

## KOAGÜLASYON VE FLOKULASYON

Yumaklaştırma işlemi küçük partiküllerin yumaklar haline getirilerek çökertilmesidir. Bu işlem pıhtılaştırma ve yumaklaştırma olarak iki basamakta gerçekleşmektedir.

Yüzey suları çözünmüş madde, kolloid ve askıda katı madde(süspansiyon) gruplarını içerirler. Çapları  $0,001 \mu\text{m}$ 'den küçük olan;  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{O}_2$  gibi maddeler, çözünmüş maddelere örnek verilebilir. Kolloidlerin çapları  $0,001$ - $1 \mu\text{m}$  arasındadır. Kil,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , virüsler sayılabilir. Askıda katı maddelerin çapların  $1 \mu\text{m}$ 'den büyüktür. Bakteriler, kil, kum,  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , bitki ve hayvan artıkları askıda katı maddeler arasında sayılabilir.

Çökeltme havuzları ancak askıda katı maddelerin çökertilmesinde kullanılabilir. Kolloidlerin çökeltme havuzlarında çökeltmeleri mümkün değildir. Bu tür maddeleri sudan ayırmak için tanelerin birbirleriyle birleşerek çökeltme hızlarının artması sağlanmalıdır. Yumaklaştırmanın amacı kolloidal ve askıda taneciklerin yumak haline getirilmesidir. Bu yumaklar, sonraki çökeltme ve filtrasyon işlemleriyle sudan ayrılabilirler. İçme suyu arıtımında suya renk ve bulanıklık veren maddelerin gideriminde yumaklaştırma kullanılmaktadır.

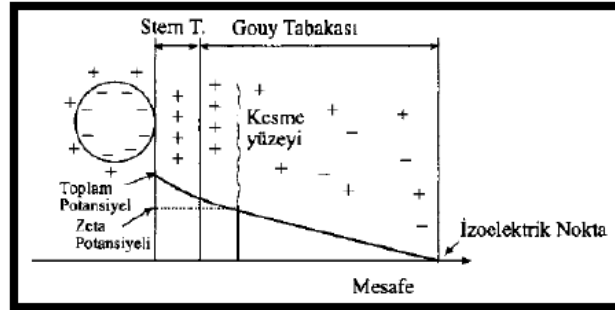
## Yumaklaştırmanın Mekanizması

Su ortamında kil gibi suda çözünmeyen taneciklere suyu sevmeyen anlamında hidrofobik; nişasta, proteinler, organik polimerler gibi suda çözünen taneciklere de suyu seven anlamında hidrofilik denir.

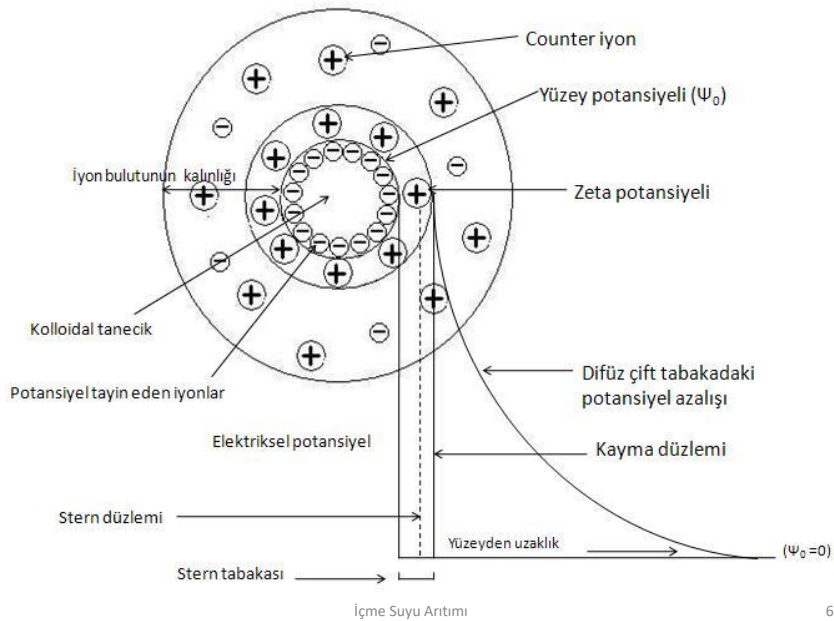
Kolloidler bulundukları sıvı ortam içinde daima bir elektrik yüküne sahiptirler. Metal oksitler ( $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$  veya  $Fe^{3+}$  gibi) pozitif elektrik yüküne, metal olmayan oksitler, kil, proteinler ise negatif elektrik yüküne sahiptirler. İçme suyu arıtımında karşılaşılan kolloidler çoğunlukla negatif yüklüdür. Yük çok fazlaysa etrafına çok miktarda zıt işaretli iyon çeker. Böylece tane zıt işaretli iyonlarla kaplanmış olur. Bu ilk ve yoğun zıt iyonlar tabakasına sabit tabaka veya stern tabakası adı verilmektedir. Stern tabakasının dışında yine aynı işaretli iyonlardan oluşan Gouy Chapman Tabakası veya Dağınık Tabaka bulunur. Bu iki tabakaya “Çift Tabaka” adı verilir.

Çift tabakada kolloidin yüküne zıt iyonlar bulunmakla birlikte, aynı işaretli iyonlar da bulunur. Ancak iyon sayısı tane yüzeyinden uzaklaştıkça azalır. Belli bir mesafede + ve – yüklü iyonların sayıları eşit olup bu noktaya izoelektrik nokta denilmektedir. Bu noktada potansiyel sıfırdır. Buradan tane yüzeyine gidildikçe anyon ve katyon arasındaki konsantrasyon farkı arttığından elektrostatik potansiyel de artar.

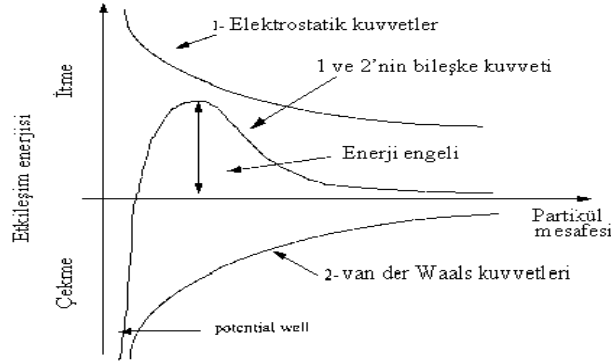
Şekilde görülen kesme yüzeyindeki potansiyele zeta potansiyeli denir. Kesme yüzeyi içindeki sıvı tabakası sanki taneciğe yapışmış gibi onunla birlikte hareket eder. Ancak kesme yüzeyinin dışındaki kısım tane ile birlikte hareket etmez. Hidrofobik kolloidlerde kesme yüzeyi, sabit tabakanın dış yüzüne çok yakındır.



**Negatif yüklü bir kolloidin etrafındaki tabakalar**



İki kolloid bir arada düşünülürse, her iki kolloid aynı elektrik yükü ile yüklü olduğundan birbirlerini itmek isterler. Çekme kuvvetleri ise Van der Waal kuvvetleri ile Brownian hareketlerden doğan kinetik enerjiden dolayı ortaya çıkar.



**Kolloide Etki Eden Kuvvetler**

İçme Suyu Arıtımı

7

Kolloidlerin stabilizasyonu aşağıda belirtilen şekillerde olmaktadır:

- Çözeltiye ilave edilen zıt yüklü iyonlar, tanecik etrafındaki çift tabakanın sıkışmasına sebep olur ve itme etkisi azalır.
- Çözeltiye ilave edilen metal iyonları veya organik polimerlerin tanecik yüzeyinde adsorpsiyonu ile tanecik yüzeyindeki potansiyel azalmaktadır.
- Yumaklaştırıcı maddelerin çözeltiye ilavesiyle oluşan metal hidroksitler çökerlerken kolloidleri de bir ağ şeklinde sararak onların da çökmesini temin ederler.
- Organik polimerlerin kullanılması halinde uzun zincirli bu polimerler, kolloidlerin etrafını sararak bir köprü meydana getirir. Böylece kolloidlerin destabilizasyonu sağlanır.

Destabilize bir çözeltide kolloidlerin Brownian hareketleri sebebiyle yumaklaşma olur, bu tip yumaklaşmaya perikinetik yumaklaşma adı verilir. Bu hareket yavaş olduğundan işlemi hızlandırmak için çözeltiye ilave kimyasal maddeler karıştırılır. Bu yumaklaştırmaya ortokinetik yumaklaşma denir.

İçme Suyu Arıtımı

8

## Perikinetik Yumaklaşma

Brownian hareketten doğan bu yumaklaşmada zamanla tanecik sayısındaki azalmanın, tanecik sayısının karesi ile orantılı olduğu ifade edilmiştir.

$$-\frac{dn}{dt} = k_p \times n^2$$

Burada;

n: Birim hacimdeki tanecik sayısı

t: Zaman

$k_p$ : Perikinetik hız sabiti

Hız sabiti ise,

$$k_p = \alpha_p \times \frac{4}{3} \times \frac{\bar{k} \cdot T}{\mu}$$

şeklinde ifade edilir.

Burada;

$\alpha_p$ : Birleşme ile neticelenen çarpışmaların yüzdesi

$\bar{k}$ : Boltzman sabiti

T: Mutlak sıcaklık, °K

$\mu$ : Suyun dinamik viskozitesidir.

Bu iki denklem birleştirilirse;

$$-\frac{dn}{dt} = \alpha_p \times \frac{4}{3} \times \frac{\bar{k} \cdot T}{\mu} \times n^2$$

elde edilir. Bu denklem aynı özellikte ve aynı cins kolloidler için geçerlidir. Başlangıçtaki tanecik sayısı  $n_0$ , t süre sonraki tanecik sayısı  $n$  olmak üzere en son yazılan denklem integre edilirse,

$$t = \frac{n_0 - n}{n \cdot n_0 \cdot k_p}$$

Denklemleri ile başlangıçtaki tanecik sayısı  $n_0$ 'ın  $n$  değerine düşmesi için gerekli süre hesaplanabilir.

## Ortokinetik Yumaklaşma

Ortokinetik yumaklaşmada tanecik sayısındaki azalma hızı, hız gradyanı, tanecik çapı ve tanecik sayısına bağlı olarak değişmektedir.

$$-\frac{dn}{dt} = \frac{2}{3} \times \alpha_0 \times G \times d^3 \times n^2$$

Burada;

$\alpha_0$ : Birleşme ile sonuçlanan çarpışmaların yüzdesi

G: Hız gradyanı (ortalama değer)

d: Tanecik çapı

n: Tanecik sayısı

Tanecikler küre şeklinde kabul edilir ve birim hacimdeki taneciklerin bütününe hacmi V ile gösterilirse;

$$V = \frac{\pi \cdot d^3}{6} \cdot n$$

$$-\frac{dn}{dt} = \frac{4 \times \alpha_0}{\pi} \times G \times V \times n$$

Bu denklem integre edilirse

$$\ln \left( \frac{n_0}{n} \right) = \frac{4 \times \alpha_0 \times G \times V \times n}{\pi} \quad [ R = n_0/n ]$$

$$\ln R = \frac{4 \times \alpha_0 \times G \times V \times n}{\pi}$$

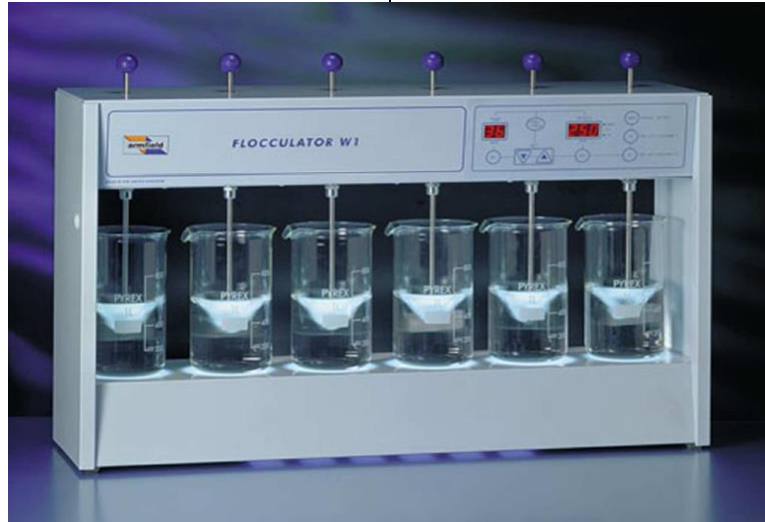
$$t = \frac{\pi \times \ln R}{4 \times \alpha_0 \times G \times V}$$

## Yumaklaştırıcılar

Yumaklaştırıcı kimyasal maddelerin ilave edilmesiyle tane etrafındaki çift tabakanın sıkıştırılması, yüzeydeki potansiyelin azaltılması ve metal hidroksitlerle beraber kolloidlerin de çökmesi sağlanır.

Yumaklaştırıcılar  $Al^{3+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$  ve  $Ca^{2+}$  şeklinde sıralanabilir. Ancak  $Fe^{2+}$  doğrudan kullanılırsa yumaklaştırma için uygun olmaz çünkü  $Fe(OH)_2$  çok iyi çözünür. Yumaklaştırma için çözünmeyen hidroksitler gereklidir.  $Fe^{2+}$  çelik sanayii yan ürünü olduğundan  $Fe^{3+}$ 'e göre ucuzdur ve tasfiye edilecek suda mevcut oksijen ile oksidasyon, aktif karbon katalizörlüğünde oksijen ile oksidasyon veya klor ile oksidasyon uygulanarak kullanılır. Bu sayede  $Fe^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$  'e dönüştürülerek yumaklaştırmada kullanılır.

Yumaklaştırıcı seçiminde mutlaka kavanoz testleri (jar test) deneyleri yapılarak yumaklaştırıcının türü ve dozu belirlenebilir.



İçme Suyu Arıtımı

15

### Yumaklaştırıcılar ve kimyasal formülleri

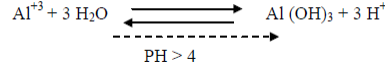
Kimyevi madde	Formülü	Molekül Ağırlığı	Rengi	En yaygın şekli	Sudaki eriyebilirliği (1)	Sudaki eriyiğin durumu
Alüminyum sülfat	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	666	Beyaz	Toz ve topak	36,3	Asit
Sodyum Alüminat	$NaAlO_2$	82	Beyaz	Toz	-	Alkali
Ferrik Klorat {Demir (3)Klorür}	$FeCl_3 \cdot 6H_2O$	270	Kahverengi	Topak	91,9	Asit
Ferrik Sülfat {Demir (3)Sülfat}	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$	562	Sarımsı Kahverengi	Küçük kristaller	-	Asit
Ferrous Sülfat {Demir (2) Sülfat}	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	278	Yeşilimsi	"	26,6	Asit
Demir Sülfat Alüminyum Sülfat	$Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	-	-	-	-	Asit
Kireç (sönmemiş)	$CaO$	56	Beyaz	Topak toz	-	Alkali
Kireç (Sönmüş)	$Ca(OH)_2$	74	Beyaz	Toz	0.128	Alkali

İçme Suyu Arıtımı

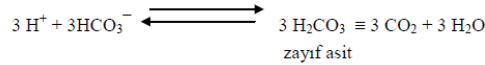
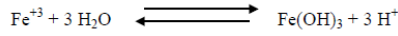
16



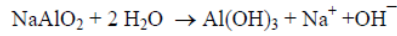
Suya  $Al^{+3}$  ve  $Fe^{+3}$  gibi yumaklaştırıcılar ilave edilirse suyun pH değeri düşer. (sodyum alüminat hariç). Yani bu yumaklaştırıcılar (koagülantlar) asidik özelliktedir. Kimyasal denklemler basit olarak :



şeklinde olup bu reaksiyonun yönünün sağ tarafa olması için  $pH > 4$  olmalıdır.  $Fe^{+3}$  için denklem :



Sodyum alüminat ( $NaAlO_2$ ) kullanılırsa



yazılabilir. Görüldüğü gibi bu reaksiyon baziktir.

## Yumaklaştırıcı Yardımcıları

Kil, kalsit, polielektrolitler, aktif silika, alkali ve asitler yumaklaştırıcı yardımcıları olarak kullanılmaktadır. Bunun amacı yumaklaştırmayı hızlandırmak, daha büyük ve kolay çökebilan yumaklar elde etmek,  $Al^{3+}$  ve  $Fe^{3+}$  gibi yumaklaştırıcıların konsantrasyonlarının azaltmak gibi sebeplerdir.

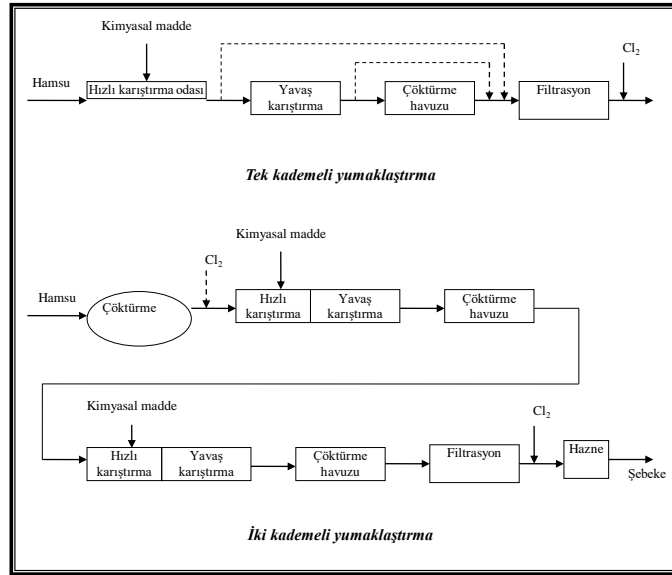
Kil, yumaklara çekirdek oluşturması yönüyle faydalıdır. Suya kötü koku ve tat veren maddeleri absorbe eden killer vardır. Ayrıca yumakların ağırlığını artırarak çabuk çökelmelerini sağlar. Kalsit toz halindeki kalsiyum karbonat olup kil olmayan yerlerde bulanık değeri düşük sularda kullanılır.

Polielektrolitler anyonik, katyonik ve iyonik olmayan polielektrolitler olmak üzere üçe ayrılır. Alum gibi yumaklaştırıcılarla hızlı çökebilen yoğun yumaklar meydana getirirler. Doğal ve sentetik polielektrolitler mevcuttur. Sentetik polielektrolitlerin insan sağlığına zararlı olup olmadığı dikkate alınmalıdır.

Aktif silika en çok kullanılan yumaklaştırıcı yardımcılardan biridir. Alum ile beraber kullanıldığında, kısa zincirli, iyi çökebilen yumaklar oluşmasını sağlar. Suyun pH değerinin ayarlanması gerektiğinde çeşitli alkali ve asitler de yumaklaştırıcı yardımcısı olarak kullanılabilir. Alkaliler sönmüş kireç ( $\text{Ca(OH)}_2$ ), sönmemiş kireç ( $\text{CaO}$ ), sodyum hidroksit ( $\text{NaOH}$ ) veya soda; asit olarak ise sülfürik asit ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) kullanılır.

### **Yumaklaştırmanın Verimliliğine Etki Eden Faktörler**

- a) Ham suyun kalitesi, bulanıklılığı
- b) Sudaki kolloidlerin ve asılı maddelerin miktar ve özellikleri
- c) Suyun pH değeri
- d) Yumaklaştırma prosesinin çeşidi, hızlı karıştırma ve yumaklaştırmada bekleme süreleri
- e) Suyun sıcaklığı
- f) Suyun alkalitesi
- g) Sudaki iyonların miktar ve özellikleri



Yumaklaştırmanın su arıtımındaki yeri

İçme Suyu Arıtımı

21

## Hızlı Karıştırma Odalarının Hesabı

Hızlı karıştırma odaları yumaklaştırıcı maddelerin su ile homojen olarak karıştırılması amacıyla kullanılır. Karıştırma işlemi çoğunlukla bir düşey mille elektrik motoruna bağlı olan pedallı veya türbin şeklindeki karıştırıcılarla yapılır. Hızlı karıştırma odalarının tasarımında hız gradyanı ve bekleme süresi önemlidir.

$$G = \sqrt{\frac{N}{\mu \cdot V}}$$

$$t = \frac{V}{Q}$$

G: Hız gradyanı, saniye-1

N: Güç, watt veya N m/s

 $\mu$ : Dinamik viskozite, N s/m<sup>2</sup>V: Hacim, m<sup>3</sup>

t : Bekleme süresi, saniye

V: Hacim, m<sup>3</sup>Q: Debi, m<sup>3</sup>/s

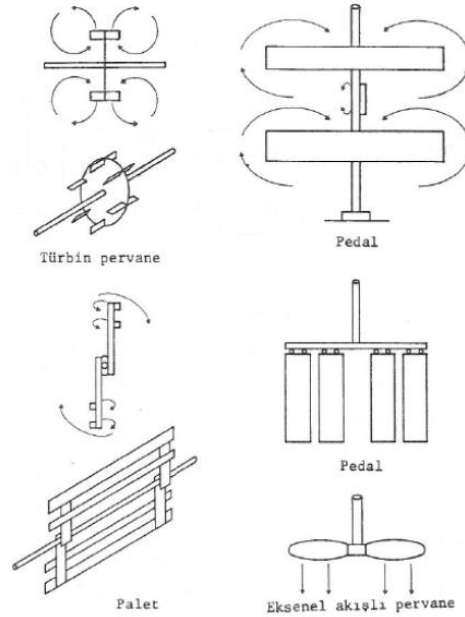
İçme Suyu Arıtımı

22

### Hızlı Karıştırma İçin Bekletme Süresi ve Hız Gradyanı

Bekleme müddeti, sn	20	30	40	> 40
Hız Gradyanı, $G, \text{sn}^{-1}$	1000	900	790	700

Mekanik karıştırma yapılan karıştırma odaları tek veya iki bölmeli yapılabilir. İki bölmeli olması daha faydalıdır. Genel olarak mekanik karıştırıcılar için bekleme süresi  $t=30-60$  saniye, hız gradyanı  $G=300-1000 \text{ s}^{-1}$  arasında alınır. Mekanik karıştırıcıların verimleri yüksektir, debideki dalgalanmalardan etkilenmesler ve yük kayıpları düşüktür.



Karıştırma düşey veya yatay perdeli karıştırma odalarında da yapılabilir. Dalgıç perdeli karıştırıcının giriş ve çıkış noktaları arasındaki yük kaybı  $\Delta h$  ise;

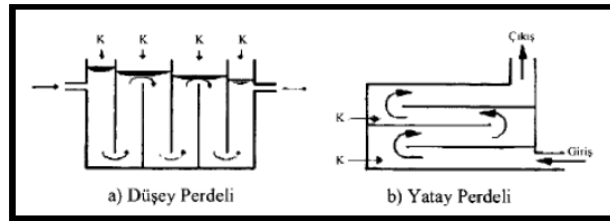
$$N = p \cdot g \cdot Q \cdot \Delta h$$

N: Güç, watt veya N m/s

p: Suyun özgül ağırlığı,  $\text{kg/m}^3$

g: Yerçekimi ivmesi,  $\text{m/s}^2$

Q: Debi,  $\text{m}^3/\text{s}$



**Yatay ve düşey perdeli karıştırma**

İçme Suyu Arıtımı

25

Hız gradyanı ile güç arasındaki bağıntı:

$$G = \sqrt{\frac{N}{\mu \times V}}$$

Burada:  $\mu$  : Dinamik viskozite,  $\text{N.sn/m}^2$  veya  $\text{Pa.sn}$

$V$  : Hacim,  $\text{m}^3$

Yukarıdaki iki ifadeden;

$$G = \sqrt{\frac{\rho \times g \times Q \times \Delta h}{\mu \times V}}$$

$$t = \frac{V}{Q} \text{ olduğundan} \Rightarrow G = \sqrt{\frac{\rho \times g \times \Delta h}{\mu \times t}}$$

olarak elde edilir.

İçme Suyu Arıtımı

26

Dalgıç perdeli karıştırıcının giriş ve çıkışı arasındaki yük kaybı  $\Delta h$  ile gösterilirse güç:

$$N = \rho \times g \times Q \times \Delta h$$

ifadesinden bulunabilir.

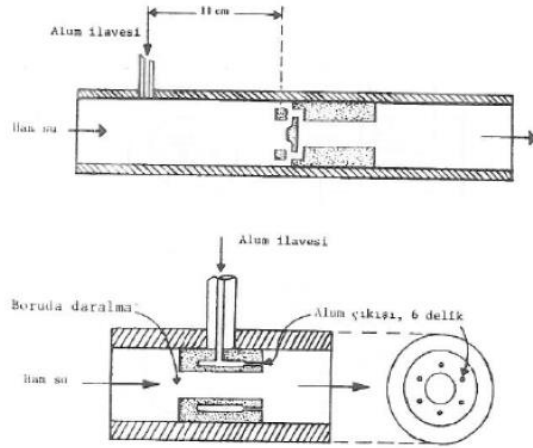
Burada:

- $\rho$  : Suyun özgül ağırlığı,  $kg/m^3$
- $Q$  : Debi,  $m^3/sn$
- $G$  : Yerçekimi ivmesi,  $9.81 m/sn^2$
- $\Delta h$  : Yük kaybı,  $m$
- $N$  : Güç, *watt* veya  $N.m/sn=Joule/sn$

Hidrolik karıştırma ise hidrolik sıçramayı kullanarak yapılan hızlı karıştırma değildir. Mekanik ekipmanlara ve karıştırma odasına ihtiyaç yoktur. Yumaklaştırıcı hidrolik sıçrama noktasında hemen önce verilir. Yaklaşık tipik bekleme süresi 2 saniye ve hız gradyanı  $800 s^{-1}$  değerlerindedir. Yük kaybı 0,3 m alınmaktadır.

Boru hattı üzerinde (In-line blender) yapılan karıştırmada yüksek hız gradyanı değerlerinde ( $3000-5000 s^{-1}$ ) ve 30 saniyeden az bekletme süreleri ile güçlü karıştırma ekipmanları vasıtasıyla karıştırma yapılır.

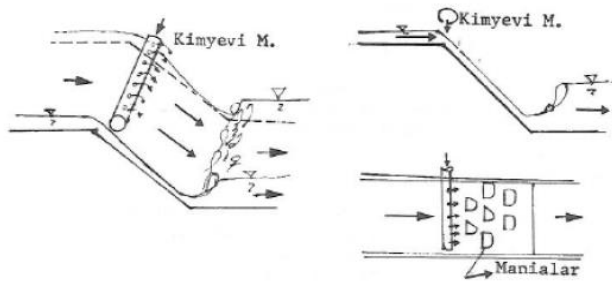
Karıştırma odalarının hacimlerinin bulunması, bekleme süresinin seçilmesi ile hesaplanabilir. Bu süre hız gradyanına, yumaklaştırıcı çeşidine ve karıştırma şekline göre değişir. Hızlı karıştırma tasarımında; su kalitesi analiz sonuçları, debilerdeki değişimler ve jar testi sonuçları dikkate alınmalıdır.



Karışımın Boruda Yapılması

İçme Suyu Arıtımı

29



Karıştırmanın Hidrolik Sıçrama İle Yapılması

İçme Suyu Arıtımı

30

## Yumaklaştırma Havuzlarının Hesabı

Hızlı karıştırma odalarından sonra yumakların oluşması için yavaş karıştırma işleminin uygulanması gerekir. Bu işlem stabilize olmuş kolloidlerin birleştirilmesi veya çap ve büyüklüklerinin artırılmasıdır. Bu işlem için kullanılan mekanik ekipmanlar düşey milli pedallı karıştırıcılar, yatay milli pedallı karıştırıcılar veya kanatlı karıştırıcılardır. Dalgıç perdeli ve basınçlı hava ile yumaklaştırma da yapılabilmektedir. Dalgıç perdeli yumaklaştırma havuzları eskiden yaygın olarak kullanılmalarına rağmen, mekanik yumaklaştırmada olan gelişme sebebiyle fazla kullanılmamaktadır. Bu tip havuzlarda kısa devrelerin olmaması gibi faydalar vardır.

Yumaklaştırma havuzlarının tasarımında hız gradyanı ve bekleme süresi önemlidir. Bekleme süresi genellikle 15-45 dakika arasında seçilir. Bulanıklık gideriminde bu iki değerin arasındaki değer olarak 30 dk alınabilir. Sertlik gideriminde ise süre 60 dk'ya kadar çıkabilmektedir. Hız gradyanı 10'dan 100 s<sup>-1</sup> kadar seçilebilir. Hız gradyanıyla bekleme süresinin çarpımının  $G.t = 104 - 105$  arasında kalması istenir. Bazı çalışmalarda ise  $G.t$  değerinin  $2 \times 10^4$  ile  $2 \times 10^5$  arasında kalmasının uygun olacağı belirtilmiştir.

İçme Suyu Arıtımı

31

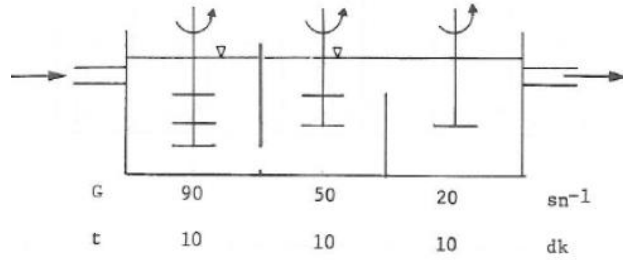
Hız gradyanı yumaklaştırmayı hızlandırırken yumakları parçalaması da olası bir durumdur. Bu iki durumdan faydalanmak için hız gradyanının kademeli olarak azaltılması düşünülmüştür. Başlangıçta henüz yumaklar oluşmadığından hız gradyanı yüksek tutulabilir. Daha sonra yumakların kırılmaması, kesilmemesi ve parçalanmaması için hız gradyanı azaltılır. Bunun için yumaklaştırma havuzu bölmeli olarak yapılır. Her bölmedeki hız gradyanı değişik alınır. Bölme sayısı 2 ile 6 arasında değişmektedir.

Normal olarak seri bağlı reaktörlerde eşit bekleme zamanları uygulanmaktadır. Ancak yapılan çalışmalar yumaklaştırmada , seri bağlı reaktörlerin bekletme sürelerinin giderek artırılmasının, yumaklaştırmının verimini artırdığını göstermektedir. Yani ilk yumaklaştırma havuzundaki bekletme süresi sonuncusundan daha az olmalıdır.

İçme Suyu Arıtımı

32





Üç Adet Seri Bağlı Yumaklaştırma Havuzu

Yukardaki örnek için G.t değeri hesaplanırsa:

$$G.t = (90+50+20) \times 10 \times 60 = 9,6 \times 10^4$$

$$104 < G.T < 105$$

olduğundan uygundur.

### Pedal Alanının Hesabı

Yumaklaştırıcıların su hareketine dik yöndeki pedalların toplam alanı A, ile gösterilirse, pedalların döndürülmesi için gerekli kuvvet;

$$F = C_D \times \rho \times A \times \frac{V_r^2}{2}$$

ifadesinden hesaplanabilir. Burada;

$C_D$  : Katsayı

$\rho$  : Sıvının yoğunluğu, kg/m<sup>3</sup>

A : Pedalların yüzey alanı, m<sup>2</sup>

$V_r$  : Pedalların suya nazaran izafi (göreceli) hızları'dır.

$C_D$  katsayısı pedalın eni ve boyuna bağlıdır. Pedal eni  $W$ , boyu  $L$  ile gösterilirse  $L / W$  oranından  $C_D$  değerleri aşağıdaki tablodan belirlenebilir.

$L/W$	5	20	$\infty$
$C_D$	1.2	1.5	1.9

İzafi pedal hızları mutlak hızın 0.75'i kadar kabul edilebilir.  
 $V_r = 0.5 - 0.7$  m/sn arasında alınabilir.

Toplam pedal alanı havuz en kesitinin % 20'sinden daha küçük olmalıdır.

Gerekli güç ihtiyacı ise;

$$N = F \times V_r$$

$$N = C_D \times A \times \rho \times \frac{V_r^3}{2}$$

$$G = \sqrt{\frac{N}{\mu \times V}} \text{ olduğundan ,}$$

$$G = \sqrt{\frac{C_D \times A \times \rho \times V_r^3}{2 \times \mu \times V}} \text{ elde edilir.}$$

Bu ifadeden pedal alanı

$$A = \frac{2 \times \mu \times V}{C_D \times \rho \times V_r^3} \times G^2 \text{ şeklinde hesaplanabilir.}$$



İçme Suyu Arıtımı

37



İçme Suyu Arıtımı

38