



شرکت پژوهشی صنعتی آبریزان

گزارش شماره ۳

بررسی میزان افزایش انتقال حرارت مبدل  
حرارتی بر اثر رسوب زدایی محلول میتره به کمک  
نرم افزار Aspen B-JACK

به کوشش

علیرضا غلامی (کارشناس ارشد مهندسی شیمی)

عباس رضازاده (کارشناس مهندسی مکانیک)

اسفندماه ۱۳۹۰

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## چکیده

### بررسی میزان افزایش انتقال حرارت مبدل حرارتی بر اثر رسوب زدایی محلول میتره به کمک نرم افزار Aspen B-JACK

در تحقیق پیش رو منظور از رسوب، رسوب در مبدل های حرارتی که به صورت مواد ته نشین شده نامطلوب بر روی سطوح مبدل های حرارتی قرار می گیرد، می باشد. این رسوب ها در مبدل ها موجب افزایش مقاومت حرارتی شده و همچنین افت فشار را افزایش می دهند که این امر موجب کاهش کارآمدی مبدل می شود. در این پروژه میزان رسوب زدایی محلول میتره مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد بر اثر استفاده از محلول میتره میزان انتقال حرارت افزایش پیدا میکند.

## فهرست مطالب

..... ۴	1-مقدمه
..... ۵	۲- تئوری تحقیقات انجام گرفته
..... ۵	رسوب:
..... ۵	۲-۱- تحلیل مبدل حرارتی:
..... ۶	۲-۲- روش اختلاف دمای متوسط لگاریتمی (LMTD):
..... ۷	۲-۳- روش NTU- $\epsilon$ :
..... ۸	۲-۴- رسوب و مقاومت رسوب
..... ۸	۲-۵- نرم افزار Aspen B-jac
..... ۹	۲-۶- آشنایی با نرم افزار Aspen Hetrان
..... ۱۱	۳- نحوه شبیه سازی و نتایج
..... ۱۱	سیستم مورد بحث
..... ۱۲	۴- نتایج و بحث

## ۱-مقدمه

طبق محاسبات بعمل آمده در کشورهای صنعتی زیان ناشی از رسوب در مبدل‌های حرارتی ۲۵٪ درصد از رشد ناخالص ملی GDP را شامل می‌شود. امروزه وجود رسوب در مبدل‌های حرارتی و تجهیزات انتقال حرارت مشکل اقتصادی عمده ای است.

حداقل زیانهای ناشی از رسوب در صنایع ایالات متحده امریکا ۱۸ میلیارد دلار بر آورد شده است که به تنهایی ۶ میلیارد دلار خسارات ناشی از وجود رسوب در مبدل‌های حرارتی می‌باشد. وجود رسوب در عملکرد حرارتی و هیدرولیکی اصلی ترین مشکل طراحی و بهره برداری مبدل‌های صنعتی می‌باشد

از معایب رسوب در تجهیزات تاسیساتی می توان موارد زیر را ذکر نمود:

- محدود نمودن دبی خروجی بعلت افزایش ضریب اصطکاک سطح داخلی لوله‌ها
- افزایش زمان و تعداد اورهال مجموعه
- افزایش هزینه‌ها و قیمت محصول
- کاهش راندمان تولید و افزایش مصرف مواد اولیه
- افزایش استفاده از حلالهای شیمیایی
- افزایش تعویض لوله‌ها، مخازن و تجهیزات و همچنین کاهش عمر مفید آنها
- کاهش اعتماد (reliability) به سیستم
- کاهش عمر مفید تجهیزات
- اختلال در فرآیند .

محلول میتره علاوه بر قابلیت رسوب زدایی این حسن را نیز دارد که از ایجاد رسوب جدید نیز جلوگیری می کند. در این پروژه میزان افزایش انتقال حرارت یک کندانسور نمونه را بر اثر رسوب زدایی محلول میتره به کمک نرم افزار Aspen B-JACK بررسی می گردد.

## ۲- تئوری تحقیقات انجام گرفته

مبدل حرارتی وسایلی هستند که در داخل آنها بین دو سیال که در دماهای متفاوتی قرار دارند تبادل حرارتی انجام می گیرد.

رسوب:

ناخالصی‌ها سیال، زنگ زدن و سایر واکنش‌های شیمیایی بین سیال و سطح مبدل باعث رسوب گرفتگی سطح مبدل می شود و لایه رسوب ایجاد شده بر روی سطح در برابر انتقال حرارت مقاومت ایجاد می کند.

### ۲-۱- تحلیل مبدل حرارتی:

اگر فرض کنیم که حرارت از مبدل به محیط منتقل نمی شود و انتقال حرارت فقط بین سیال سرد و گرم انجام می شود در این صورت تمام حرارت خارج شده از سیال گرم به سیال سرد منتقل می شود. حرارت منتقل شده از سیال گرم موجب کاهش انرژی درونی سیال گرم و حرارت وارد شده به سیال سرد موجب افزایش انرژی درونی آن می گردد. بنابراین نرخ انتقال حرارت در مبدل های حرارتی برابر است با:

$$q_h = \dot{m}_h C_h (T_{hi} - T_{ho}) \quad \text{رابطه ۲-۱}$$

$$q_c = \dot{m}_c C_c (T_{co} - T_{ci}) \quad \text{رابطه ۲-۲}$$

$$q_h = q_c \quad \text{رابطه ۲-۳}$$

که در روابط بالا  $m$  دبی جرمی،  $C$  گرمای ویژه و  $T_i$  دمای متوسط سیال ورودی و  $T_o$  دمای متوسط سیال خروجی مبدل است.  $h$  به معنای سیال گرم و  $c$  به معنای سیال سرد می باشد.

به طور کلی دو روش برای تحلیل مبدل های حرارتی موجود می باشد:

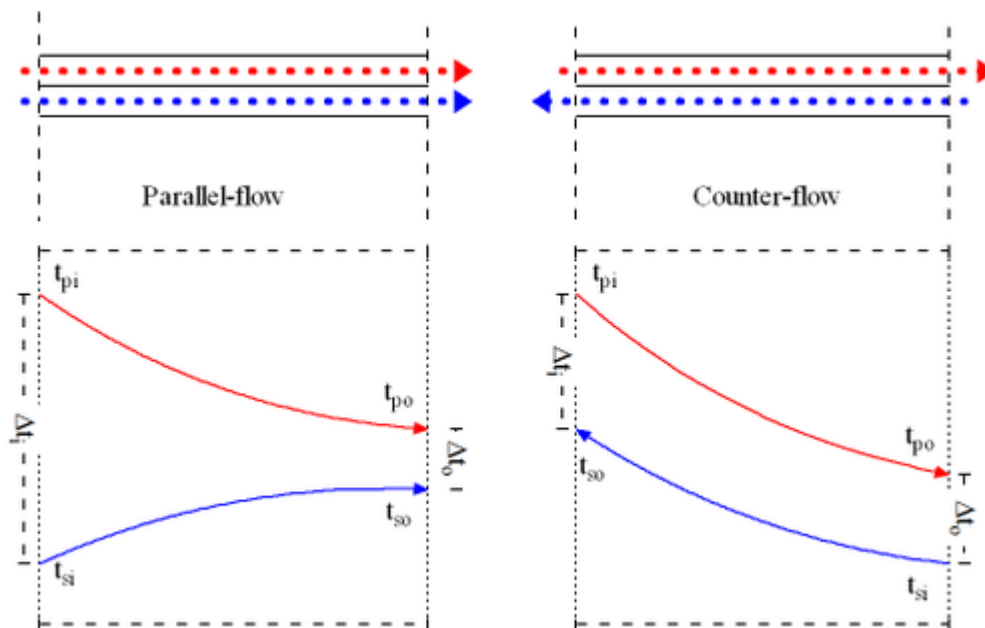
## ۲-۲- روش اختلاف دمای متوسط لگاریتمی (LMTD) :

از این روش زمانی استفاده می کنیم که دمای ورودی سیال سرد و گرم معلوم می باشد و دمای خروجی آن یا داده شده و یا اگر نشده به راحتی با موازنه انرژی بدست می آید و هدف تعیین مساحت سطح تبادل حرارت بین دو سیال می باشد.

برای محاسبه اختلاف دمای متوسط لگاریتمی از رابطه زیر استفاده می شود:

$$LMTD = \frac{\Delta T_i - \Delta T_o}{\ln \left( \frac{\Delta T_i}{\Delta T_o} \right)} \quad \text{رابطه ۴-۲}$$

با توجه به نمودار زیر مقادیر  $\Delta T_i$  و  $\Delta T_o$  عبارت اند از اختلاف دمای سیال سرد و گرم در ورودی مبدل و در خروجی مبدل.



نمودار ۲-۱. جهت سیال در مبدل های غیر هم جهت و هم جهت

در تصویر سمت راست، اختلاف دماهای ورودی و خروجی در داخل مبدل برای حرکت غیر هم جهت دو سیال در داخل مبدل و در سمت چپ برای دو سیال هم جهت نشان داده شده است

مهمترین کاربرد این کمیت در محاسبه حرارت انتقال یافته از سیال گرم به سیال سرد در یک مبدل حرارتی می باشد به صورت زیر:

رابطه ۵-۲

$$Q = h \times A \times LMTD$$

در این رابطه  $Q$  مبین مقدار حرارت منتقل شده به وات،  $h$  نشان دهنده ضریب انتقال حرارت به وات بر متر مربع بر کلوین و  $A$  سطح تبادل گرما به متر مربع می باشد.

### ۳-۲- روش NTU- $\epsilon$ :

اگر دمای ورودی دو سیال و مساحت سطح تبادل حرارت معلوم بوده و هدف تعیین دمای خروجی دو سیال باشد از این روش استفاده می شود. در این روش از اصول زیر استفاده می شود.

رابطه ۶-۲

$$q_{max} = C_{min}(T_{h,i} - T_{c,i})$$

که در این رابطه  $C_{min}$  عبارت است از کمینه مقدار  $C_h$  و  $C_c$  است.

فاکتور کارآمدی به عنوان نسبت مقدار حرارت واقعی به مقدار حرارت

ماکزیمم تعریف می شود:

$$E = \frac{q}{q_{max}}$$

رابطه ۷-۲

با توجه به روابط فوق می توان رابطه زیر را معرفی کرد:

$$E = f\left(NTU, \frac{C_{min}}{C_{max}}\right)$$

رابطه ۸-۲

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}}$$

رابطه ۹-۲

که  $U$  ضریب انتقال حرارت کلی می باشد.

$$\frac{1}{U_{pre}} + R_f = \frac{1}{U_{exp}}$$

رابطه ۱۰-۲

$R$  = مقاومت گرمایی دیواره لوله ها

$h$  = ضریب انتقال حرارت سیال (سیال گرم و سیال سرد) که از روابط تئوری و تجربی بدست می

آید. بسته به این که تغییر فاز داشته باشیم یا نداشته باشیم و هندسه انتقال حرارت. روابطی برای محاسبه آن در کتابهای انتقال حرارت موجود است.



$$U_{exp} = \text{ضریب انتقال حرارت کلی برای مبدل با محاسبه تاثیر رسوبات}$$

$$U_{pre} = \text{ضریب انتقال حرارت بر مبنای تمیز بودن (بدون رسوب) مبدل}$$

$$R_f = \text{مقاومت گرمایی لوله ها بر اثر رسوب}$$

که براساس رابطه فوق مقدار کارآمدی را می توان از نمودارهایی بر اساس دو فاکتور ذکر شده در رابطه فوق بدست آورد.

## ۲-۴- رسوب و مقاومت رسوب

به طور کلی نکته حائز اهمیت در روابط فوق با توجه به کلیات این پروژه وجود مقاومت رسوب در محاسبات ضریب انتقال حرارت کلی می باشد که موجب کاهش انتقال حرارت و افزایش افت فشار می شود.

به منظور محاسبه مقاومت رسوب در مبدل ها روابط مختلفی ارائه شده است که در این پروژه از رابطه ی زیر استفاده شده است:

$$R_f = \frac{d_c \ln(d_c/d_f)}{2\pi k_f} \quad \text{رابطه ۱۱-۲}$$

که در این رابطه  $d_c$  قطر لوله تمیز و  $d_f$  قطر لوله رسوب گرفته شده می باشد و همچنین  $K_f$  ضریب رسانایی رسوب می باشد.

## ۲-۵- نرم افزار Aspen B-jac

نرم افزار Aspen B-jac شامل تعدادی برنامه جهت طراحی حرارتی ، طراحی مکانیکی ، برآورده هزینه ها و ترسیم برای مبدل های حرارتی و مخازن تحت فشار می باشد.

برنامه های اصلی این نرم افزار عبارتند از :

Aspen Hetran	طراحی حرارتی مبدل های پوسته و لوله
Aspen Teams	طراحی مکانیکی ، برآورده هزینه ها و طراحی ترسیمی مبدل های حرارتی پوسته و لوله
Aspen Aerotran	طراحی حرارتی کولرهای هوایی ، مبدلهای اکونومایزر خروجی کوره ها و بخش جابه جایی کوره ها

## ۲-۶- آشنایی با نرم افزار Aspen Hetran

نرم افزار Aspen Hetran برنامه ای برای طراحی ، ارزیابی و شبیه سازی مبدل های پوسته و لوله در کلیه کاربردهای صنعتی نظیر انتقال حرارت بدون تغییر فاز ، میعان و تبخیر می باشد.

۱- در حالت طراحی ( Design Mode ) ، نرم افزار مبدل حرارتی بهینه را با بار حرارتی مشخص و با در نظر گرفتن محدوده های افت فشار مجاز ، سرعت ، قطر پوسته ، طول لوله و دیگر محدودیت هایی مشخص شده ، طراحی می نماید.

۲- در حالت ارزیابی ( Rating Mode ) ، نرم افزار کارآیی یک مبدل موجود ( ساخته شده ) را در شرایط عملیاتی مورد نظر بررسی می کند. در این حالت نرم افزار مشخص می کند که آیا سطح انتقال حرارت موجود در شرایط مورد نظر اهداف را برآورده می سازد یا خیر.

۳- در حالت شبیه سازی ( Simulation Mode ) ، نرم افزار با مشخص کردن ساختار مبدل و شرایط ورودی ها ، شرایط جریان های خروجی را پیش بینی می کند.

نرم افزار Aspen Hetran دارای بانک اطلاعاتی وسیعی است که می توان از اطلاعات آن به عنوان پیش فرض استفاده نموده و بدین طریق امکان راحتی با حداقل داده های ورودی را فراهم ساخت. برای حالت پیچیده که همراه با تغییر فاز در سیال خروجی است ( میعان و یا تبخیر ) ، برنامه نیاز به داده های تعادلی بخار - مایع و خواص ترموفیزیکی در گستره دمای عملیاتی دارد که به دو طریق می توان این نیاز را برآورده ساخت :

۱- به طور مستقیم توسط طراح وارد شود

۲- نرم افزار به صورت خودکار داده های تعادلی مایع و بخار را محاسبه کند

نرم افزار قادر به طراحی مکانیکی اولیه برای مشخص کردن ضخامت پوسته و کلگی ها می باشد. همچنین ضخامت صفحه لوله را به صورت تخمینی معین می کند ولی طراحی مکانیکی دقیق توسط Aspen Hetran انجام نگرفته و توسط برنامه Aspen Teams که به راحتی می توان از محیط Hetran وارد آن شد.

نرم افزار Hetran تمامی انواع مبدل های استاندارد TEMA را پوشش می دهد ، بنابراین با استفاده از آن میتوان کلیه مبدل های TEMA را طراحی نمود. این نرم افزار شامل استانداردهای ANSI ، DIN و ISO نیز می باشد. برنامه Aspen B-jac برآوردی از هزینه ساخت و هزینه تغییرات طراحی را نیز ارائه می دهد. برنامه برآورد هزینه تولید مبدل ، مشابه بانک اطلاعاتی Qchex عمل می نماید.

نرم افزار Aspen Hetran یک برنامه هوشمند است به این معنی که امکان ارزیابی تغییرات طراحی را در حین اجرای برنامه فراهم کرده و طراح را در وارد کردن داده های ورودی ، محاسبات ، نمایش نتایج ، تغییرات طراحی و پرینت خروجی های مورد نظر ، راهنمایی می نماید.

### ۳- نحوه شبیه سازی و نتایج

سیستم مورد بحث

در این مرحله نیاز است که یک مشخصات کلی از سیستم بیان شود تا شبیه سازی ملموس تر گردد. یک نمونه مبدل حرارتی پوسته و لوله (کندانسور یک چیلر آبی ۱۴۰ تن سرمایش) انتخاب شده است که در آن گاز r-22 توسط آب خنک می شود. آب درون لوله جریان داشته و گاز درون پوسته می باشد. اطلاعات کلی مبدل در جداول زیر بیان شده است.

جدول ۳-۱. مشخصات نمونه مورد مطالعه

مشخصه	پوسته	لوله
سیال	r-22	آب
دبی (lit/s)		۷,۶
تغییرات دما	۱۰۵-۴۰	۲۹-۲۴
فشار (psi)	-	۱,۴۵
قطر (in)	۱۲	92 عدد لوله ۰.۵ اینچ
جنس	کربن استیل	مس

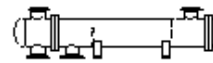
		Shell Side		Tube Side	
Gases (in/out)	kg/h	11188	11188		
Liquids (in/out)	kg/h			27360	27360
Temperature (in/out)	C	105	40	24	29
Dew point or bubble point	C				
Film coefficient	kcal/(h*m <sup>2</sup> *C)	490.4		7778.4	
Fouling resistance	m <sup>2</sup> *h*C/kcal			0.0004	
Velocity	m/s	3.28		2.02	
Pressure drop (allow./calc.)	kgf/cm <sup>2</sup>	0.703/0.084		0.102/0.309	
Total heat exchanged	kcal/h	136936	Type BEM	hor	1 ser 1 par
Overall coef. - dirty	kcal/(h*m <sup>2</sup> *C)	370.3	Shell size	189—2000	mm
Effective surface area	m <sup>2</sup>	7.2	Tube No-OD	92—12.7	mm
MTD corrected	C	36.86	Baffles	single seg	43 % hor
MTD correction factor		0.96	Tube passes	2	

## ۴- نتایج و بحث

جداول ذیل نتایج بدست آمده از نرم افزار آورده شده است:

Heat Exchanger Specification Sheet								
1	Company:							
2	Location:							
3	Service of Unit:			Our Reference:				
4	Item No.:			Your Reference:				
5	Date:	Rev No.:	Job No.:					
6	Size	189- 2000	mm	Type BEM	hor	Connected in	1 parallel	1 series
7	Surf/unit(eff.)	7.2	m <sup>2</sup>	Shells/unit	1	Surf/shell (eff.)	7.2	m <sup>2</sup>
8	<b>PERFORMANCE OF ONE UNIT</b>							
9	Fluid allocation	Shell Side			Tube Side			
10	Fluid name	r-22			water			
11	Fluid quantity, Total	11188			27360			
12	Vapor (In/Out)	kg/h	11188	11188				
13	Liquid	kg/h			27360	27360		
14	Noncondensable	kg/h						
15								
16	Temperature (In/Out)	C	105	40	24	29		
17	Dew / Bubble point	C						
18	Density	kg/m <sup>3</sup>	44.94	60.14	998.31	997.38		
19	Viscosity	cp	0.016	0.015	0.919	0.819		
20	Molecular wt, Vap							
21	Molecular wt, NC							
22	Specific heat	kcal/(kg°C)	0.1909	0.1879	1.0012	1.0008		
23	Thermal conductivity	kcal/(h*m°C)	0.016	0.012	0.516	0.521		
24	Latent heat	kcal/kg						
25	Pressure	kgf/cm <sup>2</sup>	15		2			
26	Velocity	m/s	3.28		2.02			
27	Pressure drop, allow./calc.	kgf/cm <sup>2</sup>	0.703	0.084	0.102	0.309		
28	Fouling resist. (min)	m <sup>2</sup> *h°C/kcal				0.0004		
29	Heat exchanged	136936	kcal/h	MTD corrected		36.86	C	
30	Transfer rate, Service	515.9	Dirty	370.3	Clean	453.9	kcal/(h*m <sup>2</sup> *C)	

31 CONSTRUCTION OF ONE SHELL					Sketch	
32		Shell Side		Tube Side		
33	Design/Test pressure	kgf/cm <sup>2</sup>	15.468/	/Code	5.273/	/Code
34	Design temperature	C	143.33		65.56	
35	Number passes per shell		1		2	
36	Corrosion allowance	mm	1.59			
37	Connections	In	152.4/150 ANSI		101.6/	
38	Size/rating	Out	152.4/150 ANSI		101.6/	
39	mm/	Intermediate	/150 ANSI		/	
40	Tube No. 92	OD 12.7	Tks-avg 1.24	mm Length 2000	mm Pitch 15.88	mm
41	Tube type		Material Copper		Tube pattern 30	
42	Shell CS	ID	OD 203.2	mm	Shell cover	
43	Channel or bonnet	Copper		Channel cover		
44	Tubesheet-stationary	Copper		Tubesheet-floating		
45	Floating head cover		Impingement protection		None	
46	Baffle-crossing	CS	Type single seg	Cut(%d) 43	hor	Spacing: c/c 406.4 mm
47	Baffle-long	Seal type			Inlet 371.35	mm
48	Supports-tube	U-bend		Type		
49	Bypass seal	Tube-tubesheet joint		groove/expand		
50	Expansion joint		Type			
51	RhoV2-Inlet nozzle	647	Bundle entrance 974	Bundle exit 728	kg/(m*s <sup>2</sup> )	
52	Gaskets - Shell side		Tube Side			
53	Floating head					
54	Code requirements			ASME Code Sec VIII Div 1	TEMA class C	
55	Weight/Shell	312.7	Filled with water 368.3	Bundle 108.4	kg	
56	Remarks					
57						
58						



اگر بخواهیم مقایسه ای از این کندانسور در حالت تمیز آن با حالتی که رسوب گرفته است را داشته باشیم با اعمال ضخامت و ضریب انتقال حرارت رسوب بر اساس جداول موجود در کتب مبدلهای حرارتی این نرم افزار قابلیت مقایسه آنها را داراست که نتایج حاصله بدین صورت می باشد:

Exchanger	Clean	Dirty
Heat exchanged	130318	119076
Transfer rate	453.9	370.3
Effective surface area	7.2	7.2
Corrected MTD	39.87	44.65
Shell side temperature in/out	105 /43.03	105/48.37
Tube side temperature in/out	24 /28.76	24/28.35
Outlet temperature for pass	1 27.24 2 28.76	26.83 28.35

با توجه به نتایج حاصله مشخص است که در صورت نشست رسوب میزان انتقال حرارت در کندانسور ۱۱۲۴۲ کیلوکالری بر ساعت کاهش می یابد و گاز مورد نظر به دمای مطلوب نرسیده و ۵ درجه از حد مورد نظر گرمتر از کندانسور خارج می گردد. همچنین دمای کارکرد از ۳۹,۸۷ درجه سانتی گراد به ۴۴,۶۵ درجه می رسد که علاوه بر کاهش راندمان سیستم باعث خارج شدن سیستم از نقطه کارکرد طراحی شده که آسیب پذیری سیستم در برابر تنش های حرارتی و مکانیکی را افزایش می دهد.