanmış dolgularda basınç düşmesi

2. Absorpsiyonun Prensipleri

Önceki bölümde gösterildiği gibi, doldurulmuş absorpsiyon kulesinin çapı işlenen gaz ve sıvının niceliklerine, özelliklerine ve bir akımın diğerine oranına bağlıdır. Kulenin uzunluğu ve dolguların toplam hacmi istenilen konsantrasyon değişimlerinin büyüklüğü ve birim dolgu hacmindeki kütle transfer hızına bağlıdır. Kule uzunluğu hesaplamaları madde dengeleri, entalpi dengeleri, etkin kuvvetin ve kütle transferi katsayılarının öngörülmesini içerir.

Madde Dengeleri

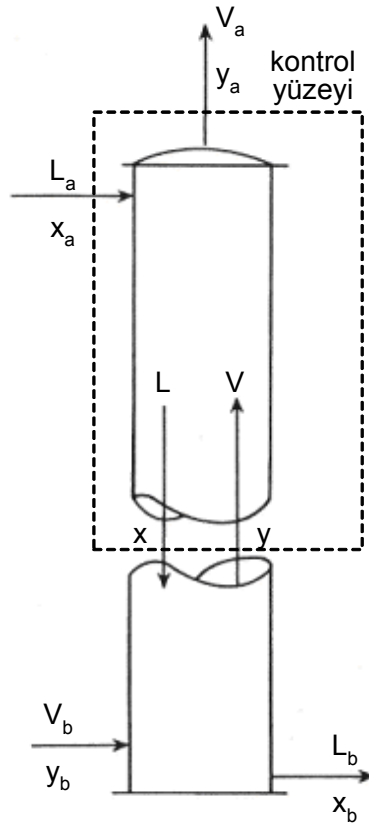
Şekil-7 de gösterilen dolgulu absorpsiyon kuleleri gibi farklı temas işletmelerinde alan temas işletmelerindeki gibi bileşimde ani farklılaşmalar yoktur. Onun yerine

bileşimdeki farklılaşmalar ekipmanın bir ucundan diğerine bir süreklilik içindedir. Şekil-7 de kesikli çizgiyle gösterilen rast gele bir bölümün üzerindeki kolunun bir kesitindeki madde dengesi aşağıdaki gibidir:

Toplam madde: $L_a + V = L + V_a$

A Bileşeni $L_a x_a + V_y = L x + V_a y_a$

burada V gaz fazı için L ise sıvı fazı için kulenin aynı noktasındaki molal akış hızıdır. L ve V fazı konsantrasyonları x ve y aynı yere uygulanır.



Şekil-7: Dolgulu kolonda madde dengesi

Tüm madde dengesi eşitlikleri terminal akımlarına bağlıdır:

$$\text{Toplam madde:} \quad L_a + V_b = L_b + V_a \quad (3)$$

$$\text{A Bileşeni} \quad L_a x_a + V_b y_b = L_b x_b + V_a y_a \quad (4)$$

Eşitlik (3) ve (4), alan temas kolonu için olan Eşitlik (18-3) ve (18-4) e benzerdir.

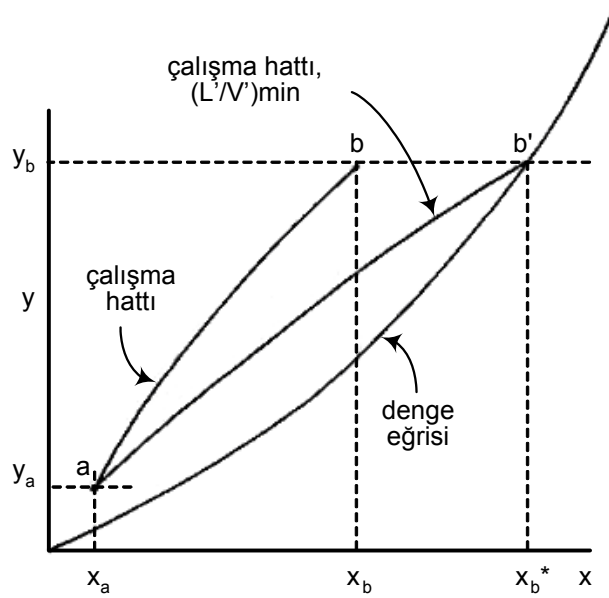
Farklı temas işletmeleri için olan işlem hattı eşitlikleri alan temas kolonu için olan Eşitlik (18-11) ve (18-14) e benzerdir,

$$Y = \frac{L}{V} x + \frac{V_a y_a - L_a x_a}{V} \quad (5)$$

$$L' \left(\frac{x_a}{1-x_a} - \frac{x}{1-x} \right) =$$

$$V' \left(\frac{y_a}{1-y_a} - \frac{y}{1-y} \right) \quad (6)$$

Eşitlik (5) ve (6) daki x ve y kolon boyunca herhangi bir yerde birbiriyle temas halinde olan sıvı ve gazın yığın bileşimini temsil eder. Verilen bir yükseltideki bileşimlerin kolon içindeki pozisyonlardan bağımsız olduğu varsayılmaktadır. Absorpsiyon işlemlerinde V ve L akış hızları kolon içindeki bir noktadan diğeri önemli ölçüde değişir ve işlem hatları sıklıkla eğrileşir.



Şekil-8: Gaz-sıvı oranı sınırlaması

Gaz-Sıvı Oranı Sınırlaması

Eşitlik (5) işlem hatlarının eğimi olan sıvı ve gazın molal akış hızı oranı olan L/V yi göstermektedir. Böylece, verilen bir gaz akışı için sıvı akımındaki azalma işlem hattının eğimini düşürür. Şekil-8 deki işlem hattı ab yi düşünelim. Gaz hızı ve terminal konsantrasyonlar olan x_a , y_a ve y_b nin hızlandırıldığını sıvı akışı L nin düşürüldüğünü varsayalım. İşlem hattının üst ucu denge hattı yönünde yükselir ve güçlü karışımın konsantrasyonu olan x_b artar. Şekil-8 de ab' hattı ile gösterildiği gibi işlem hattı denge hattına değdiği zaman mümkün olan maksimum karışım konsantrasyonu ve minimum olası sıvı hızı bulunur. Bu şartlarda, kütle transferi için konsantrasyon farkı kulenin dibinde sıfır iken oldukça derin dolgulu bir bölüm gereklidir. Gerçek bir kulede eğer kule işlem yapmak için ise sıvı hızı bu minimumdan büyük olmak zorundadır.

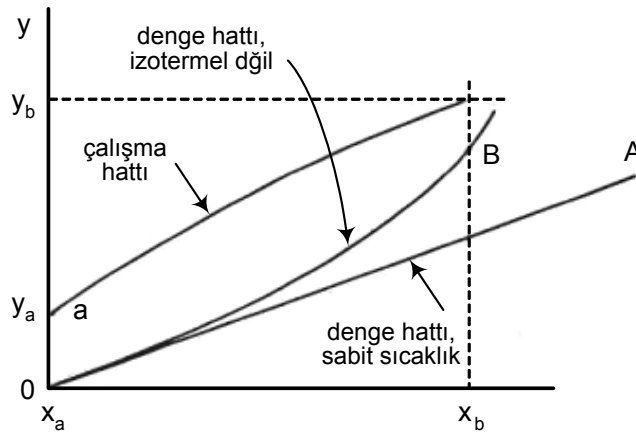
Sınırlayıcı sıvı-gaz oranı (L'/V'), ordinatının y_b olduğu denge çizgisindeki x_b^* apsisi noktasında $y=y_b$ ve $x=x_b^*$ yapılarak Eşitlik (6) dan hesaplanabilir.

L'/V' oranı karşı-akımlı kulelerde ekonomik bir absorpsiyon için önem taşır. Eğer sıvı-gaz oranı geniş ise işlem ve denge çizgileri arasındaki ortalama uzaklıkta geniş olur, konsantrasyon farkı kule boyunca olumludur ve kule kısadır. Eğer çözünen gaz arttırılırsa güçlü karışımın dolayısıyla iyileştirmenin maliyeti yüksek olur. Diğer yandan eğer daha az sıvı kullanarak konsantrasyon maliyetleri düşürülürse absorplayıcı içindeki yürütücü kuvvetler azalır ve kule daha uzun ve pahalı olur. Optimum sıvı hızı sabit ekipman harcamalarına karşı geliştirme harcamalarının dengelenmesiyle bulunmaktadır. Genel olarak, ekonomik işlemler için işlem çizgisi denge çizgisine yaklaşık olarak paralel olmalıdır.

Dolgulu Kulelerde Sıcaklık Değişimleri

Zengin içerikli gaz absorpsiyon kulesine beslendiğinde kule içindeki sıcaklık en alttan en yukarıya önemli değişim gösterir. Bu sıcaklık değişimi denge eğrisinin şeklini de etkiler. Absorpsiyon hızı, gaz girişinin olduğu yerde geniş olup yoğunlaşma ısı ve absorplanan maddenin çözeltisi sıvının sıcaklığını arttırmak için yeterli olabilir. Absorplanan maddenin kısmi basıncının artan sıcaklık ile artmasından dolayı sıvının kesin bileşimiyle dengede olan buharın konsantrasyonu sıcaklıkla artar. Henry kanunu uygulansa bile denge eğrisi bu durumda güçlü bir eğri halinde olabilir.

Kule içindeki sıcaklık değişiminin denge eğrisindeki etki Şekil-9 da gösterilmektedir. OA hattı izotermal işlemler için denge eğrisidir ve OB hattında kulenin altındaki sıcaklık kulenin üstündekinden daha büyüktür. Üst sıcaklığı her iki durumda da aynıdır. Eğer sıcaklık etkisi yeterince büyükse denge eğrisi işlem hattını kesebilir ve süreç kulenin dibine yakın yerlerde işlem yapılamaz hale gelir. Bazen soğutma spiralleri veya diğer soğutma araçları ısınının bu etkisini düşürmek için kuleye monte edilmektedir.



Şekil-9: Denge eğrisine sıcaklık değişiminin etkisi

İzotermal olmayan şartlar altında denge eğrisinin hesaplanması entalpi dengeleriyle yapılmaktadır.

Seyreltik ya da orta kuvvette gazla beslenen kulelerde, kolondaki sıcaklık değişimi küçüktür ve denge eğrisi düzgün bir hat ya da ona yakın bir görünümündedir.

Diferansiyel Bölümlerdeki Madde Dengesi

Diferansiyel uzunluktaki bir kolon boyunca iki fazlı akışta, V , L , x ve y çok az değişir. Bu durumu gösteren diferansiyel eşitlik Eşitlik (2) nin diferansiyelinin alınmasıyla bulunmaktadır.

$$d(Lx) = d(Vy) \quad (7)$$

Bu eşitlik kolonun diferansiyel bölümü üzerindeki A bileşeninin madde dengesidir.

Eşitlik (7) deki her terim A bileşeninin kolonun farklı bölümündeki ara yüzeyin alanı boyunca bir fazdan diğerine transferindeki hızdır. Böylece,

$$d(L_x) = d(V_y) = d(N_A) \quad (8)$$

burada N_A birim saatte lb moller içindeki A bileşenin transfer hızıdır. Transfer hızıyla fazların özellikleri ve işlemin şartları arasındaki ilişki gelecek bölümün konusudur.

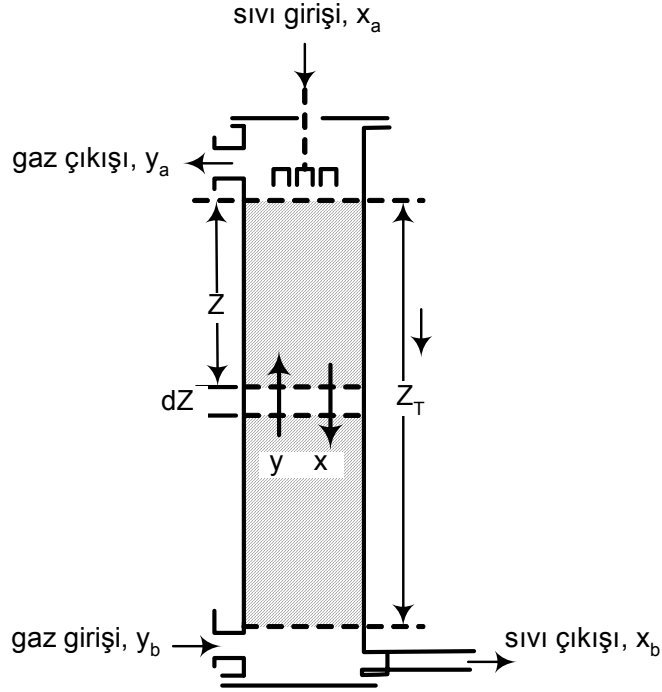
3. Absorpsiyon Hızı

Dolgulu kulenin uzunluğu sıvı ve gaz fazlarındaki kütle transferinin hızıyla etkilenen absorpsiyon hızına bağlıdır. Aşağıdaki uygulama iki sınırlılığa sahiptir: absorplanan bileşen ve sıvı arasında kimyasal reaksiyonlar için herhangi bir şart yoktur ve çözelti ısı ihmal edilmektedir. Eşzamanlı kütle ve ısı transferi Bölüm 22 ve 29 da yer almaktadır. Sıvı halindeki kimyasal reaksiyonun eşlik ettiği absorpsiyon bu kitabın konusu içinde değildir.

Çift-Direnç (İki-Film) Teorisi

Gazdan sıvıya transfer olan çözünen gaz A bileşeni gaz ve sıvı gibi iki difüzyon rezistansı boyunca seriler içinden geçmek zorundadır. Bu transfer teorisi iki film teorisi diye adlandırılmaktadır, fakat laminar filmler rezistansın bir kısmını açıklarken ikili rezistans teorisi terimi gerçek süreci daha iyi tanımlar.

Şekil-10 da gösterilen dolgulu kuleyi düşünelim. Dolgulu bölümün üzerinden kule içindeki Z ft lik bir uzaklıkta dZ yüksekliğindeki kısa bölüm içine absorplanmayı varsayalım. Absorpsiyon hızı dN_A lb mol/saat olsun. Bu bölümdeki fazlar arası ara yüzey alanı dA ft² dir. A bileşeninin mol kesri içindeki gaz ve sıvı akımları arasındaki konsantrasyonlar sırasıyla y ve z dir.



Şekil-10: Dolgulu absorpsiyon kulesi

Gaz yığınının ara yüzeye A bileşeninin transfer hızı,

$$dN_A = \frac{k_y}{\phi} (y - y_i) dA$$

burada k_y = kütle transfer katsayısı, gaz fazı, lb mol/ (ft²) (saat), ϕ = göreceli hız faktörü, y_i = ara yüzeyin gaz tarafında A'nın mol kesri, $y - y_i$ = gaz rezistansını geçen sürükleyici kuvvet

Gaz absorpsiyonu ya da stripping içinde B bileşeni inert ve ara yüzeye göre durgun iken A bileşeni ara yüzeyi geçer. Sonra $z = 1$ ve Eşitlik (20-51) den Φ gaz fazına geçen B bileşeninin logaritmik ortalama konsantrasyondur ya da,

$$\phi = \frac{(1 - y_i) - (1 - y)}{2.303 \log \frac{1 - y_i}{1 - y}} = \frac{(y - y_i)}{2.303 \log \frac{1 - y_i}{1 - y}} = (1 - y_i)_L \quad (10)$$

Sıvı fazdaki A bileşenin ara yüzeyden sıvı yığına transfer hızı Eşitlik (52) den,

$$dN_A = k_x (x_i - x) dA \quad (11)$$

k_x = kütle transfer katsayısı, sıvı fazı, lb mol/(ft²)(saat)

x_i = ara yüzeyin sıvı tarafındaki A bileşenin mol kesri

x = sıvı yığını içindeki A bileşenin mol kesri

Sıvı fazı transferi için eşitliklerden, Bölüm 20 de bahsedilen nedenlerden dolayı Φ atılmaktadır.

Eğer ara yüzeyde denge olduğu varsayılırsa, x_i ve y_i denge eğrisi üzerinde bir noktanın koordinatlarıdır ve x_c ye karşı y_c eğrisi x_i ve y_i arasındaki ilişkiyi gösterir.

Eşitlik (9) ve (11) temas halindeki iki sıvı faza uygulanabilen ısı transferi eşitliklerine benzerdir. Bu eşitlikler şöyle de yazılabilir.

$$dq = h_1 (T_h - T_i) dA \quad dq = h_2 (T_i - T_c) dA$$

q = ısı transferi hızı

A = ara yüzeyin alanı

T_h, T_c = 1. ve 2. fazın ortalama yığın sıcaklıkları

T_i = Ara yüzeyin sıcaklığı

h_1, h_2 = 1. ve 2. faz için özel ısı transferi katsayıları

Isı transferinde olmayan iki sıkıntı kütle transferinde meydana gelir: (1) Φ faktörü kütle transferinde hesaba katılmak zorundadır ve ısı akışında herhangi bir karşılayan faktör görünmez. Bunun nedeni ısı transferi sadece bir enerji akışı iken kütle transferinde maddenin fiziksel hareketi meydana gelir. (2) Isı transferinde ara yüzey sıcaklığı T_i her iki fazda da aynı iken x_i ve y_i ara yüzey denge konsantrasyonları eşit değildir.

A bileşenin gazdan kaybolma hızının sıvı tarafından bu bileşenin kazanılma hızına eşit olmasından dolayı Eşitlik (9) daki dN_A terimi Eşitlik (11) dekine eşittir. Ayrıca, Eşitlik (8) de gazdan transfer hızı $d(V_y)$ sıvıya olan transfer hızı $d(L_x)$ dir. Sonra,

$$dN_A = \frac{k_y}{\phi} (y - y_i) dA = k_x (x_i - x) dA = d(V_y) = d(L_x) \quad (12)$$

Kimyasal reaksiyonlar ve ısı etkilerinin yokluğunda Eşitlik(12) dolgulu bir kulede kütle transferi teorisi için bir temel sağlar.

Eşitlik(12) hem gaz hem de sıvı dirençleri için terimler içermektedir. Bu terimler ayrıca da değerlendirilebilir. Gaz fazı için eşitlik,

$$\frac{k_y}{\phi} (y - y_i) dA = d(V y) \quad (13)$$

Bu eşitlik başka kullanımlar için de dönüştürülebilir. İlk önce, dolgulu bir kule içindeki gerçek transfer alanı kolayca ölçülemeyeceğinden dolayı dA alanı dolgulu bölümün hacmi ve birim hacimdeki alanla çarpımı yer değiştirilebilir. Ayrıca eğer S kulenin seçilmiş alanı ise, dZ ft yüksekliğindeki bölüm içindeki dolguların hacmi S dZ dir, ve

$$dA = a S dZ \quad (14)$$

burada a dolgulu bölümün birim hacmindeki ara yüzeyin bilinmeyen alanıdır, dolgu hacminin birim ft³ deki alanında.

d(V_y) terimi daha uygun bir şekle de indirgenebilir. Birim saatte mol olarak B bileşeninin akış hızı V' olsun,

$$V = \frac{V'}{1 - y}$$

B bileşeni absorplanmadığı için V' kule boyunca sabittir. Bundan dolayı,

$$d(V y) = V' d\left(\frac{dy}{1 - y}\right) = V' \frac{dy}{(1 - y)^2} = V \frac{dy}{1 - y} \quad (15)$$

Eşitlik (15) den d(V_y) ve Eşitlik (14) den dA nın Eşitlik (13) yerine konulması ve S ile bölünmesi sonucu şu eşitliği verir

$$\frac{k_y a (y - y_i) dZ}{\phi} = \frac{V}{S} \frac{dy}{1 - y} = G_{My} \frac{dy}{1 - y} \quad (16)$$

burada G_{My} birim saatte birim alandaki gazların lb mol olarak molal kütle hızları V/S ile yer değiştirir.

Benzer bir uygulama sıvı faz için de aşağıdaki eşitliği verir.

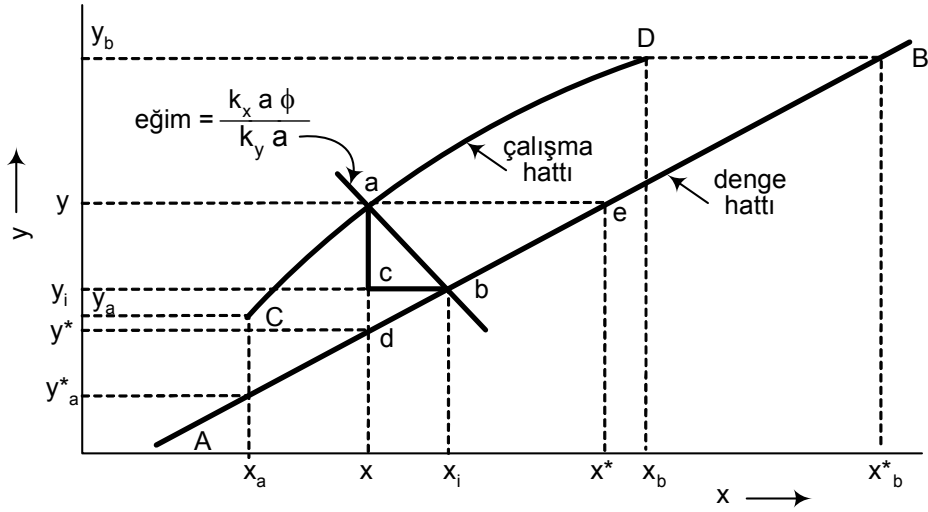
$$k_x (x_i - x) dA = d(L x)$$

$$k_x a (x_i - x) dZ = G_{My} \frac{dx}{1-x} \quad (17)$$

Burada G_{Mx} molal sıvı kütle hızıdır. G_{Mx} ve G_{My} kulenin toplam kesitine dayanmaktadır.

k_y ve a faktörleri ve k_x ve a faktörleri tek bir bileştirilmiş nicelikler olarak düşünülmemektedir. Bunlar dolgulu kulelerde deneysel testlerde değerlendirilmektedir.

Pratik kullanım için, Eşitlik (1) ve (17) Z_r dolgusunun toplam derinliğine göre integrale edilmelidir. Bu integrasyon tekniği üç duruma dayanır: denge eğrisinin şekli, kule içindeki akımın bileşimindeki değişim, ve iki rezistans göreceli önemi. En genel durumda, denge eğrisi güçlü bir eğime sahiptir, giren gaz konsantredir ve çıkan gaz zayıftır, ve her iki rezistans da önemlidir. En ast durumda denge eğrisi bir doğrudur, sıvı ve gazın her ikisinin konsantrasyonlarındaki değişim küçüktür, ve rezistanslardan biri ya da diğeri ihmal edilebilir. Ara kompleksliklerdeki durumlarda ayrıca göz önüne alınabilmektedir. Aşağıda uygulamada önce en genel metoda değinilmekte olup daha sonra da çeşitli basitleştirilmiş metotlara değinmiştir.



Şekil-11: $\Delta x \Delta y$ üçgen, dolgulu kolon

Genel Durum: $\Delta x \Delta y$ Üçgeni

Aşağıdaki durumda $k_y a$ ve $k_x a$ nın bilindiği varsayılmaktadır. Bu katsayılara daha sonra değinilecektir. Şekil-11 işlem eğrisi CD ve denge eğrisi AB yi göstermektedir. Dizayn koşulları bilgilerine dayanarak Örnek 18-1 de gösterildiği gibi işlem çizgisi noktalı çizgilerle belirlenmiştir. Gaz ve sıvı konsantrasyonlarının sırasıyla y ve x olduğu bir kolon içindeki seviyeyi düşünelim. Bu konsantrasyonlar işlem çizgisi CD üzerinde y_e alan bir noktanın koordinatlarıdır. Her iki faz içinde transfer hızının aynı olmasından dolayı $G_{My} dy/(1-y) = G_{Mx} dx/(1-x)$. Eşitlik (16) ve (17) den,

$$\frac{k_y a}{\phi} (y - y_i) dZ = k_x a (x_i - x) dZ$$

$$\frac{y - y_i}{x_i - x} = \frac{\phi k_x a}{k_y a} \quad (18)$$

Eşitlik (18) y için çözüldüğünde aşağıdaki eşitliği verir

$$y = -\frac{k_x a \phi}{k_y a} + (y_i + \frac{k_x a \phi}{k_y a} x_i) \quad (19)$$

Eşitlik (19) (x, y) ve (x_i, y_i) noktalarından geçen $-(k_2 a \phi / k_1 a)$ eğimine sahip bir doğrudur. Böylece, eğer ϕ , $k_2 a$ ve $k_1 a$ faktörleri biliniyorsa, eğim hesaplanabilir ve a noktasından geçen ab hattı çizilebilir. Denge eğrisiyle ab hattının keşimi olan b noktasının koordinatları x_i ve y_i dir. ac uzaklığı gaz direnç sürükleyici kuvvet olan $y - y_i$ olup, bc uzaklığı sıvı direnç sürükleyici kuvveti $x_i - x$ dir. abc üçgeni $\Delta x \Delta y$ üçgeni olarak adlandırılmaktadır. İşlem çizgisi boyunca kurulan çeşitli üçgenlerle Δx ya da Δy grafikten y veya x in bir fonksiyonu olarak tayin edilebilmektedir.

Bu sürükleyici kuvvetleri kullanmak için Eşitlik (16) daki değişkenler ayrılabilir ve eşitlik dolgu bölümlerinin uzunluğu olan Z_T ye göre grafik olarak integre edilebilir.

$$\int_{y_a}^{y_b} \frac{\phi dy}{(1-y)(y-y_i)} = \left(\frac{k_y a}{G_{My}} \right) \int_0^{Z_T} dZ = \left(\frac{k_y a}{G_{My}} \right) Z_T \quad (20)$$

Z nin yukarıdan aşağıya doğru ölçülebildiği, y_a nın çıkan gazın konsantrasyonu ve y_b nin giren gazın konsantrasyonu olduğu varsayılmaktadır. ϕ ve $1 - y$ terimleri y ile önemli değişiklik gösterirken integral işareti altında tutulurlar. $(k_y a / G_{My})$ niceliğinin sabit olduğu varsayılmaktadır. G_{My} , A bileşeninin absorpsiyonundan dolayı aşağıdan yukarıya doğru ve $k_y a$ gazın kütle hızına dayanır ve aşağıdan yukarı-

ya doğru azalmasından dolayı bu bir yaklaşımdır. Bu faktörlerin değişiminin etkisi dengeyi sağlamaya yöneliktir ve $k_y a / G_{M_y}$ oranı giren gaz çok konsantre olmadıkça sabite yakındır. $k_y a / G_{M_y}$ içinde meydana gelen bu değişim giriş ve çıkış değerlerinin aritmetik ortalamaları kullanılarak öngörülebilir. Bu integrasyon ayrıca kulenin etkinliğinin Z nin tüm değerleri için aynı olduğunu kabul eder. Şekil-3 deki verilerden görüldüğü gibi, bu varsayım eğer kanallaşma aşırı ise güvenilir değildir.

Eğer gaz fazının konsantrasyonu kulenin boyuna bağlı olarak değişiyorsa Φ , $k_y a$ faktörleri de değişim gösterir. Bu faktörler kulenin iki ucu için değerlendirilebilir ve bunların aritmetik ortalaması $\Delta x \Delta y$ hatlarının eğiminin hesaplanmasında kullanılabilir. Deneysel veriler $k_y a$ ya da $k_y a / \Phi$ olarak verilebilir ve bundan dolayı da kullanılmak zorundadır. Φ , $k_y a$ ile bağlantılı olduğu zaman Φ integral işaretinden kurtulur ve Eşitlik (20) nin sağ tarafında kullanılır.

Eşitlik (20) nin sıvı tarafı,

$$\int_{x^a}^{x^b} \frac{dx}{(1-x)(x_i-x)} = \left(\frac{k_x a}{G_{M_x}} \right) Z_T \quad (21)$$

Bu eşitliği kullanırken $x_i - x$, $\Delta x \Delta y$ üçgeninden okunur ve Eşitlik (21) in grafik integrasyonunu alınmak için kullanılır.

Eşitlik (20) ve (21) arasındaki seçim rast gelelidir. Her iki eşitlikte aynı sonucu verir. Eğer daha büyük iki sürükleyici kuvvet kullanılıyorsa tam sonuca varmak daha iyidir.

ÖRNEK

1 inçlik halkalarla doldurulmuş bir kule hava içerisinde kükürt dioksit gazı suyla temizlenmesiyle absorplanması amacıyla dizayn edilmiştir. Giren gazın hacimce %20 SO_2 olup ayrılan gaz hacimce %0.5 den fazla SO_2 içermemektedir. Giren su SO_2 içermemektedir. Sıcaklık $30^\circ C$ ve toplam basınç 2atm dir. Su akışı minimumdan iki kattan fazladır. Havanın akış hızı (SO_2 içermeyen) $200 lb/ft^2$ -saat tir. Dolguların derinliği ne olmalıdır?

Aşağıdaki eşitlikler 1 inçlik halkalarla doldurulmuş kulede $30^\circ C$ de SO_2 in absorpsiyonu için kütle transferi katsayılarına aittir:

$$k_x a = 0.152 G_x^{0.82}$$

$$(k_y a) / \phi = 0.028 G_y^{0.7} G_x^{0.25}$$

burada G_x ve G_y tüm kulenin kesitine dayanan birim saatte birim alandaki lb olarak sıvı ve buharın kütleli hızlarıdır.

Çözüm

İlk adım denge eğrisinin çizilmesidir. Basınç 2 atm olduğundan dolayı eğer ordinarlar yarıya bölünürse 30°C ve 1 atm e uygulanan Örnek 17-2 deki eğri kullanılabilir. Bunun nedeni SO_2 in kısmi basıncının artan basınçla değişmemesi ve gaz fazındaki SO_2 in mol kesrinin aynı sıvı konsantrasyonun 1 atm de yarısına eşit olan $p_A/2$ olmasıdır. Denge eğrisi Şekil-12 de görüldüğü gibidir. Denge eğrisi düşük uçta hafifçe eğrilmesine karşın $x > 0.001$ olduğunda neredeyse düz bir doğru halini alır.

En düşük su hızı (x_b^*, y_b) ve (x_a, y_a) noktalarından geçen işlem çizgisi eşitliğinin kullanılmasıyla hesaplanmaktadır. Eşitlik (6) tüm kolonu kapsayacak biçimde yazıldığında şu hali alır.

$$G'_{Mx} \left(\frac{x_b}{1-x_b} - \frac{x_a}{1-x_a} \right) = G'_{My} \left(\frac{y_b}{1-y_b} - \frac{y_a}{1-y_a} \right)$$

burada G'_{My} ve G'_{Mx} kükürt dioksit-serbest hava ve suyun molal kütleli hızlarıdır. Dizayn şartlarından:

$$y_b = 0.20 \quad x_a = 0 \quad y_a = 0.005$$

$$G'_{My} = 200 / 29 = 6.90 \text{ mol/ft}^2 \text{ sa}$$

Denge eğrisinden $y_b = 0.20$, $x_b^* = 0.0092$ olduğu zaman en düşük su hızı G'_{Mx} şu eşitlikle verilmektedir.

$$G'_{Mx} \left(\frac{0.0092}{0.9908} - 0 \right) = 6.90 \left(\frac{0.20}{0.80} - \frac{0.005}{0.995} \right)$$

$$G'_{Mx} = 182 \text{ mol/ft}^2\text{-saat olur.}$$

Gerçek su hızı en düşüğün iki katıdır veya $364 \text{ mol/ft}^2\text{-saat}$, ve x_b şu eşitlikten hesaplanmaktadır.

$$364 \frac{x_b}{1-x_b} = 6.90 \left(\frac{0.20}{0.80} - \frac{0.005}{0.995} \right)$$

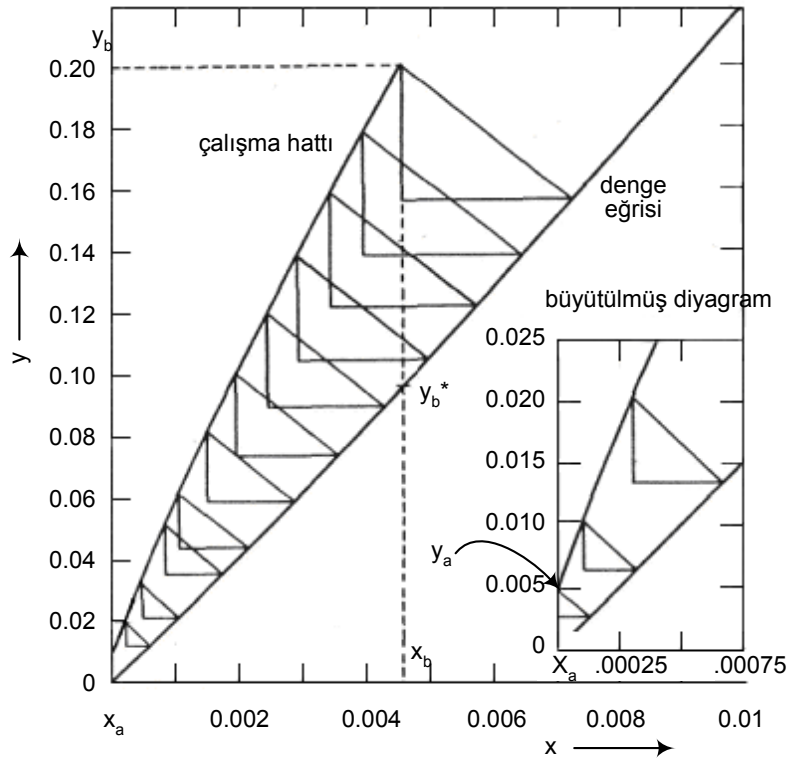
$$x_b = 0.0062 \text{ olarak bulunur.}$$

İşlem eğrisi için eşitlik şöyle olur.

$$364 \frac{x}{1-x} = 6.90 \left(\frac{y}{1-y} - \frac{0.005}{0.995} \right)$$

$1 - x$ teriminden x in ihmal edilmesiyle bu eşitlik z için çözülebilir.

$$x = 0.0189 \frac{y}{1-y} - 0.00010$$



Şekil-12: Örnek için, denge eğrisi, çalışma hattı, $\Delta x \Delta y$ üçgenleri

y ye 0.005 ve 0.200 arasında değerler atayarak ve x için uygun değerleri hesaplayarak işlem hattı üzerindeki noktalar bulunabilir. İşlem hattı Şekil-12 üzerinde çizilmektedir. Bu çizgi z aksisine doğru hafifçe konkavdır.

Kütle transferi katsayıları $k_x a$ ve $k_y a / \phi$ yi hesaplamak için hem gaz hem de sıvı akımlarının kütleli hızlarının hesaplanması gerekmektedir. Bunların kule üzerindeki madde dengelerinden bulunabilir. SO_2 -serbest hava akışı $6.9 \text{ mol/ft}^2\text{-saat}$ tir. Gazla birlikte giren SO_2 miktarı $(0.20/0.80) 6.9 \times 64.1 = 111 \text{ lb/ft}^2\text{-saat}$ dir. Toplam giren gaz $200 + 111 = 311 \text{ lb/ft}^2\text{-saat}$ olur. Gazla birlikte ayrılan SO_2 $(0.005/0.995) 6.9 \times 64.1 = 2 \text{ lb/ft}^2\text{-saat}$ ve toplam çıkan gaz miktarı $200 + 2 = 202 \text{ lb/ft}^2\text{-saat}$ dir. Su tarafından absorplanan SO_2 $111 - 2 = 109 \text{ lb/ft}^2\text{-saat}$ dir. Kulenin üzerinden beslenen su miktarı $364 \times 18 = 6550 \text{ lb/ft}^2\text{-saat}$ olur ve güçlü çözelti $6,550 + 109 = 6,659 \text{ lb/ft}^2\text{-saat}$ dir.

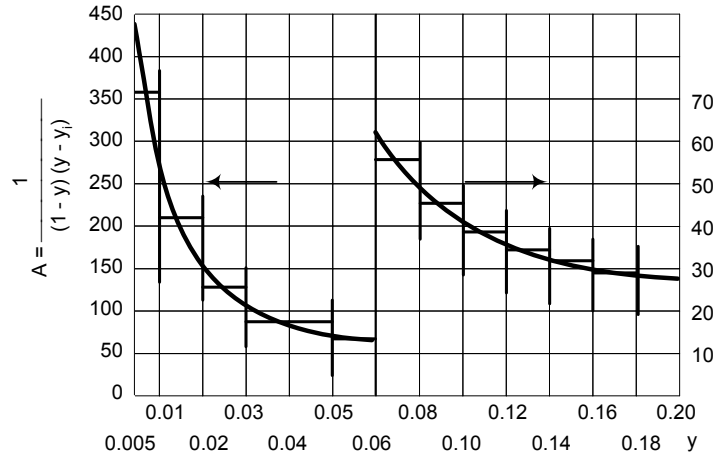
Sıvı direnci üstten alta belirgin bir değişim göstermez ve sıvı katsayısı sıvının ortalama kütleli hızından $6550 + 109/2 = 6605 \text{ lb/ft}^2\text{-saat}$ hesaplanabilir. Sonra

$$k_x a = 0.152 \times 6605^{0.82} = 206$$

Kulenin altındaki gaz direnci G_y deki değişimden dolayı üstten fark edilenden daha küçüktür. $k_y a / \Phi$ niceliği dolgu bölümlerinin her iki ucu için hesaplanmaktadır ve aritmetik ortalama sabit olarak kullanılmaktadır.

$$\left(\frac{k_y a}{\phi}\right)_b = 0.028 \times 6659^{0.25} \times 311^{0.7} = 14.1$$

$$\left(\frac{k_y a}{\phi}\right)_a = 0.028 \times 6659^{0.25} \times 202^{0.7} = 10.4$$



Şekil-3: Örneğin grafiksel integrasyonu

Örnek 2 için grafiksel integrasyon

y	1 - y	y _i	y - y _i	A	Δy	Ort. A	Δ alan
0.005	0.995	0.0027	0.0023	437			
0.01	0.99	0.0065	0.0035	288	0.005	355	1.77
0.02	0.98	0.0135	0.0065	157	0.01	207	2.07
0.03	0.97	0.0205	0.0095	108	0.01	128	1.28
0.05	0.95	0.0350	0.015	70.2	0.02	84	1.68
0.06	0.94	0.0430	0.017	62.5	0.01	65	0.65
0.08	0.92	0.0580	0.022	49.5	0.02	55.5	1.11
0.10	0.90	0.0730	0.027	41.1	0.02	45.0	0.90
0.12	0.88	0.0885	0.0315	36.0	0.02	38.5	0.77
0.14	0.86	0.105	0.035	33.2	0.02	34.5	0.69
0.16	0.84	0.1215	0.0385	30.9	0.02	32	0.64
0.18	0.82	0.138	0.042	29.1	0.02	29.5	0.59
0.20	0.80	0.1555	0.0445	28.1	0.02	28.5	0.57
Toplam							12.72

Bunların ortalaması 12.3 dür. Δx Δy üçgenlerinin hipotenüsünün eğimi -206/12.3=-16.7.

Şekil-12 de Δx Δy üçgenlerinin işlem hattı boyunca pozisyonlarının sayısı belirtilmektedir. Denge eğrisiyle üçgenlerin hipotenüsün kesişimi y nin varsayılan değerlerini simgeleyen y_i değerlerini verir. Tablo- ve Şekil-13, 1/(1-y)(y-y_i) ordinatının hesaplanması ve aşağıdaki eşitliğin grafik integralini gösterir.

$$\int_{0.005}^{0.200} \frac{dy}{(1-y)(y-y_i)}$$

İntegral 12.72 ye eşittir. Ayrıca,

$$\left(\frac{k_y a}{\phi G_{My}} \right)_a = \frac{10.4}{6.90/0.995} = 1.50$$

$$\left(\frac{k_y a}{\phi G_{My}}\right)_b = \frac{14.1}{6.90/0.80} = 1.63$$

Bunların ortalaması 1.56 ve Eşitlik (20) den dolgulu kolonun uzunluğu $Z_r = 12.72/1.56 = 8.21\text{ft}$ olur.

ÖRNEK

Taşmayı göz önüne alarak önceki örnekteki kulenin dizaynını kontrol ediniz.

Çözüm

1 inçlik halkalar için, $a_v = 58 \text{ ft}^2/\text{ft}^3$ ve $\epsilon = 0.73$ (Tablo-1). Ayrıca, kulenin tabanında,

$$M_y = 0.8 \times 29 + 0.2 \times 64 = 36.7.$$

$$\rho_y = \frac{36.7 \times 2 \times 273}{359 \times 303} = 0.184 \text{ lb/ft}^3$$

$$\rho_x = 62.3 \text{ lb/ft}^3$$

$$G_x = 6600 \text{ lb/ft}^2 \text{ sa}$$

$$G_y = 311 \text{ lb/ft}^2 \text{ sa}$$

$$\mu'_x = 0.80 \text{ cP}$$

$$\frac{G_x}{G_y} \sqrt{\frac{\rho_y}{\rho_x}} = \frac{6600}{311} \sqrt{\frac{0.184}{62.3}} = 1.16$$

Şekil-5 den,

$$\frac{G_y^2 a_v (\mu'_x)^{0.2}}{g_c \epsilon^3 \rho_x \rho_y} = 0.017$$

$$G_y = \sqrt{\frac{0.017 \times 4.17 \times 10^8 \times 0.73^3 \times 62.3 \times 0.184}{58 \times 0.80^{0.2}}} = 755 \text{ lb/ft}^2 \text{ sa}$$

Kule içindeki en yüksek kütle akış hızı $311 \text{ lb/ft}^2\text{-saat}$ olduğundan dolayı, kule yüklemesi $311/755=0.41$ veya taşma hızının %41 olur.

Basitleştirilmiş Yöntemler; Toplam Katsayılar

Geçen bölümde tanımlanan genel yöntem hem eğri hem de doğru hatlara uygulanabilir. Bununla beraber bu yöntem özel $k_{y,a}$ ve $k_{x,a}$ katsayıları hakkında bilgiye gereksinim gösterir. $k_{y,a}$ ve $k_{x,a}$ katsayılarının deneysel tayini oldukça güçtür ve bu değerler spesifik alanlardaki ekipman ve sistemler için daima bilinemeyebilir. Denge eğrisi bir doğru halini aldığında deneysel olarak daha kolay tayin edilebilen genel katsayılar kullanılabilir. Genel katsayılar özel katsayılardan Δx Δy üçgenlerinin oluşumu gerektirmediği için daha kolay bir kullanıma sahiptir. Göreceli hız faktörü Φ nün birim değerinde olduğu yada ölçülmüş genel katsayı ile integre olduğu varsayılmaktadır.

Genel katsayılar ısı transferinde kullanılanlar ile benzer olmalarına rağmen fazlar arası sürükleyici kuvvetteki değişimden dolayı bunlar ya sıvı ya da gaz fazı açısından tanımlanabilir. Her katsayı bir hesaplanmış genel sürükleyici kuvvete dayanır. Böylece, Şekil-11 den ac dikey hattını denge eğrisi üzerinde a noktasından d noktasına devam ettirerek y^* niceliği bulunur. Bu konsantrasyon sıvısı x i tanımlayan gazın denge bileşimidir. Gerçek bir kulede dengenin herhangi bir noktada başarılmasından dolayı, y^* büyüklüğü matematiksel bir kurgu olmaktan başka kule için fiziksel bir önem arz etmemektedir.

Genel sürükleyici kuvvetin ad kısmı hattı ya da $y - y^*$ ile ölçülebildiği şekilde tanımlanmaktadır.

Benzer şekilde, eğer eşitliğin sıvı tarafı kullanılacaksa denge eğrisini e de kesen yatay çizgi ae eğer sıvının bileşiminin gaz kısmı y ile denge olsaydı sıvının sahip olacağı bileşim x^* i tanımlar. Böylece genel sürükleyici kuvvet ae kısım hattı ya da $x - x^*$ ile temsil edilir.

Genel gaz direnci katsayısı K_y şu eşitlikle tanımlanmaktadır.

$$K_y \equiv \frac{dN_A/dA}{y - y^*} \quad (22)$$

ve genel sıvı direnci K_x şöyle tanımlanmaktadır

$$K_x \equiv \frac{dN_A/dA}{x^* - x} \quad (23)$$

Eşitlik (22) ve (9) karşılaştırıldıklarında $\phi = 1$ varsayıldığı durum için

$$\frac{1}{K_y} = \frac{y_i - y^*}{k_y (y - y_i)} = \frac{(y - y_i) + (y_i - y^*)}{k_y (y - y_i)} = \frac{1}{k_y} + \frac{y_i - y^*}{k_y (y - y_i)}$$

Eşitlik (18) kullanılarak $y - y_i$ nin sadeleştirilmesiyle,

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{y_i - y^*}{k_x (x_i - x)}$$

Şekil-11 i referans olarak kullanarak $(y_i - y^*)/(x_i - x)$ nin doğru şeklindeki denge eğrisinin eğimi olduğu bulunur.

Bu eğim m diye adlandırılmaktadır.

$$\frac{1}{K_y} = \frac{1}{k_y} + \frac{m}{k_x} \quad (24)$$

Ayrıca, a ile bölünmesi birim dolgu hacmine dayanan genel katsayı $K_y a$ yı verir.

$$\frac{1}{K_y a} = \frac{1}{k_y a} + \frac{m}{k_x a} \quad (25)$$

Uygun bir türev alınmasıyla

$$\frac{1}{K_x a} = \frac{1}{k_x a} + \frac{1}{m k_y a} = \frac{m}{m K_y a} \quad (26)$$

burada $K_x a$ birim dolgu hacmine dayanan genel sıvı direnci katsayısıdır. $K_y a$ ve $K_x a$ nın her ikisinin de birimleri $k_y a$ ve $k_x a$ nın birimleri olan $\text{lb mol}/(\text{ft}^3)(\text{saat})(\text{mol kesri})$ ile aynıdır.

Eşitlik (26) da gösterilen $K_y a$ ve $K_x a$ genel katsayıları eğer $k_y a$, $k_x a$ ve m sabit ise sabit olur.

Denge hattı eğrildiği zaman genel katsayılar sabit olmaz ve gerçek kule içindeki konsantrasyon aralığı genel katsayıların temel alındığı deneylerdeki değerlere yeterince yakın olmadıkça dizayn içerisinde güvenilir bir şekilde kullanılamazlar.

Tüm katsayılar değerlendirildiğinde Eşitlik (20) ve (21) şu hali alır,

$$\int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(1 - y)(y - y^*)} \quad (27)$$

$$\int_{x_a}^{x_b} \frac{dx}{(1 - x)(x^* - x)} \quad (28)$$

Uygunluğa göre Eşitlik (27) ya da (28) kullanılabilir. İntegraller, Şekil-12 deki şemadan $y - y^*$ veya $x^* - x$ nin okunmasıyla grafiksel olarak değerlendirilmektedir.

ÖRNEK

Genel gaz ve sıvı katsayıları ile doğrusal bir denge eğrisi kullanarak Örnek 2 yi tekrarlayınız.

Çözüm

Denge eğrisi $y=0.01$ ve $y=0.200$ arasında neredeyse doğrusaldır. Bu noktalar arasındaki eğrinin eğimi,

$$m = \frac{0.200 - 0.010}{0.0092 - 0.005} = 21.8$$

Eşitlik (25) den genel gaz bölümü katsayısı,

$$\frac{1}{K_y a} = \frac{1}{k_y a} + \frac{m}{k_x a} = \frac{1}{12.3} + \frac{21.8}{206} = 0.081 + 0.106 = 0.187$$

$$\frac{1}{K_y a} = 0.081 + 0.106 = 0.187$$

$$K_y a = \frac{1}{0.187} = 5.35 \text{ lb.mol}/(\text{ft}^3 \cdot \text{sa} \cdot \text{mol fraksiyon})$$

$K_y a$ katsayısını kullanmak için aşağıdaki integral değerlendirmeye alınır.

$$\int_{0.005}^{0.200} \frac{dy}{(1-y)(y-y^*)}$$

Genel sürükleyici kuvvet olan $y - y^*$ grafiksel olarak işleyen integrasyon ve y nin karşılık gelen değerleri için Şekil-12 deki işlem ve denge eğrileri arasındaki dikey mesafeden okunur. İntegralin değeri 5.74 olarak bulunur.

Kulenin üzerinde,

$$(G_{My})_a = 6.90/0.995 = 6.93 \text{ lb.mol}/(\text{ft}^2 \cdot \text{sa})$$

Kulenin altında,

$$(G_{My})_b = 6.90/0.805 = 8.63 \text{ lb.mol}/(\text{ft}^2 \cdot \text{sa})$$

Ortalama değer,

$$(6.93 + 8.63)/2 = 7.78 \text{ lb.mol}/(\text{ft}^2.\text{sa})$$

Eşitlik (27) den,

$$Z_T = \frac{5.74 \times 7.78}{5.35} = 8.3 \text{ ft}$$

Genel sıvı bölümü katsayısı Eşitlik (26) ile verilmektedir.

$$\frac{1}{K_x a} = \frac{1}{k_x a} + \frac{1}{m k_y a} = \frac{1}{206} + \frac{1}{21.8 \times 12.3} = \frac{1}{0.00858}$$

$$K_x a = 117 \text{ lb.mol}/(\text{ft}^3.\text{sa.mol fraksiyon})$$

Bu katsayıyı kullanmak için aşağıdaki integral değerlendirilmektedir.

$$\int_0^{0.00462} \frac{dx}{x^* - x}$$

x küçük olduğundan $1 - x$ terimi birim olarak düşünülebilmektedir. Genel sürükleyici kuvvet olan $x^* - x$ grafiksel değerlendirilen integral ile işlem ve denge eğrileri arasındaki yatay uzaklıktan okunur. Sonuç 2.35 in alanıdır.

Yukarıdaki ikinci örnekten,

$$G_{Mx} = 364 \text{ lb mol /ft}^2\text{-saat,}$$

Eşitlik (28) den,

$$Z_T = \frac{2.35 \times 364}{117} = 7.3 \text{ ft}$$

Bu örnekte gaz fazı ve daha geniş sürükleyici kuvveti dayandığı hesaplama genel yöntemle bulunana yakın bir sonuç verir.

HTU Yöntemi

Bölüm 11 de bahsedilen transfer birimi kavramı kütle transferi verilerini yorumlama ve ilişkilendirmede yararlıdır. Bu kavram, dolgulu bölümü transfer birimleri diye adlandırılan temas birimlerinin sayısına bölme düşüncesine dayanır. Tek bir birim için gerekli dolgulama derinliği HTU diye kısaltılan bir transfer birimi uzunluğu diye anılmaktadır. Dalgulu bölümün toplam uzunluğu,

$$Z_T = N_t H \quad (29)$$

burada N_i transfer birimlerinin sayısı ve H ise HTU dur.

Toplam uzunluğu Z_T ft olan bir kolon içindeki transfer birimlerinin sayısı aşağıdaki dört eşitliğin herhangi birisiyle tanımlanmaktadır.

$$N_{ty} = \int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(1-y)(y-y_i)} \quad (30a)$$

$$N_{t0y} = \int_{y_a}^{y_b} \frac{dy}{(1-y)(y-y^*)} \quad (30b)$$

$$N_{tx} = \int_{x_a}^{x_b} \frac{dx}{(1-x)(x_i-x)} \quad (30c)$$

$$N_{t0x} = \int_{x_a}^{x_b} \frac{dx}{(1-x)(x^*-x)} \quad (30d)$$

Bu sayılardan her biri herhangi verilen bir durum için diğerlerinden farklıdır ve onlar arasındaki seçim uygunluğa göredir. Bunlar arasındaki farklılıklar karşılık gelen HTU büyüklükleri ile dengelenmektedir. N_{t0y} ve N_{t0x} nicelikleri genel sürükleyici kuvvetlere dayanırken N_{ty} ve N_{tx} bireysel sürükleyici kuvvetlere dayanır.

Bu eşitlikler bir ısı değiştiricideki transfer birimlerinin sayısı için Denklem (38)'i temsil eder.

N_{ty} nin Denklem (30a) dan (20) içerisine konulması şu eşitliği verir,

$$N_{ty} = \left(\frac{k_y a}{G_{My}} \right) Z_T \quad (31a)$$

Bu eşitliğin Eşitlik (29) ile karşılaştırılması gösterir ki

$$H_y = \left(\frac{G_{My}}{k_y a} \right) Z_T \quad (31b)$$

Aynı şekilde, Eşitlik (21), (27) ve (28) i sırasıyla Eşitlik (30c), (30b) ve (30d) ile kullanmak şunları verir

$$H_x = \left(\frac{G_{Mx}}{k_x a} \right) Z_T \quad (31b)$$

$$H_{0y} = \left(\frac{G_{My}}{k_y a} \right) Z_T \quad (31c)$$

$$H_{0x} = \left(\frac{G_{Mx}}{K_x a} \right) Z_T \quad (31d)$$

H_{0y} ve H_{0x} nicelikleri toplam HTU lar iken H_y ve H_x özel HTU lardır. Her birisi kendisine denk gelen N_t ile kullanılmak zorundadır.

Genel katsayılarla dayanan Eşitlik (31c) ve (31d) ısı transferindeki Denklem (11-42) ve (11-43) e benzerdir. Sayfa 318 de değinildiği gibi bir transfer birimi bir akım bileşimindeki değişimin bölüm içindeki ortalama sürükleyici kuvvete sayı olarak eşit olduğu bölüm olarak görülebilir. Kütle transferinde dört farklı sürükleyici kuvvetin herhangi birisi N_t ve H nin dört farklı sayısal değer verilerek seçilebilir. Dolguların toplam derinliği hangi seçim yapıldığına bakılmaksızın aynıdır ki böylece Denklem (29) dan N_t ve H ürünlerinin daima sabit olduğu bulunur.

Genel HTU lar özel HTU lar ile aşağıdaki gibi bir ilişkiye sahiptir. Denklem (25) den Denklem (31a), (31b) ve (31c) nin yardımıyla $K_{y,a}$, $k_{y,a}$ ve $k_{x,a}$ nın sadeleştirilmesi şu eşitliği verir.

$$\frac{H_{0y}}{G_{My}} = \frac{H_y}{G_{My}} + \frac{m H_x}{G_{Mx}}$$

$$H_{0y} = H_y + \frac{m G_{My}}{G_{Mx}} H_x \quad (32)$$

Burada $G_{Mx}/k_{x,a}$ ve $G_{My}/k_{y,a}$ nın sabit olduğu varsayılmaktadır. Benzer şekilde, $K_{x,a}$, $k_{y,a}$ ve $k_{x,a}$ nın Denklem (26) dan kaldırılmasıyla şu eşitlik bulunur.

$$H_{0x} = H_x + \frac{G_{Mx}}{m G_{My}} H_y = \frac{G_{Mx}}{m G_{My}} H_{0y} \quad (33)$$

m , G_{Mx} , G_{My} , k_y ve k_x kule boyunca sabit olduğu zaman genel HTU lar olan H_{0y} ve H_{0x} da sabittir. İşlem ve denge eğrilerinin doğru olması bu faktörlerin sabit olmasını gerektirir ve bu eğriler ne kadar doğruya yakınsa HTU lar içindeki değişim de o kadar azdır. Denge eğrisi bir doğru şeklinde ve işlem eğrisinin eğrilmesi ihmal dileyebilir düzeyde olduğu zaman HTU yönteminin en yararlı olduğu durumdur. Eşitlikler bu eğrilerin orta şiddette eğiminin düzeltilmesinden türetilmektedir.

HTU Yönteminin Avantajları: HTU kütle transfer katsayısı ile çok yakından ilişkilidir ve bu iki nicelik önemli ölçüde denktir. HTU, boyutlarının basit uzunlukta ve feet olarak ölçülmesinden dolayı daha rahat olarak görselleştirilebilir. Bu niceliğin büyüklüğünün değişim düzeni 0.5 den 5 ft e dir. Kütle transferi katsayısının birim-

leri daha komplekstir ve sayısal büyüklükler geniş sınırlarda değişim gösterir. Ayrıca, dolgulu kulelerde k_{ya} nın G_{My} ile k_{xa} nın G_{Mx} ile artmasından dolayı G_{My}/k_{ya} ve G_{Mx}/k_{xa} oranları ile H_y ve H_x sıvı ve gazın akış hızlarından neredeyse bağımsızdır. Dalgulu kulelerle ilgili en gelişmiş deneysel veriler katsayılarından ziyade HTU lar içinde verilmektedir.

ÖRNEK

Genel gaz ve sıvı HTU larını kullanarak Örnek 2 yi tekrar çözünüz.

Çözüm

Genel gaz direnci HTU su N_{tOy} şu eşitlikle tanımlanmaktadır.

$$N_{tOy} = \int_{0.005}^{0.200} \frac{dy}{(1-y)(y-y^*)}$$

Önceki örnekten yukarıdaki integral alınarak N_{tOy} 5.74 birim olarak bulunur. Denklem (31c) den,

$$H_{Oy} = \frac{G_{My}}{K_y a}$$

Örnek 4 den $G_{My} = 7.78$; $K_y a = 5.35$ ve

$$H_{Oy} = \frac{7.78}{535} = 1.45 \text{ ft}$$

Toplam dolgu uzunluğu,

$$Z_T = 1.45 \times 5.74 = 8.3 \text{ ft}$$

Toplam Sıvı Direnci için HTU

Dördüncü örnekten,

$$N_{tOy} = 2.35 \text{ birim} \quad G_{Mx} = 364 \quad K_{xa} = 113$$

Denklem (31d) den,

$$H_{Oy} = \frac{364}{113} = 3.11 \text{ ft}$$

$$Z_T = 3.11 \times 2.35 = 7.3 \text{ ft}$$

Açıkça bu sonuçlar her iki örnekte de aynı sayılar kullanıldığı için Örnek 4 teki sonuçlarla uyum sağlamalıdır. Hem gaz hem de sıvı için HTU sırasıyla karşılaştı-

rılabilen büyüklükler olan 1.45 ve 3.11 ft iken denge katsayıları $K_y a$ ve $K_x a$ sırasıyla farklı büyüklükler olan 5.35 ve 117 dir.

Gaz Direnci veya Sıvı Direncinin Kontrolü

Dengedeki gaz fazının konsantrasyonu sıvı fazından oldukça büyük ise kısmen çözünebilir gazın denge eğrisinin eğimi olan m büyüktür. Denklem (33) den açıkça görülmektedir ki G_{My}/G_{Mx} oranı büyük olmadıkça $G_{My}/m G_{Mx}$ üçüktür ve H_{0x} neredeyse H_x e eşittir. Gaz filminin etkisi ihmal edilebilir ve sıvı direnci kontrol olarak adlandırılabilir. Sadece bir termal direncin diğerleriyle karşılaştırıldığında önemli olduğu ve genel katsayın özel katsayıya neredeyse eşit olduğu zaman bu durum ısı transferine benzerdir.

Çözünen gazlar için denge durumunda düşük gaz konsantrasyonu yüksek sıvı konsantrasyonunu dengelediğinden m eğimi küçüktür. G_{My}/G_{Mx} oranı gibi diğer faktörlerin değişimi m in küçük değerlerini dengelemedikçe Denklem (32) içerisindeki $mG_{My}H_x / G_{Mx}$ terimi küçüktür ve H_{0y} neredeyse H_y e eşittir. Sıvı içindeki şartlar ve gazın direnci kontrolleri önemli değildir.

Düşük ya da yüksek büyüklükteki m in gaz-sıvı oranı büyüklüğüyle dengelendiği durumlardaki işlem şartları için verilen bir durum içerisinde gaz ve sıvının direnç kontrolleri dikkatli yapılmalıdır. Örneğin, düşük çözünürlükteki bir gaz absorplandığı zaman çözünen gazın ortamdan uzaklaştırıldığından emin olmak için uygun yükseklikte bir gaz hızı kullanılır. G_{Mx}/G_{My} büyüktür bundan dolayı G_{Mx}/G_{My} oranı Denklem (33) de gösterildiği gibi hem gaz hem de sıvı direncinin büyük olduğu m in büyük değerlerine rağmen önemli olabilir. Çoğu endüstriyel işlem için her iki dirençte önemlidir fakat deneysel çalışma şartlarının amacına uygun olarak sabitlendiği durumlarda dirençlerden biri ihmal edilerek diğer direncin daha kolay çalışılması sağlanabilir.

Yağsız Gazlar

y kule boyunca küçük olduğu zaman gaz zayıf diye adlandırılır. Bu gibi gazların absorplanmasında çeşitli sadeleştirmeler görülür. İlk önce, $1-y$ ve Φ neredeyse birleşir veya böyle kabul edilir. Örneğin, Denklem (27) u hale gelir

$$\int_b^a \frac{dy}{y - y^*} = \left(\frac{K_y a}{G_{My}} \right) Z_T \quad (34)$$

İkinci olarak, özel nicelikler olan k_{ya} , k_{xa} , H_y ve H_x ekipman boyunca sabittir. Üçüncüsü, sıvı faz genellikle seyreltiktir, 1- x ve 1-y gibi işlem eğrisi eşitliği nicelikleri birleşir ve $L=L'$ ve $V=V'$ olur. Bundan dolayı L ve V sabittir ve Denklem (5) te gösterildiği gibi işlem eğrisi L/V eğimi olan bir doğru halini almıştır. Bu eğri (x_a, y_a) ve (x_b, y_b) gibi iki noktanın düz bir doğruyla birleştirilmesiyle kolayca çizilebilir.

Lineer denge ve işlem eğrisi; logaritmik ortalama sürükleyici kuvvet İşlem ve denge eğrisinin ikisi de doğru halini aldığında Denklem (34) uygun şekilde integre edilebilir. y ve y^* in her ikisi de x ile lineer olduğundan aralarındaki farkta lineer olur. Bölüm 11 logaritmik ortalama sıcaklık farkını bulmak için kullanılan yöntem yardımıyla şu şekilde bulunur.

$$G_{My} (y_b - y_a) = K_y a (\mathbf{y} - \mathbf{y}^*)_L Z_T = \frac{N_A}{S} \quad (35)$$

$$(\mathbf{y} - \mathbf{y}^*)_L = \frac{(y_b - y_b^*) - (y_a - y_a^*)}{2.303 \log \frac{y_b - y_b^*}{y_a - y_a^*}} = \Delta \mathbf{y}_L \quad (36)$$

Genel konsantrasyon farkının logaritmik ortalaması ısı transferindeki genel ısı farkının logaritmik ortalamasının kullanımıyla aynı şekilde kullanılmaktadır.

Sıvı fazı için, denge eşitliği,

$$G_{Mx} (x_b - x_a) = K_x a (\mathbf{x}^* - \mathbf{x})_L Z_T = \frac{N_A}{S} \quad (37)$$

$$(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})_L = \frac{(x_b^* - x_b) - (x_a^* - x_a)}{2.303 \log \frac{x_b^* - x_b}{x_a^* - x_a}} = \Delta \mathbf{x}_L \quad (38)$$

Genel HTU lara göre Denklem (35) ve (37) şu biçimde yazılabilir.

$$N_{t0y} = \frac{y_b - y_a}{(\mathbf{y} - \mathbf{y}^*)_L} = \frac{y_b - y_a}{\Delta \mathbf{y}_L} \quad (39)$$

$$N_{t0x} = \frac{x_b - x_a}{(\mathbf{x}^* - \mathbf{x})_L} = \frac{x_b - x_a}{\Delta \mathbf{x}_L} \quad (40)$$

ÖRNEK

İşlem ve denge çizgilerinin doğrusal olduğunu varsayarak Örnek 2 yi tekrar çözünüz.

Çözüm

Dördüncü örnekten,

$$K_y a = 5,35 \text{ lb mol} / (\text{ft}^3)(\text{saat})(\Delta y) \quad G_{My} = 7.78 \text{ lb mol/ft}^2\text{-saat.}$$

Ayrıca, Şekil-12 den,

$$y_a = 0.005 \quad y_b = 0.200 \quad y_a^* = 0 \quad y_b^* = 0.0955$$

Denklem (36) den,

$$\Delta y_L = \frac{(0.200 - 0.005) - (0.005 - 0)}{2.303 \log \frac{0.200 - 0.0955}{0.005 - 0}} = 0.0327$$

$$\frac{N_A}{S} = 7.78 (0.200 - 0.005) = 1.52 \text{ lb.mol/ft}^2\text{.sa}$$

Denklem (35) den,

$$Z_T = \frac{N_A/S}{K_y a \Delta y_L} = \frac{1.52}{5.35 \times 0.0327} = 8.7 \text{ ft}$$

3. Dolgulu Kulelerde Katsayılar ve HTU lar

Dolgulu bir kule kurulması kolay olmasına rağmen bu ekipman içerisinde hareket karışıktır. Bu süreç katı yataklar boyunca gazın akışından, aynı katılar üzerinde sıvının akışı ve dağılımı, iki sıvı akımının karşılıklı etkileşimi ve çözünen bileşenin bir akımdan diğerine geçişinden oluşmaktadır. Sıvı içerisindeki kimyasal reaksiyonlar bir çok durumda önemli olabilir. Sürecin ayrıntıları hakkında yeterince bilgi yoktur. Diğerinin direncini ölçmek ve bundan dolayı genel HTU dan özele yönelmek oldukça güçtür. Ara yüzey dengesinin varsayımı sorgulanabilir ve ikili direnç teorisi açıkça doğru değildir. Sızma (yarma) modeli daha gerçekçidir fakat birkaç katsayı bu model için ölçülmüştür. Bu şartlar altında kule katsayılar üzerine yapılan araştırmalar boyutsal analiz tarafından yönlendirilmesine rağmen yüksekçe uygulanabilirliğe sahip olmalıdır.

Özel HTU hem k katsayısına hem de birim hacimdeki alan olan a ya bağlıdır. Tek fazın k sınırı kontrol eden değişkenler her iki fazın kütleli hızları, viskozite, yoğunluk, fazın yayılma gücü ve dolgunun şekli ve büyüklüğüdür. Yayılma gücü hariç diğer değişkenler a niceliğini etkiler. a sıvı fazlar arasındaki ara yüzey gerilimi, sıvı içindeki yüzey aktif etkileyicilerin varlığında ve dolgunun ıslatma karakteristikleri ile değişmektedir. a'nın büyüklüğü alana ya da dolgu birimlerinin şekliyle herhangi bir şekilde bağlantılı değildir.

Yüzey faktörlerinin etkisi ihmal edilerek bir fazın HTU su şöyle yazılabilir.

$$H = \psi' (G_y, G_x, \mu, D_m, D_p, b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (4)$$

G_y = gazın kütleli hızı

G_x = sıvının kütleli hızı

μ = fazın viskozitesi

D_m = fazın molal yayılma gücü

D_p = dolgunun büyüklüğü

b_1, b_2, \dots, b_n = dolgunun geometrisini tanımlamak için gerekli uzunluklar ve kule içindeki dolgunun yerleşimini gösterir.

Genel yöntemle kurulan boyutsal analiz bir gaz fazı HTU su için şu sonuçları verir.

$$\frac{H_y}{D_p} = \psi_y \left(\frac{D_p G_y}{\mu_y}, \frac{G_x}{G_y}, \frac{\mu_y}{D_{my} M_y}, \frac{b_1}{D_p}, \frac{b_2}{D_p}, \dots, \frac{b_n}{D_p} \right) \quad (42)$$

Sıvıya dayanan HTU için benzer eşitlik,

$$\frac{H_x}{D_p} = \psi_x \left(\frac{D_p G_x}{\mu_x}, \frac{G_y}{G_x}, \frac{\mu_x}{D_{mx} M_x}, \frac{b_1}{D_p}, \frac{b_2}{D_p}, \dots, \frac{b_n}{D_p} \right) \quad (43)$$

Reynolds ve Schmidt sayıları devreye girer. Gaz ve sıvının molekül ağırlıkları sırasıyla M_y ve M_x dir.

Katsayılar ve HTU larla ilgili deneysel işlemler dikkatlice yapılmış olmasına karşın Denklem (42) ve (43) ü kullanmak için yeterince veri yoktur ve mevcut ilişkilerde sadece bazı değişkenleri açıklamaktadır. Örneğin, farklı şekillerdeki dolgular için karakteristik partikül büyüklüğü D_p seçilmemiştir ve b_1/D_p gibi geometrik şekil faktörlerinin etkileri bilinmemektedir. HTU verileri ile ilgili daha önemli ilişkilerden bazıları aşağıdaki paragraflarda verilmektedir.

Sıvı Direnci için HTU: İki çeşit sıvı direnci ile karşılaşılmaktadır. Sıvı ile kimyasal olarak reaksiyon girmeyen çözünmeyen gazlar için kütle transferi fiziksel bir süreçtir. Etkili bir ilişkinin söz konusu olduğu gazlar için aşağıdaki boyutsal eşitlikler yazılabilir. (α ve n sabittir; Tablo3)

$$H_x = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{G_x}{\mu_x} \right)^n \left(\frac{\mu_x}{D_{mx} M_x} \right)^{0.5} \quad (44)$$

Su içindeki bazı sık rastlanan çözünen gazların absorpsiyonunda su ve çözünen arasında sıvı HTU yu düzenleyen iyonlaşma ve hidroliz reaksiyonları meydana gelir. Klor, kükürt dioksit ve muhtemelen amonyak bu etkiyi gösterir ve Denklem (44) uygulanmaz. Örneğin, 77°F da su içindeki kükürt dioksitin absorpsiyonu için aşağıdaki eşitlik uygundur.

**Tablo: Çeşitli Dolgu Maddeleri için,
77 °F da α ve n Değerleri**

Dolgu tipi	Dolgu boyutu, inç	α	n
Halkalar	2	80	0.22
	1.5	90	0.22
	1	100	0.22
	0.5	280	0.35
	0.375	550	0.46
Sele (semer)	1.5	160	0.28
	1	170	0.28
	0.5	150	0.28
Seramik	3	110	0.28

Değerler fps birimleri içindir.

$$k_x a = 0.152 G_x^{0.82} \quad (45)$$

burada G_x birim saatte birim alandan pound olarak geçen sıvının kütleli hızıdır.

Schmidt sayısının sıcaklık üzerindeki etkisinden dolayı sıvı dirençli HTU sıcaklıkla değişir. Sıvılar için bu sıcaklığın etkisi şu eşitlikle tahmin edilebilir.

$$H_x = H_{x0} e^{-0.013(T - T_0)} \quad (46)$$

Burada,

$H_{x0} = T_0$ °F daki HTU değeri

$H_x = T$ °F daki HTU değeri

Gaz Direnci, HTU

H_y için verilerin ilişkisi tam olarak kurulamamıştır. Deneysel verilerin ilişkisi için eşitliğin aşağıdaki şekli önerilmektedir

$$H_y = \beta \frac{G_y^q}{G_x^r} \quad (47)$$

burada β , q ve r deneysel sabitlerdir. Aynı tip dolgularla muamele edilen farklı sistemler için H_y in Schmidt sayısının karesiyle değiştiği varsayılabilir. Denklem (47) açıkça boyutsaldır ve eşitlik içindeki sabitler birimlerin seçimine bağlıdır. Gaz fazı direnci sıcaklığa duyarlı değildir çünkü gazların Schmidt sayısı sıcaklıkla büyük değişimler göstermez.

Denklem (47) nin özel bir duruma uygulandığı bir örnek olarak, aşağıdaki eşitlik 1 inçlik halkalara sahip dolgularda suyun içinden kükürt dioksitin absorpsiyonu için bulunmuştur.

$$H_y = 1.23 \frac{G_y^{0.3}}{G_x^{0.25}} \quad (48)$$

burada G_y ve G_x sırasıyla birim saatte birim alandan pound olarak geçen gaz ve sıvının kütle hızlarıdır.

Toplam Katsayılar ve HTU lar

Genel özellikler olan K_y , K_x , H_{0y} ve H_{0x} için veriler standart referanslarda ve el kitaplarında verilmektedir. Eğer tayin edildikleriyle kullanıldıkları şartlar benzerlik gösterirse bu veriler yararlıdır. Bu durum özellikle genel ve özel faktörlerin ilişkilerinde m nin öneminden dolayı denge çizgisinin güçlü bir eğrilme gösterdiğinde geçerlidir.

Tepsi Kolonlarında Absorpsiyon

Bir tepsili kolondaki ideal kademelerin sayısının hesaplanması Bölüm 18 deki yöntemlerle yapılmaktadır. Eğer işlem çizgisi ya da denge çizgisi bükülmüş ise McCabe-Thiele yöntemi kullanılabilir. Eğer her iki çizgide doğrusal ise McCabe-Thiele ya da absorpsiyon faktörü (Denklem (18-31)) yöntemlerinden birisi uygulanabilir. İdeal bölümlerin sayısının miktarının tabaka etkinliğine bölünmesi gerçek

tabaka sayısını verir. Tabaka etkinliğinden Bölüm 19 da bahsedilmiştir. m değerleri kullanılarak ölçülen, absorpsiyon işlemlerinin etkinlikleri sıvının daha büyük olan viskozitesi ve çözünürlüğün güçlü etkisinden dolayı genellikle distilasyondakinden daha düşüktür.

ÖRNEK

Tabaka etkinliğinin % 20 olarak varsayıldığı bir durumda Örnek 2 de belirtilen kükürt dioksitin absorpsiyonunu gerçekleştirmek için kaç tane gerçek tabaka gereklidir?

Çözüm Şekil-14 de gösterildiği gibi McCabe-Thiele yapılandırmasına göre 3.8 ideal bölüme ihtiyaç vardır. Bölümlerin gerçek sayısı $3.8/0.20 = 19$ dur. İşlem ya da denge çizgilerinden hiçbirisinin doğrusal olmamasına rağmen ideal bölümlerin sayısı yaklaşık olarak Denklem (18-31) den de bulunabilir.

$$y_a = 0.005 \quad y_b = 0.200$$

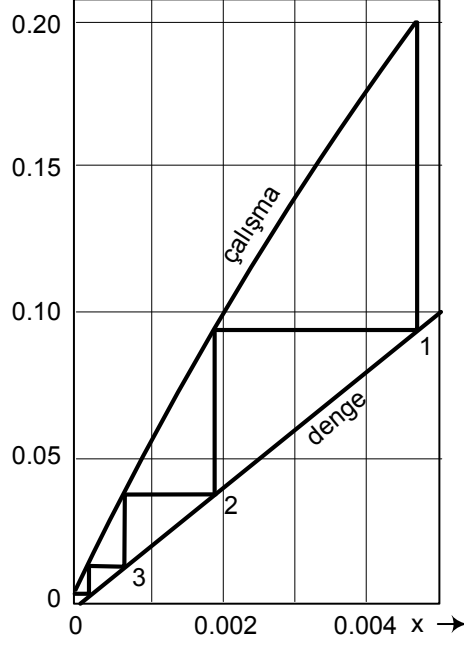
$$y_a^* = 0 \quad y_b^* = 0.0955$$

Bu sayıların Denklem (18-31) de yerine konulmasıyla ideal bölümlerin sayısı bulunur,

$$N_p = \frac{\log [(0.200 - 0.0955) / 0.005]}{\log [(0.200 - 0.0955) / 0.0955]}$$

$$N_p = 4.26$$

Tabakaların gerçek sayısı $4.26/0.20$, ya da 21 + dır. İşlem ve denge eğrilerinin doğrusal olduğu varsayımı tabakalarda 2+ lik ya da %10 luk pozitif hata ortaya çıkarır.



Şekil-14: Örnek için McCabe-Thiele diyagramı

Desorpsiyon

Sıyırma diye de anılan bu işlem absorpsiyonun tersidir ve aynı yöntemlerle değerlendirilir. Absorpsiyonla desorpsiyon arasındaki farklar sadece (1) sürükleyici potansiyeller olan Δx ve Δy nin tersine işlemesi yani sırasıyla $x-x_i$ ve y_i-y olarak verilmesi ve (2) distilasyonda olduğu gibi işlem çizgisinin denge çizgisinin altında yer almasıdır.

Semboller

A	fazlar arasındaki ara yüzeyin alanı, ft^2
A_L	Şekil-6 daki faktör
a	birim dolgu hacmindeki ara yüzeyin alanı, ft^2/ft^3 ; a_v , birim dolgu hacmindeki kuru dolguların alanı
b_1, b_2, \dots, b_n	dolgu yatağı için tanımlanan uzunluk, ft
D_m	Molal yayılma gücü, lb mol/ft-saat; D_{mz} , sıvı içindeki; D_{mv} , gaz içindeki
D_p	Dolgulamanın biriminin lineer boyutu, ft
G	Kütlesel hız, toplam kule taralı alanına dayanır, lb/ft ² -saat; G_x , sıvı akımının; G_y , gaz akımının
G_M	Toplam kule taralı alanına dayanan molal kütlesel hız, lb mol/ft ² -saat; G_{Mx} , sıvı akımının; G_{My} , gaz akımının; G'_{Mx} , G'_{My} , çözünen içermeyen akımlar için
g_c	Newton kanununun çevirme faktörü, $4.17 \times 10^8 \text{ ft-lb/lb}_f\text{-saat}^2$
H	transfer biriminin yüksekliği, ft; H_{0x} , sıvı faza dayanan genel; H_{0y} , gaz fazına dayanan genel; H_x , sıvı fazına dayanan özel; H_{x0} , T_0 sıcaklığındaki; H_y , gaz fazına dayanan özel
h	Özel ısı transferi katsayısı, $\text{Btu}/(\text{ft}^2)(\text{saat})(^\circ\text{F})$; h_1 , birinci faz için; h_2 , ikinci faz için
K	Genel kütle transferi katsayısı, lb mol/(ft ²)(saat)(birim mol kesri); K_x , sıvı fazına dayanan; K_y , gaz fazına dayanan
k	Özel kütle transferi katsayısı, lb mol/(ft ²)(saat)(birim mol kesri); k_x , sıvı fazına dayanan; k_y , gaz fazına dayanan
L	Sıvının molal akış hızı, lb mol/saat; L_a , sıvı girişindeki; L_b , sıvı çıkışındaki; L' , çözünen içermeyen sıvının molal akış hızı
$(L'/V')_{\min}$	En az sıvı-gaz oranı, çözünen içermeyen akımlara dayanan
M	Molekül ağırlığı; \bar{M}_s , sıvının ortalama molekül ağırlığı; \bar{M}_v , gazın ortalama molekül ağırlığı

m	Denge eğrisinin eğimi, dy_e/dx_e
N_A	fazlar arasındaki ara yüzeyden geçen A bileşeninin kütle transfer hızı, lb mol/saat
N_p	ideal bölümlerin sayısı
N_t	transfer birimlerinin sayısı; N_{t0x} , sıvı fazına dayanan genel; N_{t0y} , gaz fazına dayanan özel; N_{tx} , sıvı fazına özel; N_{ty} , gaz fazına özel
n	Denklem (44) teki destekleyici
p	toplam basınç, atm; $\overline{\Delta x_L}$, kısmi basınç
q	ısı transfer hızı, Btu/saat; ayrıca Denklem (47) deki destekleyici
r	Denklem (47) deki destekleyici
S	kulenin taralı alanı, ft ²
t	sıcaklık, °F; T_c , soğuk fazın ortalama yığın sıcaklığı; T_h , sıcak fazın; T_i , ara yüzey sıcaklığı
V	gazın molal akış hızı, lb mol/saat; V_a , çıkıştaki; V_b , girişteki; V' , çözünen içermeyen gazın molal akış hızı
V_{sy}	boş kuledeki yüzey gaz hızı, ft/saniye
x	sıvı içindeki A bileşeninin (çözünen) mol kesri; x_a , sıvı girişindeki; x_b , sıvı çıkışındaki; x_e , denge durumundaki; x_i , gaz-sıvı ara yüzeyindeki; x^*_a , gaz fazı konsantrasyonu olan y_a yı dengeleyen denge konsantrasyonu; x^*_b , gaz fazı konsantrasyonu olan y_b yı dengeleyen denge konsantrasyonu
y	gaz içindeki A bileşeninin (çözünen) mol kesri; y_a , gaz girişindeki; y_b , gaz çıkışındaki; y_e , denge durumundaki; y_i , gaz-sıvı ara yüzeyindeki; y^*_a , gaz fazı konsantrasyonu olan x_a yı dengeleyen denge konsantrasyonu; y^*_b , gaz fazı konsantrasyonu olan x_b yı dengeleyen denge konsantrasyonu
Z	dolgulama üzerinden aşağıya doğru dikey uzaklık, ft; Z_T , dolgulu bölümün toplam derinliği

Yunan harfleri

α	Denklem (44) deki sabit
β	Denklem (47) deki sabit
Δx	sıvı direnci üzerindeki konsantrasyon farkı, $x_i - x$, A bileşeninin mol kesri; $\overline{\Delta x_L}$, sıvı direnci üzerindeki genel logaritmik ortalama konsantrasyon farkı, Denklem (38) ile tanımlanan
Δy	gaz direnci üzerindeki konsantrasyon farkı, $y - y_i$, A bileşeninin mol kesri; $\overline{\Delta y_L}$, sıvı direnci üzerindeki genel logaritmik ortalama konsantrasyon farkı, Denklem (36) ile tanımlanan
ϵ	Porozite, veya boşluk kesri, dolgulu bölüm içinde
μ	viskozite, lb/ft-saat; μ_x , sıvının; μ_y , gazın; μ'_x , sıvının, santipoise
ρ	Yoğunluk, lb/ft ³ ; ρ_x , sıvının; ρ_y , gazın
Φ	Denklem (20-48) tarafından tanımlanan göreceli hız faktörü
ψ	Fonksiyon; ψ_x , Denklem (43) teki; ψ_y , Denklem (42) teki; ψ' , Denklem (41) teki