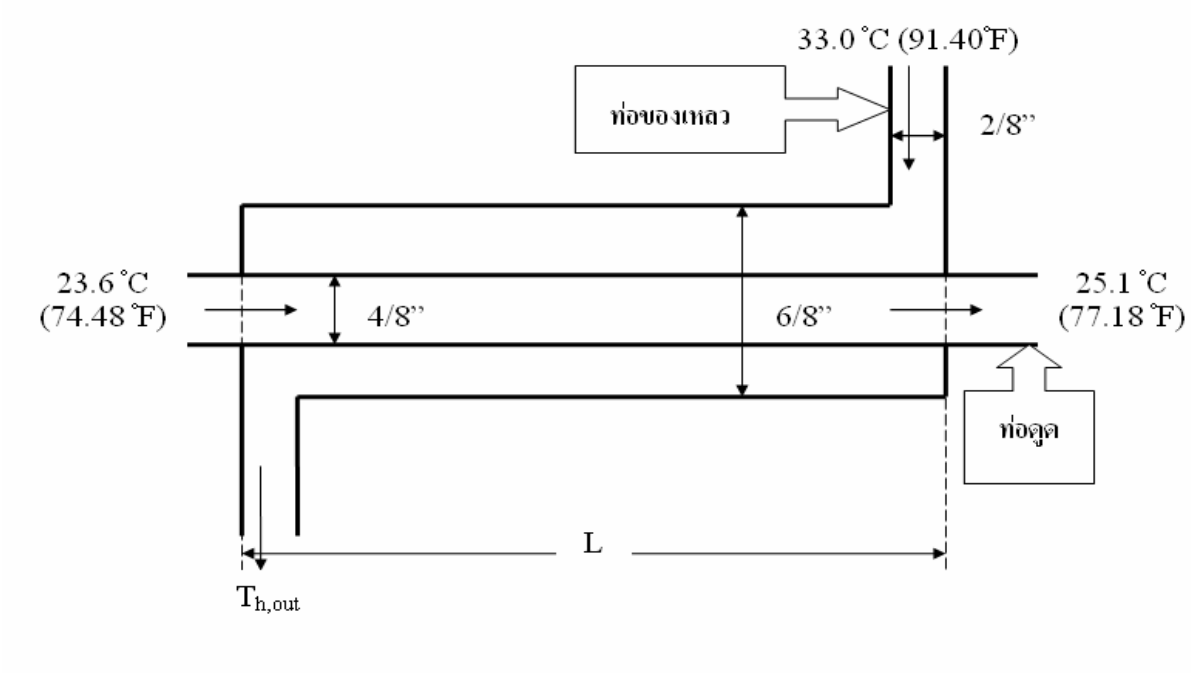
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.
ตัวอย่างการคำนวณหาความยาวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน

ภาคผนวกที่ ก. 1 ตัวอย่างการคำนวณหาความยาวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างท่อดูดและท่อของเหลว (Cross-Cycle Heat Exchanger)

ในการออกแบบอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนจะใช้ข้อมูลของการทดสอบก่อนที่จะติดตั้ง Cross-Cycle Heat Exchanger เข้าสู่ระบบ มาใช้ในการออกแบบ

เครื่องปรับอากาศที่ใช้ในการทดลอง มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของท่อดูด 4/8” และท่อของเหลว 2/8” กำหนดให้อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อนมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 6/8” ดังรูปที่ ก.1 สิ่งที่ต้องการออกแบบคือค่าความยาวของอุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน



รูปที่ ก.1 แสดงสภาวะของสารทำความเย็น ณ จุดต่างๆ ที่ได้จากการทดลอง

$T_{cold,in}$ = 74.48 F

$T_{cold,out}$ = 77.18 F

$T_{hot,in}$ = 91.40 F

$\dot{m}r$ = 0.025052 kg/s = 198.83 lbm/h

1. หาค่าคุณสมบัติของสารทำความเย็น

1.1 ที่ท่อดูดสารทำความเย็นอยู่ในสภาวะไอดง (Superheat Vapor)

$$T_{average} = \left(\frac{74.8 + 77.18}{2} \right) = 75.83 \text{ F}$$

ที่ 75.83 F จากตารางคุณสมบัติในภาคผนวก จ.

Cp_{cold} = 0.15395 Btu / lbm•F

μ_{cold} = 0.03077 lbm / ft•h

k_{cold} = 0.00627 Btu / h•ft•F

1.2 ที่ท่อของเหลว สารทำความเย็นอยู่ในสภาวะของเหลวเย็นยิ่งยวด (Subcooled Liquid) สมมุติให้อุณหภูมิของสารทำความเย็นภายในท่อเท่ากับ $T_{hot,in}$

T = 91.40 F

Cp_{hot} = 0.30741 Btu / lbm•F

μ_{hot} = 0.4569 lbm / ft•h

k_{hot} = 0.04843 Btu / h•ft•F

2. หาค่าอุณหภูมิขาออกจากท่อของเหลว, $T_{hot,out}$ แทนค่าตัวแปรต่างๆลงในสมการที่ 3.2

$$T_{hot,out} = T_{hot,in} - \frac{c_{p,cold}}{c_{p,hot}}(T_{cold,out} - T_{cold,in})$$

$$= 91.4 - \frac{0.15395}{0.30741}(77.81 - 74.48)$$

$$= 90 \text{ F}$$

นำค่า $T_{hot,out}$ ที่ได้ไปเฉลี่ยกับค่า $T_{hot,in}$ เพื่อตรวจสอบค่าอุณหภูมิที่ได้ จะได้ว่า

$$T_{average} = \frac{91.4 + 90.0}{2} = 90.7\ F$$

จากตารางคุณสมบัติ ที่ 90.7 F

$$Cp_{hot} = 0.30696 Btu / lbm \bullet F$$
$$\mu_{hot} = 0.45795\ lbm / ft \bullet h$$
$$k_{hot} = 0.04854\ Btu / h \bullet ft \bullet F$$

แทนค่าตัวแปรลงในสมการที่ 3.2 จะได้ว่า

$$T_{hot,out} = T_{hot,in} - \frac{c_{p,cold}}{c_{p,hot}}(T_{cold,out} - T_{cold,in})$$
$$= 91.4 - \frac{0.15395}{0.30696}(77.81 - 74.48)$$
$$= 90.0\ F$$

ค่าที่ได้จากการคำนวณทั้งสองครั้งมีค่าเท่ากัน ดังนั้น

$$T_{hot,out} = 90.0\ F = 32.22\ ^{o}C$$

3. หาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อดูด (h_i)

$$\dot{m}_r = \rho A V$$
$$\rho V D = \frac{4\dot{m}_r}{\pi D}$$
$$= \frac{4 \times 198.83 \frac{lbm}{h}}{\pi \times \frac{4}{8} in \times \frac{1}{12} \frac{ft}{in}}$$
$$= 6{,}075.69 \frac{lbm}{ft \bullet h}$$

$$\text{Re} = \frac{\rho VD}{\mu}$$

$$= \frac{6{,}075.69}{0.03077}$$

$$= 197{,}455.09$$

$$\text{Pr} = \frac{C_p \mu}{k}$$

$$= \frac{(0.15395)(0.03077)}{0.00627}$$

$$= 0.755$$

ความสัมพันธ์ของ Colburn:

$$\text{Nu} = \frac{h_i D}{k} = 0.023 \text{Re}^{0.8} \text{pr}^{1/3}$$

$$= 361.01$$

เมื่อ $0.7 < \text{Pr} < 160$ และ $\text{Re} > 10{,}000$

$$h_i = \frac{0.023(197{,}455.09)^{(0.8)}(0.756)^{1/3}(0.00627)}{\frac{4}{8}\text{in} \times \frac{1}{12}\frac{\text{ft}}{\text{in}}}$$

4. การหาค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนของท่อของเหลว (h_o)

$$\text{Re} = \frac{\rho VD_h}{\mu}$$

$$= \frac{\rho (D_o - D_I)}{\mu} \times \frac{\dot{m}_r}{\rho \frac{\pi}{4}(D_o^2 - D_i^2)}$$

$$= \frac{4\dot{m}_r}{\pi (D_o + D_i)\mu}$$

$$= \frac{4(198.83\text{lbm/h})}{\pi \times \left(\frac{6}{8}+\frac{4}{8}\right)\left(\frac{1}{12}\frac{\text{ft}}{\text{in}}\right)(0.45795\text{lbm/ft}\bullet\text{h})}$$

$$= 5{,}306.86$$

$$\text{Pr} = \frac{C_p\mu}{k}$$

$$= \frac{(0.30696)(0.45795)}{0.04854}$$

$$= 2.896$$

จากภาคผนวก ง. ความสัมพันธ์ของ Gnielinski :

$$\text{Nu} = \frac{h_o D_h}{k} = 0.012\left(\text{Re}^{0.87} - 280\right)\text{Pr}^{0.4}$$

เมื่อ $1.5<\text{Pr}<500$ และ $3000<\text{Re}<10^6$

$$h_o = \frac{0.012\left(\text{Re}^{0.87} - 280\right)\text{Pr}^{0.4} \bullet k}{D_h}$$

$$= \frac{(0.012)\left(5{,}306.86^{0.87} - 280\right)2.896^{0.4} \bullet 0.04854}{\frac{6}{8}-\frac{4}{8}\text{in}\times\frac{1}{12}\frac{\text{ft}}{\text{in}}}$$

$$= 62.47\ \frac{Btu}{h \bullet ft^2 F}$$

5. หาค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนรวม (U)

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i}+\frac{1}{h_o}}$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{54.32}+\frac{1}{62.47}}$$

$$= 29.06\ \frac{Btu}{h \bullet ft^2 F}$$

6. หาพื้นที่การถ่ายเทความร้อน (A)

$$\left(\dot{mc}_p\Delta T\right)_{cold} = UA\Delta T_{ln}$$

เมื่อ $$\Delta T_{ln} = \frac{(\Delta\Delta_O - \Delta T_L)}{\ln \frac{\Delta T_O}{\Delta T_L}}$$

$$\Delta T_O = 90 - 74.48 = 15.57\ ^oF$$

$$\Delta T_L = 91.40 - 77.48 = 14.22\ ^oF$$

แทนค่าต่างๆในสมการข้างต้น

$$(198.83)(0.15395)(77.18 - 74.48) = (29.06)A[(15.57-14.22)/(\ln(15.57/14.22))]$$

$$A = 0.191\ ft^2$$

$$L = \frac{A}{\pi D_i}$$

$$= \frac{0.19\ ft^2}{\pi \times \frac{4}{8}\ in \times \frac{1\ ft}{12\ in}}$$

$$= 1.46\ ft$$

$$= 0.445\ m$$

ภาคผนวก ข.
ตัวอย่างการคำนวณการลงทุน

ภาคผนวกที่ ข.1 ตัวอย่างการคำนวณการลงทุน

จากข้อมูลการทดลองในตารางที่ 4.1-4.8

1. คำนวณหาการประหยัดต่อปี

จำนวนชั่วโมงการทำงานต่อวัน	=	8	ชั่วโมง/วัน
จำนวนวันทำงานต่อปี	=	300	วัน/ปี
แฟคเตอร์การทำงานของเครื่องปรับอากาศ	=	0.6	
ค่าพลังงานไฟฟ้าจากใบเสร็จรับเงินรายเดือน	=	2.695	บาท/kWh [21]
ของการไฟฟ้า ประเภทธุรกิจขนาดกลาง ประจำเดือนมกราคม 2550			
ค่า Ft	=	0.7842	บาท/kWh [22]
ของการไฟฟ้า ประจำเดือนมกราคม 2550			

ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อปี (ก่อน)

$$= (1.24411 \times 8 \times 300 \times 0.6 \times 2.695) + (1.24411 \times 8 \times 300 \times 0.6 \times 0.7842)$$

= 6,233.05 บาท/ปี

ค่าพลังงานไฟฟ้าต่อปี (หลัง)

$$= (1.22102 \times 8 \times 300 \times 0.6 \times 2.695) + (1.22102 \times 8 \times 300 \times 0.6 \times 0.7842)$$

= 6,117.37 บาท/ปี

การประหยัดต่อปี = 115.68 บาท/ปี

2. คำนวณหาอัตราผลตอบแทน

$$P = A\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1-i)^n}\right]$$

โดยที่

P	=	จำนวนเงินลงทุน	=	500	บาท
A	=	จำนวนเงินที่ประหยัดได้	=	115.68	บาท/ปี
n	=	อายุการใช้งานของเครื่องปรับอากาศ	=	10	ปี

สมมติค่า i แล้วทำการคำนวณซ้ำจนได้ค่าที่ต้องการคือ

I = IRR = 19.11 %

3. คำนวณหาระยะเวลาคืนทุน

ระยะเวลาคืนทุน (BP) $= \frac{500}{115.68} =$ 4.32 ปี

ภาคผนวก ข.2 อัตราค่าไฟฟ้าของกิจการขนาดกลาง

อัตราค่าไฟฟ้าของกิจการขนาดกลางของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคมีดังนี้ [21]

ตารางที่ ข.1 อัตราปกติ

อัตราค่าไฟฟ้า	ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)
1. แรงดันตั้งแต่ 69 กิโลโวลท์ขึ้นไป	175.7	1.666
2. แรงดัน 22-33 กิโลโวลท์	196.26	1.7034
3. แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลท์	221.5	1.7314

ตารางที่ ข.2 อัตราตามช่วงเวลาของการใช้ (Time of Use Rate : TOU)

อัตราค่าไฟฟ้า	ค่าความต้องการพลังงานไฟฟ้า (บาท/กิโลวัตต์)	ค่าพลังงานไฟฟ้า (บาท/หน่วย)		ค่าบริการ บาท/เดือน)
	Peak	Peak	Off Peak	
1. แรงดันตั้งแต่ 69 กิโลโวลท์ขึ้นไป	74.14	2.6136	1.1726	228.17
2. แรงดัน 22-33 กิโลโวลท์	132.93	2.6950	1.1914	228.17
3. แรงดันต่ำกว่า 22 กิโลโวลท์	210	2.8408	1.246	228.17

Peak : วันจันทร์ -ศุกร์ 09.00 น. - 22.00 น.

Off Peak : วันจันทร์ -ศุกร์ 22.00 น. - 09.00 น. และวันเสาร์ วันอาทิตย์
วันหยุดราชการตามปกติ(ไม่รวมวันหยุดชดเชย) ทั้งวัน

ค่า Ft ระยะเดือน ตุลาคม2549 ถึง มกราคม 2550 เท่ากับ 74.42 สต. /หน่วย [22]

ภาคผนวก ค.
การกำหนดระดับประสิทธิภาพเครื่องปรับอากาศ

ภาคผนวกที่ ค. การกำหนดระดับประสิทธิภาพเครื่องปรับอากาศ

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทยได้กำหนดระดับประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศไว้ดังตาราง ค.1

ตารางที่ ค.1 แสดงระดับประสิทธิภาพของเครื่องปรับอากาศ [19]

ระดับประสิทธิภาพ		ประสิทธิภาพ (EER)
ระดับ 5	ดีมาก	10.6 ขึ้นไป
ระดับ 4	ดี	9.6 ขึ้นไป แต่ไม่ถึง 10.6
ระดับ 3	ปานกลาง	8.6 ขึ้นไป แต่ไม่ถึง 9.6
ระดับ 2	พอใช้	7.6 ขึ้นไป แต่ไม่ถึง 8.6
ระดับ 1	ต่ำ	ต่ำกว่า 7.6

รูปที่ ค.1 ฉลากแสดงระดับประสิทธิภาพ

ภาคผนวก ง.

ตารางแสดงค่า Nusselt Number

ภาคผนวกที่ ง. ค่า Nusselt Number

ตารางที่ ง.1 แสดงค่า Nusselt Number ชนิดการไหลแบบปั่นป่วนในช่วง Fully Developed สำหรับก๊าซและของเหลว ในท่อกลมและเรียบ [13]

Investigators	Correlations	Application Range
Dittus and Boelter	$Nu = 0.024Re^{0.8}Pr^{0.4}$ for heating $0.026Re^{0.8}Pr^{0.4}$ for cooling	$0.7 \le Pr \le 120$ and $2{,}500 \le Re \le 1.24 \times 10^5$, $L/d > 60$
Von Karman	$Nu = \dfrac{(f/2)Re\,Pr}{1+5(f/5)\left[Pr-1+\ln\left(\dfrac{5Pr+1}{6}\right)\right]}$	$0.5 \le Pr \le 10$ and $10^4 \le Re \le 5 \times 10^6$
Prantl	$Nu = \dfrac{(f/2)Re\,Pr}{1+8.7(f/2)^{1/2}[Pr-1]}$	$0.5 \le Pr \le 10$ and $10^4 \le Re \le 5 \times 10^6$
Drexel and Mc Adams	$Nu = 0.021Re^{0.8}\,Pr^{0.4}$	$Pr \le 0.7$ and $10^4 \le Re \le 5 \times 10^6$
Friend and Metzner	$Nu = \dfrac{(f/2)Re\,Pr}{1.2+11.8(f/2)^{1/2}\left[Pr^{2/3}-1\right]Pr^{-1/3}}$	$50 \le Pr \le 600$ and $5 \times 10^4 \le Re \le 5 \times 10^6$
Petukhov, Kirillov and Popov	$Nu = \dfrac{(f/2)Re\,Pr}{C+12.7(f/2)^{1/2}\left[Pr^{2/3}-1\right]}$ *where* $C = 1.07 + 900/Re - [0.63/(1+10Pr)]$	$0.5 \le Pr \le 10^6$ and $4{,}000 \le Re \le 5 \times 10^6$
Huasen	$Nu = 0.037\left(Re^{0.75}-180\right)Pr^{0.42}\left[1+(X/D)^{-2/3}\right]$	$0.7 \le Pr \le 3$ and $10^4 \le Re \le 10^5$

Gnielinski	$Nu = \frac{(f/2)(Re - 1000)\,Pr}{1 + 12.7(f/2)^{1/2}\left[Pr^{2/3} - 1\right]}$	$0.5 \le Pr \le 2{,}000$ and $2{,}300 \le Re \le 5 \times 10^6$
	$Nu = 0.0214\left(Re^{0.8} - 100\right)Pr^{0.4}$	$0.5 \le Pr \le 10$ and $10^4 \le Re \le 5 \times 10^6$
	$Nu = 0.012\left(Re^{0.87} - 280\right)Pr^{0.4}$	$1.5 \le Pr \le 500$ and $3 \times 10^3 \le Re \le 10^6$
Colburn	$Nu = 0.023\,Re^{0.8}\,Pr^{1/3}$	$0.7 < Pr < 160$; $Re > 10{,}000$

ภาคผนวก จ.

ตารางแสดงค่าคุณสมบัติของสารทำความเย็น R-22

ภาคผนวก จ. ตารางคุณสมบัติของสารทำความเย็น R-22

ตารางที่ จ.1 แสดงคุณสมบัติของสารทำความเย็น R-22 English Units [7]

	Viscosity, μ lbm/(ft-hr)			Thermal Conductivity, k Btu/(hr-ft-F)			Specific Heat, c_p Btu/(lbm-F)			
Fahrenheit Temperature	Saturated Liquid	Saturated Vapor	Gas P = 1 atm	Saturated Liquid	Saturated Vapor	Gas P = 1 atm	Saturated Liquid	Saturated Vapor	Gas P = 0	Fahrenheit Temperature
−100	1.153			0.0789			0.255		0.1260	−100
− 80	1.002			0.0757			0.256		0.1292	− 80
− 60	0.883			0.0725			0.259	0.139	0.1324	− 60
− 40	0.788	0.0242	0.0242	0.0693	0.0040	0.00404	0.262	0.146	0.1356	− 40
− 20	0.710	0.0254	0.0254	0.0661	0.0044	0.00443	0.266	0.152	0.1388	− 20
0	0.646	0.0266	0.0265	0.0630	0.0048	0.00481	0.271	0.158	0.1420	0
20	0.592	0.0279	0.0276	0.0598	0.0052	0.00520	0.276	0.165	0.1452	20
40	0.546	0.0292	0.0288	0.0566	0.0056	0.00558	0.283	0.175	0.1484	40
60	0.507	0.0306	0.0299	0.0534	0.0060	0.00597	0.291	0.187	0.1515	60
80	0.474	0.0321	0.0310	0.0502	0.0064	0.00635	0.300	0.204	0.1546	80
100	0.444	0.0339	0.0321	0.0471	0.0068	0.00674	0.313	0.226	0.1577	100
120	0.422	0.0360	0.0333	0.0439	0.0072	0.00712	0.332	0.253	0.1608	120
140	0.387	0.0383	0.0344	0.0407	0.0077	0.00751	0.357	0.288	0.1638	140
160	0.340	0.0411	0.0354	0.0371	0.0084	0.00790	0.390	0.332	0.1668	160
180	0.285	0.045	0.0365	0.0318	0.0105	0.00828	0.433		0.1697	180
190	0.244	0.049	0.0371	0.0288	0.0119	0.00848			0.1712	190
200	0.182	0.058	0.0376	0.0238	0.0140	0.00867			0.1726	200
205	0.074	0.074	0.0379	0.0177	0.0177	0.00876			0.1733	205
220			0.0387			0.00905			0.1754	220
240			0.0398			0.00944			0.1782	240
260			0.0408			0.00982			0.1810	260
280			0.0419			0.01021			0.1836	280
300			0.0429			0.01059			0.1863	300
320			0.0439			0.0110			0.1888	320
340			0.0450			0.0114			0.1913	340
360			0.0460			0.0118			0.1937	360
380			0.0470			0.0121			0.1960	380
400			0.0480			0.0125			0.1983	400
420			0.0490			0.0129			0.2005	420
440			0.0500			0.0133			0.2026	440

ตารางที่ จ.2 แสดงคุณสมบัติของสารทำความเย็น R-22 SI Units [7]

Celsius Temperature	Viscosity, $\mu \times 10^3$ (N-s)/m^2 Saturated Liquid	Viscosity, $\mu \times 10^3$ (N-s)/m^2 Saturated Vapor	Viscosity, $\mu \times 10^3$ (N-s)/m^2 Gas P = 101.33 kPa	Thermal Conductivity, k W/(m-K) Saturated Liquid	Thermal Conductivity, k W/(m-K) Saturated Vapor	Thermal Conductivity, k W/(m-K) Gas P = 101.33 kPa	Specific Heat, c_p kJ/(kg-K) Saturated Liquid	Specific Heat, c_p kJ/(kg-K) Saturated Vapor	Specific Heat, c_p kJ/(kg-K) Gas P = 0	Kelvin Temperature
− 73	0.4766			0.137			1.07		0.5275	200
− 62	0.4142			0.131			1.07		0.5409	211
− 51	0.365			0.125			1.08	0.582	0.5543	222
− 40	0.326	0.0100	0.0100	0.120	0.0069	0.00699	1.10	0.611	0.5677	233
− 29	0.294	0.0105	0.0105	0.114	0.0076	0.00767	1.11	0.636	0.5811	244
− 18	0.267	0.0110	0.0110	0.109	0.0083	0.00832	1.13	0.662	0.5945	255
− 7	0.245	0.0115	0.0114	0.103	0.0090	0.00900	1.16	0.691	0.6079	266
4	0.226	0.0121	0.0119	0.0980	0.0097	0.00966	1.18	0.733	0.6213	277
16	0.210	0.0126	0.0124	0.0924	0.010	0.0103	1.22	0.783	0.6343	289
27	0.196	0.0133	0.0128	0.0869	0.011	0.0110	1.26	0.854	0.6473	300
38	0.184	0.0140	0.0133	0.0815	0.012	0.0117	1.31	0.946	0.6603	311
49	0.174	0.0149	0.0138	0.0760	0.012	0.0123	1.39	1.06	0.6732	322
60	0.160	0.0158	0.0142	0.0704	0.013	0.0130	1.49	1.21	0.6858	333
71	0.141	0.0170	0.0146	0.0642	0.015	0.0137	1.63	1.39	0.6984	344
82	0.118	0.019	0.0151	0.0550	0.018	0.0143	1.81		0.7105	355
88	0.101	0.020	0.0153	0.0498	0.021	0.0147			0.7168	361
94	0.075	0.024	0.0155	0.0412	0.024	0.0150			0.7226	367
96	0.031	0.031	0.0157	0.0306	0.031	0.0152			0.7256	369
105			0.0160			0.0157			0.7344	378
116			0.0165			0.0163			0.7461	389
127			0.0169			0.0170			0.7578	400
138			0.0173			0.01767			0.7687	411
149			0.0177			0.01833			0.7800	422
160			0.0181			0.0190			0.7905	433
171			0.0186			0.0197			0.8009	444
183			0.0190			0.0204			0.8110	456
194			0.0194			0.0209			0.8206	467
205			0.0198			0.0216			0.8302	478
216			0.0203			0.0223			0.8395	489
227			0.0207			0.0230			0.8482	500