



دانشکده فنی و مهندسی

گروه بیو تکنولوژی

همزن ها در صنایع تخمیری

توسط:

احسان حسنانی

زیر نظر:

آقای دکتر ابراهیم واشقانی

زمستان ۸۵

مقدمه - عمل هم زدن می تواند اهداف مختلفی داشته باشد، از جمله ایجاد تلاطم (کمک به انتقال

حرارت) و یا ایجاد سطح تماس نزدیک بین دو فاز (انتقال جرم) و ...

همزن ها تقریباً در همه صنایع فرایندی کاربرد دارند. از جمله صنعت نفت و پتروشیمی ، تصفیه آب و

فاضلاب، صنایع پلیمری، راکتورهای شیمیایی و ... در این مقاله در صدد هستیم همزن های مورد

استفاده در صنایع تخمیر را مطرح و مورد بررسی قرار دهیم.

به طور کلی همزن ها را می توان به دو رده عمده تقسیم بندی نمود:

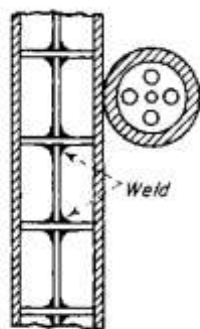
۱- هم زن های جریانایی (خطی)

این نوع از هم زن ها داخل لوله ها قرار داده می شوند. از یک سری نازل و اریفیس تشکیل شده که دو

فاز مخلوط شونده از داخل آنها پمپ می شوند و اتلاف انرژی حاصل از افت فشار، باعث پخش شدن

ذرات مایع در یکدیگر می شود. در این هم زن ها میزان آمیختگی با شدت جریان متناسب است.

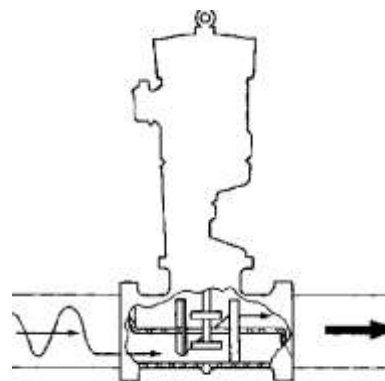
در شکل ۱ نمونه ای از یک همزن اریفیس و یک همزن نازلی نشان داده شده است.



همزن اریفیس



همزن نازلی



نمونه ای از یک همزن خطی

شکل ۱ نمایش همزن های جریانایی (مرجع ۱)

۲- مخازن همزن دار (Agitated vessels)

در این نوع همزن ها موادی که باید در داخل یکدیگر پخش شوند در داخل یک ظرف ریخته شده و عمل هم زدن توسط یک همزن مکانیکی (Agitator) انجام می گیرد.

این همزن مکانیکی می تواند مجهز به پره (Impeller) و یا انواع دیگری از تیغه ها باشد. همانند انواع ورزدهنده (Kneader)، مخلوط کننده های با تعویض پیمانه (Change-can mixer)، همزن های خارج کننده (Mixer-Extruders) و انواع دیگری از همزن ها مانند همزنهای رنگ ساب (Muller)، بن بوری (Banbury)، غلطکی (Roller)، نواری (Helical) و... که از موضوع بحث خارج است.

مخلوط کننده های با تعویض پیمانه جهت هم زدن مایعات گرانبه و یا خمیرهای سبک (شبیه خمیرهای نانوائی) به کار می رود. (شکل ۲)

در این نوع از همزنها پیمانه کوچکی با حجم ۵ تا ۱۰۰ گالن ماده مخلوط شدنی را در خود جای می دهد. وقتی هم زدن کامل شد سر همزن را بالا آورده، تیغه را تمیز کرده و پیمانه تعویض می شود.

شکل ۲ مخلوط کننده با تعویض پیمانه (مرجع ۱)



در برخی از همزن های از این نوع، تیغه های هم زن بزرگ و در نزدیکی دیواره قرار دارند. تا همه مایع یا خمیر با تیغه تماس یافته و مخلوط شود. به این جور همزن ها، همزن های با تیغه Anchor می گویند. در این همزن ها نسبت قطر پره به قطر تانک می تواند به بیش از ۹۵ درصد برسد. نمونه ای از یک تیغه Anchor در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳ تیغه Anchor

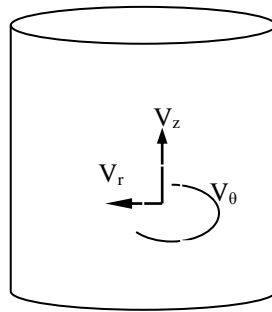
پره های با تیغه Anchor جزء پره های با فاصله نزدیک به جداره (Close clearance Impellers) می باشند که جهت فراوری سیالات شبه پلاستیکی به کار می روند زیرا چنانچه در این سیستم ها از پره های ملخی و یا انواع دیگر پره های با قطر کم ($Da/D_t < 0.3$) استفاده گردد مقداری از سیال به دلیل دوری از پره همزن، ساکن (stagnant) گردیده به دیواره همزن خواهد چسبید.

از پره های با تیغه Anchor خصوصاً جهت اصلاح شدت انتقال حرارت در سیالات با قوام زیاد استفاده می گردد زیرا این پدیده، با افزایش ضخامت فیلم سیال ساکن روی جداره، باعث کاهش شدید « ضریب کلی انتقال حرارت » گردیده و شدت انتقال حرارت را کم خواهد کرد.

همزن های پره دار (Impellers)

از میان انواع مختلف همزن ها (Agitators) که اجمالاً مطرح شد. همزن های پره دار (Impellers) کاربرد بسیار وسیعی در صنایع تخمیر دارند.

تقسیم بندی این همزن ها بر اساس الگوی جریانی است که ایجاد می کنند. هر نقطه از سیال داخل تانک دارای سه مؤلفه سرعت محوری (V_z)، دورانی (V_θ) و شعاعی (V_r) بطوریکه در شکل ۴ نشان داده شده می باشد. مؤلفه دورانی نقشی در هم زدن ندارد و اغلب از اختلاط مناسب جلوگیری می کند.

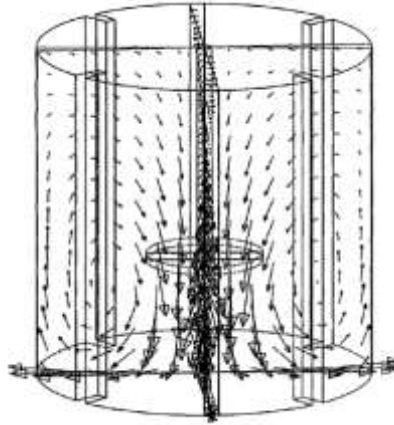


شکل ۴ مؤلفه های سرعت در همزن

همزن ها بسته به آنکه سیال را در جهت مؤلفه شعاعی و یا محوری هدایت کنند به دو نوع جریان شعاعی (radial flow) و جریان محوری (Axial flow) تقسیم بندی می شوند.

۱-۲ همزن های جریان محوری: (Axial-flow mixers)

در این نوع از همزن ها، پره جریانی موازی محور همزن ایجاد کرده و مانند پمپ سیال را از بالامکش کرده و به پایین تانک هدایت می کند. سیال بنا به اصل بقای ماده در نقاط دور از پره همزن، به بالا حرکت می کند و به این ترتیب سیال همانند الگوی نشان داده شده در شکل ۵ در داخل تانک سیرکوله می گردد.



شکل ۶ سیرکوله شدن سیال در تانک (مرجع ۱)

در همزن های از این نوع تیغه های پره (Blades) زاویه کمتر از ۹۰ درجه با صفحه چرخش (Plane of rotation) ایجاد می کنند. از جمله این همزن ها می توان همزن های پره ملخی (Propeller) و همزن های توربینی با پره شیب دار (Pitched blade turbines) را نام برد که شکل آنها در شکل ۷ نشان داده شده اند.

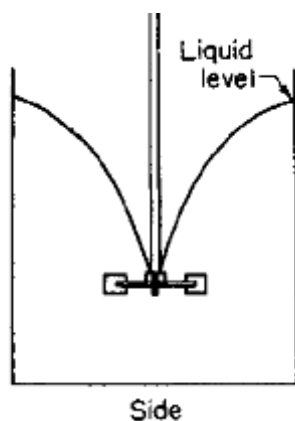


شکل ۷-الف همزن های توربینی با پره شیب دار (Pitched blade turbines)



شکل ۷-ب پره ملخی (propeller)

همانطور که ذکر شد مؤلفه دورانی سرعت از اختلاط مناسب جلوگیری می کند دلیل این امر آن است که وجود این مؤلفه باعث افزایش نیروی سانتیری- فوژی می گردد. عمل این نیرو بر روی سیال در حال چرخش باعث ایجاد گردابه (Vortex) و نتیجتاً کاهش راندمان همزن می گردد. گردابه باعث می شود سطح سیال در نزدیکی جداره بالا رفته و در نزدیکی شافت همزن پایین بیاید. اگر شدت گردابه به حدی برسد که سطح مایع به پره برسد پدیده ماندگی هوا (Air entrainment) در سیال و به علاوه، ایجاد موج نوسانی (Oscillating surge) در داخل تانک و همچنین اعمال نیروی عمل کننده نوسانی (Fluctuating force) به محور همزن خواهد گردید. در شکل ۸ یک نمونه از این نوع گردابه دیده می شود.



شکل ۸ نمایش یک گردابه

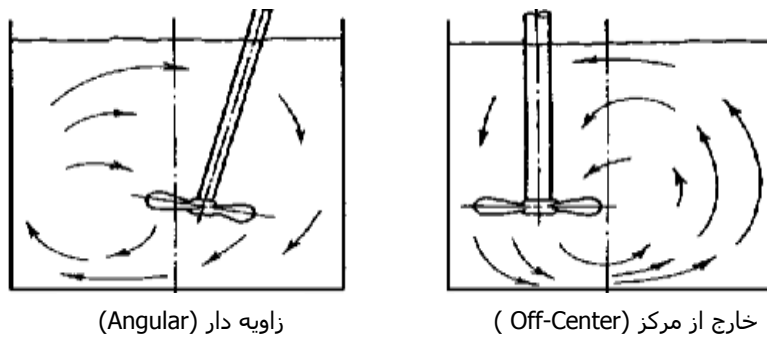
برای جلوگیری از «پدیده ایجاد گردابه» تمهیدات زیر به کار گرفته می شود:

- ۱- وارد کردن هم زن به صورت زاویه دار (Angular) و یا خارج از مرکز استوانه (Off-Center) در تانک های کوچک (حجم کوچکتر از 4m^3) این دو اقدام به علاوه باعث افزایش قدرت گردش سیال از بالا به پایین می شود.

۲- وارد کردن همزن به صورت جانبی (Side-Entering) در تانکهای متوسط

۳- نصب تیغه های عمودی بلند به نام « بافل (Baffle)» بر روی دیواره ظرف همزن در تانک های

بزرگ.

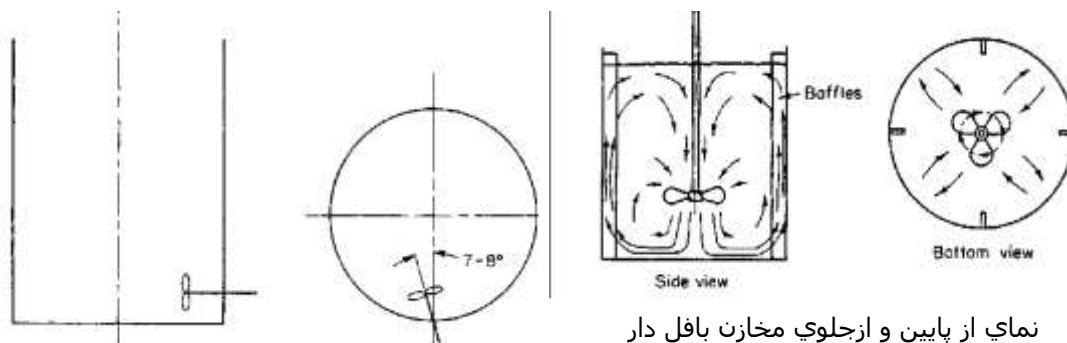


زاویه دار (Angular)

خارج از مرکز (Off-Center)

شکل ۹ جلوگیری از تشکیل گردابه در تانکهای کوچک

نصب تعداد ۴ بافل اغلب کفایت می کند. پهنای معمول بافل ها بین ۵ تا ۱۰ درصد قطر تانک است.



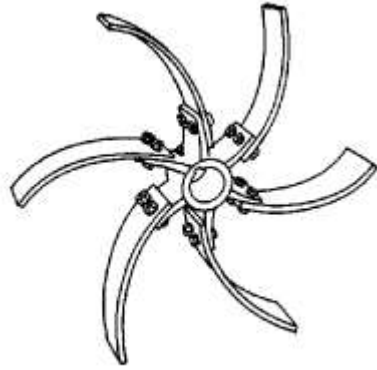
نمای از پایین و از جلوی side entering

نمای از پایین و از جلوی مخازن بافل دار

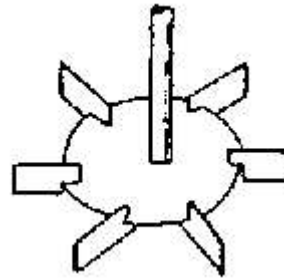
شکل ۱۰ جلویی از تشکیل گردابه در تانکهای متوسط و بزرگ

۲-۲ همزن های با جریان شعاعی (Radial Flow)

این نام به سری همزن هایی اطلاق می گردد که جریانی عمود بر محور همزن (در جهت مؤلفه شعاعی همزن) ایجاد می کنند. این همزن ها پره هایی موازی با محور همزن دارند که می توانند خمیده (Curved-blade) و یا مسطح (Flat-blade) باشند. در شکل ۱۲ نمونه ای از همزن های شعاعی نشان داده شده است.



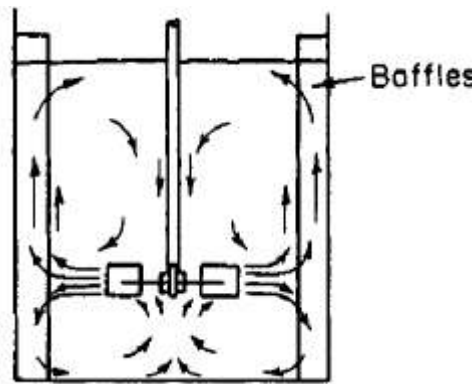
خمیده (Curved-blade)



مسطح (Flat-blade)

شکل ۱۱ دو نمونه همزن شعاعی (مرجع ۱)

در این همزن ها بر خلاف همزن های جریان محوری (که سیال از بالا به پایین پمپ می شود) سیال از بالا و پایین در جهت شعاع پمپ می شود. و گردش (سیرکوله شدن) در دو ناحیه بالا و پایین انجام می شود. (شکل ۱۲)



شکل ۱۲ سیرکوله شدن سیال در تانک با همزن جریان شعاعی

به پره های کوچک (قطر پره بین ۰/۳ تا ۰/۶ قطر تانک) و سرعت بالا که دارای چندین تیغه هستند «توربین (turbine)» و به پره های بزرگ (قطر پره بیش از ۰/۶ قطر تانک) و سرعت پایین که ۲ یا ۴ تیغه دارند «پدال (paddle)» گفته می شود.

انتخاب همزن مناسب

فاکتور های اصلی انتخاب همزن عبارتند از:

- نوع فرایند
- خواص سیال به کاررفته در فرایند
- قیمت تجهیزات
- مواد مورد نیاز جهت ساخت

جهت انتخاب همزن فرمول خاصی وجود ندارد ولی راهنمایی های زیر می تواند مفید باشد:

برای ظرف های کوچک (با قطر کمتر از ۱/۸ متر، حجم تا 4 m^3) انتخاب نخست ، همزن های از بالا وارد شده (top entering) است که می تواند زاویه دار و یا خارج از مرکز باشد.

اندازه پره، شیب و ارتفاع تیغه های آن و سرعت چرخش پره و... می توانند از طریق آزمونهای مدل (model tests) ، تجربه های کسب شده از فرایندهای مشابه و یا در مواردی از روابط تجربی به دست آیند.

برای ظروف بزرگتر (بین ۴ تا ۲۰۰ متر مکعب) همزن های توربینی هم محور با ظرف با ۴ یا تعداد بیشتری بافل باید انتخابی نخست، باشد. در این مورد نسبت ارتفاع تانک به قطر تانک می تواند بین ۰/۷۵ تا ۱/۵ باشد.

هرچه ویسکوزیته سوسپانسیون بیشتر می شود قطر پره باید بزرگتر انتخاب گردد.

برای پخش کردن سریع ذرات جامد در مایعات، پخش کردن گازها در داخل راکتورهای سه فازی (slurry)، و همچنین افزایش ضریب انتقال جرم بین فاز جامد و مایع استفاده از پره های با قطر کوچک ($Da/D_T < 0.3$) توصیه شده است.

۳- رفتار سیالات در همزن ها

عدد رینولدز (پارامتر بدون بعدی که نسبت دو نیروی اینرسی به ویسکوز است) برای همزن ها که معرف حضور یا عدم حضور تلاطم در جریان سیال داخل همزن است به صورت زیر تعریف می شود:

D_a : Impeller diameter, N : Rotational speed , ρ : Density , μ : viscosity

$$N_{Re} = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu} \quad (1)$$

- اگر $N_{Re} > 10000$ باشد در این صورت جریان متلاطم (**turbulent**) است .
- اگر $10 < N_{Re} < 10000$ در این صورت جریان در منطقه گذار (**transient**) قرار دارد. یعنی در نقاط نزدیک پره همزن جریان متلاطم و در نقاط دور از پره همزن جریان آرام است.
- اگر $N_{Re} < 10$ در این صورت جریان در همه نقاط همزن آرام (**laminar**) است .

۳-۱ محاسبه توان همزن

در همزن ها نیز مانند بقیه توربو ماشینها رابطه توان همزن به صورت زیر است:

$$P = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \quad (2)$$

در رابطه فوق Q نرخ تخلیه (**discharge rate**) نام دارد که به صورت زیر تعریف می شود:

« حجمی از سیال که در واحد زمان از سطح تخلیه (discharge area) همزن عبور می کند.»

مقدار Q از رابطه زیر محاسبه می گردد:

$$Q = N_q \cdot N \cdot D_a^3 \quad (۳)$$

در رابطه فوق N_q ثابت تخلیه ، N سرعت چرخش همزن و D_a قطر پره می باشد. N_q بستگی به پارامترهایی مانند «تعداد تیغه در پره» ، «ارتفاع تیغه به قطر پره» ، « قطر پره به قطر تانک» و ... دارد. برای چندین نوع مخزن Q اندازه گیری شده و N_q بر اساس آن محاسبه گردیده است.

$$N_q = 0.4 - 0.5 \text{ (for propellers)}$$

$$N_q = 0.7 - 2.9 \text{ (for turbines)}$$

H در رابطه (۱) **هد سیال (fluid head)** است که عبارت است از: « حداکثر نیرویی که سیال بر اثر تغییر سرعت می تواند اعمال کند. » مقدار H رامی توان از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$H = \frac{N_p \cdot N^2 \cdot D_a^2}{N_q \cdot g} \quad (۴)$$

پارامتر جدید در رابطه فوق N_p **عدد توان** است که به صورت زیر تعریف می گردد:

$$N_p = \frac{P \cdot g_c}{\rho N^3 D_a} \quad (۵)$$

۲-۳ همزن های گرمایشی و سرمایشی

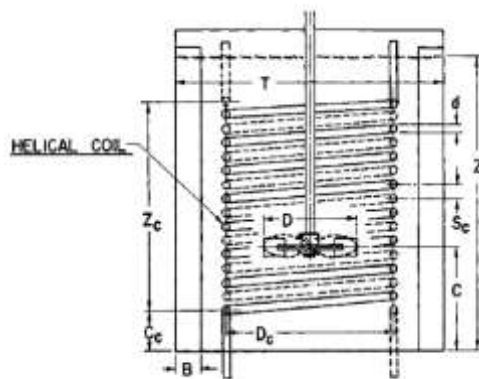
در بسیاری از موارد لازم می شود هم زدن با انتقال حرارت (گرمایش و سرمایش) توأم گردد. جهت گرمایش استفاده از تماس مستقیم با آتش روشی است که بسیار به ندرت به کار می رود زیرا کنترل دمای سطح در این حالت مشکل است و باعث سوختگی سطحی مواد (scorch) در سطح دیواره

ظرف خواهد شد. استفاده از بخار آب بهترین و اقتصادی ترین روش گرمایش است و بیشترین کاربرد را در میان بقیه روشهای حرارت دادن دارد زیرا گرمای نهان بخار آب بسیار بالا است و حرارت به صورت یکنواخت منتقل می گردد.

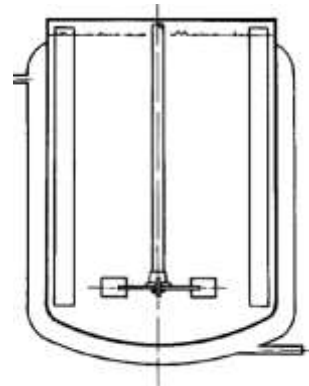
حرارت بخار آب را از دو طریق می توان در همزن ها به کار گرفت :

الف - استفاده از کویل حرارتی بخار (steam coil)

ب- استفاده از ژاکت حرارتی بخار (steam jacket)



کویل حرارتی بخار



ژاکت حرارتی بخار

شکل ۱۳ روش های حرارت دادن به تانک همزن دار از طریق بخار

محدوده ضریب کلی انتقال حرارت در این تجهیزات بین $25-200 \frac{W}{m^2 K}$

جهت سرمایش می توان از جریان آب، جریان هوا از روی سطوح فین دار، تبخیر آب در فشارهای پایین (و یا اتمسفریک) به عنوان روش های اقتصادی جهت حصول دماهای نه چندان پایین، و یا به

کاربردن سیال مبرد (refrigerant)، و یا یخ خشک (dry ice) به عنوان روشهای گران قیمت جهت دسترسی به دماهای بسیار پایین در موارد مورد لزوم استفاده نمود.

روابط انتقال حرارت در مخازن همزن دار

عدد ناسلت (Nu)، عدد رینولدز (NRe) و عدد پراتندل (Pr) گروه های بدون بعدی هستند که در روابط انتقال حرارت کاربرد دارند. در این پارامترها عدد پراتندل تنها به خواص فیزیکی ماده فرایندبستگی دارد ولی عدد رینولدز علاوه بر خواص فیزیکی ماده فرایند، به نوع فرایند و هیدرودینامیک جریان آن نیز بستگی دارد.

برای یک همزن روابط این پارامترها به صورت زیر است:

$$\text{عدد ناسلت: } Nu = h \cdot D_j / k$$

$$\text{عدد پراتندل: } Pr = C_p \cdot \mu_b / k$$

$$\text{عدد رینولدز: } N_{Re} = \frac{D_a^2 \cdot N \cdot \rho}{\mu_b}$$

برای انتقال حرارت از مایع به ژاکت از رابطه زیر می توان استفاده نمود:

$$Nu = a (N_{Re})^b \cdot (Pr)^{0.33} \cdot (\mu_b / \mu_w)^m \quad (۶)$$

مقادیر a , b در رابطه (۷) را میتوان از جدول ۱ پیدا نمود.

Agitator	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>m</i>	Range of Reynolds number
Paddle ^a	0.36	3/4	0.21	300-3 × 10 ⁵
Pitched-blade turbine ^b	0.53	3/4	0.24	80-200
Disk, flat-blade turbine ^c	0.54	3/4	0.14	40-3 × 10 ⁵
Propeller ^d	0.54	3/4	0.14	2 × 10 ³ (one point)
Anchor ^b	1.0	1/2	0.18	10-300
Anchor ^b	0.36	3/4	0.18	300-40,000
Helical ribbon ^e	0.633	1/2	0.18	8-10 ⁵

^aChilton, Drew, and Jebens, *Ind. Eng. Chem.*, **36**, 510 (1944), with constant *m* modified by Uhl.

^bUhl, *Chem. Eng. Progr., Symp. Ser.* **17**, **51**, 93 (1955).

^cBrooks and Su, *Chem. Eng. Progr.*, **55**(10), 54 (1959).

^dBrown et al., *Trans. Inst. Chem. Engrs. (London)*, **25**, 181 (1947).

^eGluz and Pavlushenko, *J. Appl. Chem. U.S.S.R.*, **39**, 2323 (1966).

جدول ۱ مقادیر *a*, *b*, *m* در رابطه (۷)

همچنین برای انتقال حرارت از مایع به داخل کویل روابط زیر پیشنهاد شده است:

$$Nu = 0.87 (N_{Re})^{0.62} (Pr)^{0.33} (\mu_b / \mu_w)^{0.14} \quad (8)$$

$$Nu = 0.17 (N_{Re})^{0.67} (Pr)^{0.37} (L_p/D_s)^{0.1} (D_o/D_j)^{0.5} \quad (9)$$

در رابطه (۹)، D_o قطر خارجی لوله کویل ها و D_j قطر داخلی تانک است.

۴ افزایش مقیاس همزن ها (scale-up)

بدیهی است تنها تشابه هندسی جهت افزایش مقیاس کافی نیست. زیرا مثلاً در مورد همزن ها وقتی اندازه افزایش می یابد نسبت سطح به حجم کاهش می یابد، لذا پارامترهای بسیاری از جمله نرخ تنش تغییر می یابد.

مبنای اولیه در افزایش مقیاس همزن های ناپیوسته (batch)، «توان بر واحد حجم تانک» و در همزن های پیوسته «توان بر واحد دبی خوراک» می باشد.

همچنین باید این نکات را در نظر داشت:

- زمان اختلاط (blend-time) و زمان گردش (circulation-time) در همزن های با تانک

های بزرگ بیشتر از همزن های با تانکهای کوچک است.

- ناحیه ای که در آن نرخ تنش تغییر می کند در تانک های بزرگ، بزرگتر است لذا در تانکهای مقیاس بالا نرخ تنش متغیر تر است.
- عدد رینولدز در تانکهای بزرگ حدود ۵ تا ۲۵ برابر بزرگتر از تانک های کوچک است.
- در سیستم های گاز- مایع، افزایش سرعت خارجی گاز باعث افزایش زمان کلی سیرکوله شدن (overall circulation time) می گردد.

۵- تخمیر پلی ساکاریدها

تولید انبوه پلی ساکاریدهای میکروبی مثالی از صنعت تخمیر با سود سرشار است. یکی از جالبترین ماموریت‌های صنعت تخمیر امروز، طراحی بیوراکتور برای تولید پلی ساکاریدهای با رئولوژی پیچیده با کیفیت بالا و پایدار می باشد. کیفیت در این متن به وزن ملکولی بیوپلیمر اشاره دارد که آن هم به نوبه خود، خواص ویسکوزیته دهندگی را تعیین می کند.

صمغ زانتان (Xanthan)، صمغ گلان (Gellan)، پولونان (Pullulan)، آلژینات (Alginate)، کردلان (Curdlan) و گلوکان (Glucan) مثالهایی از این پلی ساکاریدهای با رئولوژی پیچیده می باشند.

با وجود پیشرفت هایی که تکنیک های انتخاب سویه در گذشته و مهندسی ژنتیک در زمان حاضر برای افزایش بالقوه حداکثر بهره وری و حداکثر غلظت قابل دستیابی محصول داشته اند، دو پارامتری که بهره وری در این فرایندها شدیداً به آن ها وابسته است عبارتند از:

- اختلاط توده

- انتقال جرم اکسیژن

این دو پارامتر خود، توسط عواملی مانند طرح ظرف (Vessel design)، نوع پره (Impeller type)، خواص رئولوژیکی و ترکیب درصد اجزاء سیال کنترل می شوند.

این مسائل نوعی که در ذات تخمیرهای ویسکوز وجود دارند باانتخاب صمغ زانتان به عنوان مدل، در این متن مورد بررسی قرار گرفته و گزارش شده است.

صمغ زانتان یک پلی ساکارید برون سلولی (Extracellular) است که توسط *Zanthomonas* کمپستریس (*Xanthomonas campestris*) تولید و از نظر تجاری مهمترین پلی ساکارید باکتریایی محسوب می شود. این ماده دارای کاربردهای فراوانی به عنوان عامل افزایش دهنده ویسکوزیته و پایدار کننده در صنایع غذایی، دارویی و پتروشیمی است.

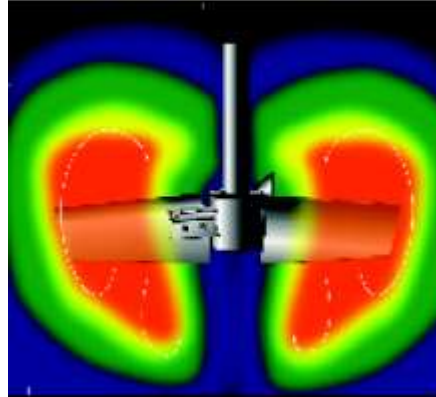
از آنجا که هزینه فرایندهای پایین دستی تعیین می کند که آیا تولید از نظر تجاری، شدنی (Feasible) است یا خیر، غلظت بالای محصول (بالتر از ۲۵ گرم بر لیتر) امری ضروری می باشد.

تا کنون تحقیقات زیادی برای حل دو مشکل اختلاط ضعیف توده و میزان کم انتقال جرم اکسیژن در تخمیر صمغ زانتان اختصاص یافته است.

در اینکه گلوگاه فرایند (Process bottleneck) در تخمیر پر بهره (Highly productive) صمغ زانتان مربوط به این دو پارامتر می شود در نوشتجات (Literatures) اتفاق نظر وجود دارد. اما تفسیر (Interpretation) نتایج تجربی در ارتباط با این مسائل، به علت عدم توانایی (Inability) در جداسازی متغیر انتقال اکسیژن از متغیر عدم یکنواختی ظرف مشکل است.

انباشته شدن صمغ برون سلولی، موجب پیچیدگی های رئولوژیکی می گردد. ایجاد «ناحیه حرکت قابل توجه» (Significant motion zone) که کاو (Cavern) نام دارد و حول محور همزن تشکیل

می شود و «نواحی عمدتاً ثابت» (Essentially stagnant zones) که در جاهای دیگر تشکیل می شوند دو مثال از این پیچیدگی های رئولوژیکی است.



شکل ۱۴ نمایش کاو Cavern (مرجع ۵)

اندازه کاو توسط خواص سیال، توان ورودی و طرح همزن (Agitator design) کنترل می شود و به عنوان یکی از عوامل محدود کننده در فرایند تخمیر در نظر گرفته می شود. بنابراین یکنواختی برات (Broth) برای ابقای سطح بهینه اکسیژن حل شده، دما، پ هاش و همچنین برای ممانعت از ایجاد گرادیان در این پارامترها اهمیت دارد. علاوه بر آن، انتقال اکسیژن در این برات های ویسکوز به طور فزاینده ای مشکل است.

توصیف رئولوژیکی صمغ زانتان

در طی تخمیر، ترشح پلی ساکارید باعث می شود که ویسکوزیته ظاهری برات تا سه برابر افزایش یابد. در ابتدا برات یک سیال نیوتونی و دارای جریان متلاطم است. اما با افزایش تجمع صمغ، این برات به طور فزاینده ای ویسکوز و غیر نیوتنی می شود و عدد رینولدز آن در رژیم گذار قرار می گیرد. ویسکوزیته سیال بالاست اما با افزایش تنش ویسکوزیته کاهش می یابد.

رفتار سیال در این حالت می تواند با مدل قانون توان (Power law model) توصیف شود. بطوریکه اندیس قوام (Consistency Index) یعنی عدد K بین 0 تا $70 \text{ N/m}^2 \cdot \text{S}^n$ و اندیس رفتار سیال (Fluid behavior Index) که آن را با n نشان می دهیم از 1 تا $0,1$ (بدون واحد) تغییر می کند.

$$\text{Power law Model: } T = K\gamma^n$$

$K = 0 - 70 \text{ N/m}^2 \cdot \text{S}^n$ (Consistency Index) (اندیس قوام)

$n = 1 - 0.1$ (Fluid behavior Index) (اندیس رفتار سیال)

اندیس رفتار سیال در غلظتهای بالای 20 g/L معمولا ثابت (کوچکتر از $0,2$) باقی می ماند. به علاوه در غلظتهای بالای 10 g/L تنش تسلیمی به دست می آید که می توان آن را بوسیله تطبیق دادن (Fitting) مدل کاسون (Casson model) با داده های دامنه نرخ تنش بین $0,1$ تا $0,2 \text{ S}^{-1}$ به دست آورد.

تاثیر سرعت همزدن و اکسیژن حل شده بر تخمیر زانتان

۱- اثر سرعت همزدن:

سرعت همزدن بر هر دو پارامتر بزرگی حرکت (Extent of motion) و میزان انتقال اکسیژن (Rate of oxygen transfer) اثر می گذارد. بنابراین با تغییر سرعت همزدن، علاوه بر غلظت اکسیژن محلول، همگونی فضایی (Spatial uniformity) آن نیز دستخوش تغییر می

شود. جداسازی این برهمکنش های پیچیده با روش زیر صورت پذیرفت (امان ... و همکاران، ۱۹۹۸ ج).

ابتدا اثر سرعت های ۵۰۰ و ۱۰۰۰ دور بر دقیقه با استفاده از سه پره توربینی راشتون (Rushton turbine) با $D/T = 0.5$ در یک مقیاس ۶ لیتری با غلظت ثابت و ۲۰ درصدی از اکسیژن محلول ارزیابی شد. در این شرایط کنترل شده، نتایج نشان داد که در صورت یکنواختی برات، عملکرد بیولوژیکی کشت مستقل از سرعت همزدن (یا تنش برشی) می باشد.



شکل ۱۵ Rushton impeller

در غلظتهای کمتر از 20 g/L تفاوتی در کارایی بیولوژیکی کشت با تغییر سرعت همزدن، دیده نشد. اما در غلظتهای بالاتر، اختلاط بالاتر توده (Superior bulk mixing) باعث جذب میکروبی بیشتر اکسیژن در دوره همزن ۱۰۰۰ در مقایسه با دور ۵۰۰ شد. با گسترش پیچیدگی رئولوژیکی نواحی ساکن در غلظتهای بیشتر از 20g/L به علت اختلاط بالاتر توده (Superior bulk mixing) در دوره های ۱۰۰۰ نسبت به دور ۵۰۰، نسبت سلولهای فعال متابولیکی و بنابراین نرخ جذب اکسیژن افزایش یافت. از این بررسی می توان نتیجه گرفت که در یک اندازه کاو (Cavern) مشخص با اکسیژن حل شده یکسان، میزان تولید ویژه زانتان مستقل از سرعت پره، یکسان باقی می ماند. کاهش میزان تولید ویژه زانتان در فاز تولید پدیده ای قابل انتظار است چون تولید زانتان تا اندازه ای وابسته به رشد (Partly growth associated) است. هر چند در بسیاری از موارد که غلظت توده زیستی تقریباً ثابت است در سراسر فاز تولید کاهش پیوسته ای در میزان تولید وجود دارد.

پیتر و همکاران (الف ۱۹۸۹) به این نتیجه رسیدند که محدودیت اکسیژن هرطور شده باید برطرف شود چه با افزایش سرعت همزدن چه با استفاده از اکسیژن هوای غنی شده.

۲- اثر اکسیژن حل شده

میزان جذب ویژه اکسیژن (Specific oxygen uptake rate) کشت در فاز نمایی با آنالیز داده های حاصل از آنالیز گاز در حالت پایا به دست آمد و مشخص شد که در بالاتر از ۶ درصد هوای اشباع مستقل از اکسیژن حل شده است در حالیکه میزان رشد ویژه کشت حتی تا سطوح به پایینی ۳ درصد تحت تاثیر اکسیژن حل شده قرار نگرفت.

تعیین اندازه کاو

همانطور که پیشتر بحث شد در $n \leq \sim 0.3$ کاو تشکیل می شود. برای طراحی و بهره برداری از بیوراکتور تعیین اندازه کاو به صورت تابعی از رئولوژی سیال و شرایط همزدن مهم است. دو روش برای دستیابی به این هدف به کار گرفته شده است.

۱- روش السون و نینو (EN model) که بر مبنای مفهوم تنش تسلیم (حداقل تنش برشی لازم برای وادار کردن سیال به حرکت) استوار است. در این روش از دو معادله هرشل-باکلی (HB) و کاسون (Casson) استفاده شده است که به صورت زیر می باشند:

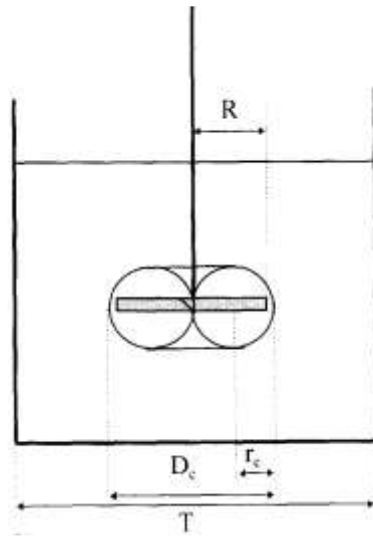
$$\text{Herschel-Bulkley(HB) eq.} \quad \tau_{HB} = (\tau_y)_{HB} + K_{HB} \dot{\gamma}^{n_{HB}}$$

$$\text{Casson eq.} \quad \tau^{0.5} = (\tau_y)^{0.5}_C + K_C \dot{\gamma}^{0.5}$$

در معادلات بالا متغیرها عبارتند از:

T: تنش برشی سیال، T_y : تنش تسلیم سیال، γ : نرخ تنش سیال، K: اندیس قوام، n: اندیس رفتار جریان سیال

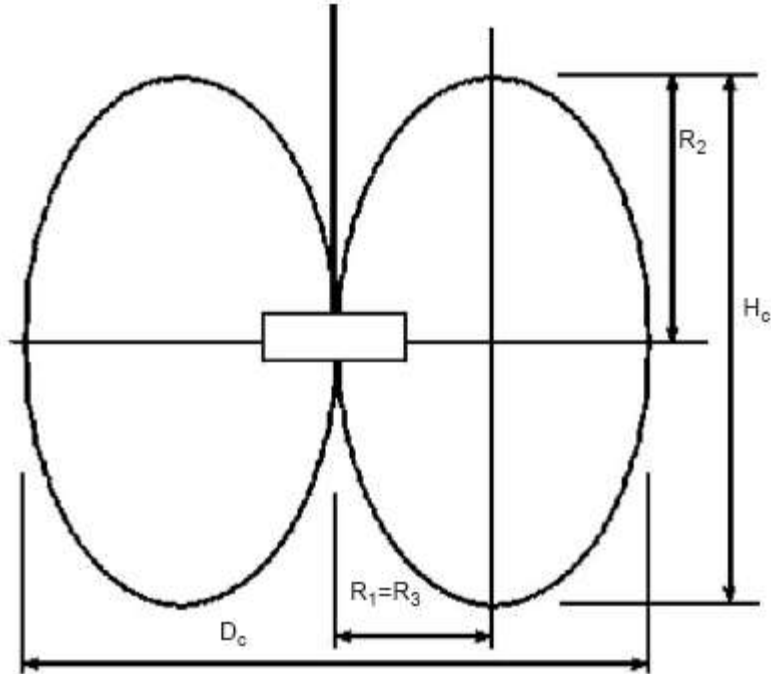
با استفاده از موازنه گشتاور (Torque balance) و مساوی قرار دادن تنش ایجاد شده توسط پره همزن در فصل مشترک کاو (Cavern boundary) با تنش تسلیم سیال و فرض کروی بودن کاو می توان قطر آن را (D_c) به دست آورد.



شکل ۱۶ نمایش کاو کروی و پارامترهای مربوط به آن

این مدل فیزیکی که در سال ۱۹۸۱ پیشنهاد شده بود بعداً در سال ۱۹۸۶ با فرض استوانه ای بودن کاو اصلاح شد. در این مدل فرض شد که کاو به صورت استوانه ای عمودی با ارتفاع H_c است که مرکز آن پره همزن می باشد.

۲- روش امان ... (۱۹۹۸) بر مبنای سرعت سیال است. در این روش ممنتیم کل ایجاد شده توسط پره به صورت مجموع مولفه های مماسی (Tangential) و محوری (Axial) در نظر گرفته شد و کاو را حلقوی شکل (Torus-shaped) فرض کرد.



شکل ۱۷ نمایش کاو حلقوی شکل و پارامترهای مربوطه (مرجع ۴)

نشان داده شده که این مدل برای سیالاتی که در اثر تنش برشی ویسکوزیته شان کم می شود (Shear-thinning fluids) بهتر از مدل EN بوده است.

شعاع کاو حلقوی (r_c) توسط معادله زیر به دست می آید:

$$r_c^{1-2/n} = v_0[(2/n-1)(4\pi^2K/F)^{1/n}] + b^{1-2/n}$$

در معادله فوق $r_c = D_c/4$, $B = T/4$, v_0 سرعت سیال در فصل مشترک کاو است. F در معادله

فوق کل نیروی اعمال شده توسط پره همزن (شعاعی یا محوری) است که توسط رابطه زیر تعریف

می شود:

$$F = \rho N^2 D^4 [N_f^2 + (4P_0/3\pi)^2]^{0.5}$$

P_0 : عدد توان

N_f : عدد نیروی محوری (Axial force number) که به صورت زیر می باشد:

$$N_f = F_a / \rho N^2 D^4$$

عدد نیروی محوری (N_f) همانند عدد توان (Po) برای ظروف با شکل هندسی مشابه یک پارامتر مستقل از مقیاس (Scale-independent) است. البته انتظار می رود به عدد رینولدز و پیکربندی (Configuration) پره همزن بستگی داشته باشد. برای پره های جریان شعاعی (Radial flow) نیروی محوری (Axial force, F_a) مقادیر بسیار کوچکی دارد بنابراین در این نوع پره ها $N_f = 0$ ، در حالیکه برای پره های جریان محوری مقدارش بزرگ و به راحتی قابل اندازه گیری است.

وقتی کاو به دیوار ظرف برسد نوع پره تاثیر کمی بر اتساع عمودی سیال در اثر افزایش سرعت همزن دارد. ارتفاع کاو در این حالت طبق رابطه زیر با سرعت پره (Impeller speed) تغییر می کند:

$$H_c \propto N^p$$

مقادیر H_c/D_c و p هم وابسته به پره (Impeller dependent) هستند.

وقتی سرعت پره (N) (Impeller speed) از سرعت همزن (N_w) (Agitator speed) بیشتر باشد ارتفاع کاو (H_c) از رابطه زیر به دست می آید:

$$H_c / H_{cw} = (N / N_w)^p$$

H_{cw} ارتفاع کاو است وقتی $D_c = T$ ، بنابراین طبق تعریف:

$$H_{cw} = (H_c/D_c)T$$

تاثیر نوع پره بر کارایی تخمیر زانتان

امان ... و همکاران عملکرد فیزیکی و بیولوژیکی ۴ پره با مشخصات زیر را در یک فرمنتور ۱۵۰ لیتری مقایسه کردند.

- 1- Standard Rushton turbine (SRT, $D/T = 0.33$)
- 2- Large diameter Rushton turbine (LRT, $D/T = 0.42$)
- 3- Prochem Maxflo T (PMD, $D/T = 0.44$)



شکل ۱۸ Prochem impeller

- 4- Scaba c (SRGT, $D/T = 0.54$)

کل انرژی همزدن لازم برای انجام فرایند تخمیر با انتگرال گیری توان مخصوص ورودی (Specific power input) نسبت به زمان تخمیر (Fermentation time) قابل محاسبه است. کمترین انرژی لازم مربوط به همزن PMD بود که مقدار آن ۲۷۰ وات ساعت بر کیلوگرم محاسبه شد. بعد از آن SRGT با ۷ درصد، SRT با ۱۴ درصد و LRT با ۲۸ درصد بیش از این مقدار محاسبه شدند.

بر مبنای غلظت و کیفیت صمغ آنچنان که با اندازه گیری ویسکوزیته تعیین شد بهترین نتایج با LRT به دست آمد و صمغ با پایین ترین کیفیت مربوط به PMD بود. در حالیکه همان طور که ذکر شد همزن PMD از نظر مصرف انرژی بهترین گزینه بود. بنابراین طبق هیچ کدام از معیارهای بالا SRT گزینه مناسبی نبود.

منابع:

- [1] Perry, R.H. & Green, D.W. (1973) Perry's Chemical Engineers' Handbook (Fifth edition). New York, N.Y., USA: McGraw Hill. pp. 19-3 to 19-9.
- [2] Amanullah A., Buckland B.C., Nienow A,W, Mixing in the Fermentation and Cell Culture Industries, *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice (Chapter 18)*, E. L. Paul, V. Atiemo-Obeng and S.M. Kresta, Editors, John Wiley and Sons, New York, 2004.
- [3] **The influence of impeller type in pilot scale Xanthan fermentations**, A. Amanullah *, L. Serrano-Carreón, B. Castro, E. Galindo, A. W. Nienow ; Biotechnology and Bioengineering journal, *Biotechnol Bioeng* **57**: 95-108, 1998. John Wiley & Sons, Inc.
- [4] **A new mathematical model to predict cavern diameters in highly shear thinning, power law liquids using axial flow impellers** , A. Amanullah, S. A. Hjorth and A. W. Nienow, *Chemical Engineering Science*, Vol. 53, No. 3, pp. 455-469, 1998
- [5] Robert J. Wilkens - Christopher Henry - Lew E. Gates, [How to Scale-Up Mixing Processes in Non-Newtonian Fluids](http://www.aiche.org/uploadedFiles/CEP/Issues/050344.pdf), <http://www.aiche.org/uploadedFiles/CEP/Issues/050344.pdf>