FIS1523 - Interrogación No. 3 - Solución

FACULTAD DE FÍSICA
Pontificia Universidad Católica de Chile
Primer Semestre 2013

P1	P2	P3	Nota

Tiempo para responder: 2 horas y 30 minutos

Nombre: _____

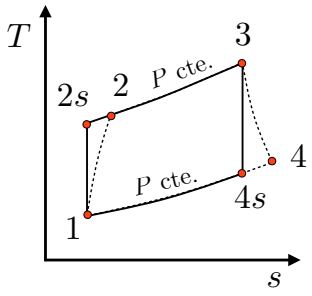
Atención!!

- Si utiliza lápiz de grafito, perderá la posibilidad de reclamar errores de corrección.
- El profesor no se hace responsable de las respuestas que los ayudantes puedan dar a sus consultas durante el examen.

Problema 1

Una turbina a gas de una planta de potencia opera en un ciclo de Brayton simple entre las presiones 100 y 1200 kPa. El fluido utilizado es aire que entra al compresor a 300 K a una tasa de 150 m^3/min y deja la turbina a 700 K. Utilice capacidades especficas constantes y asuma que el compresor y turbina tienen eficiencias isoentrópicas de 82 % y 88 %, respectivamente.

(a) (1 punto) Realice un diagrama T-s de ciclo.



(1)

(b) (3 puntos) Determine el trabajo neto producido y la potencia de la planta.

Para determinar el trabajo neto y potencia debemos calcular las temperaturas de todo el ciclo. Sabemos que $T_1 = 300\ K$ *y que la razń de las presiones satisface,*

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{P_{2s}}{P_1} = \frac{P_3}{P_{4s}} = \frac{P_3}{P_4} = 12 \tag{2}$$

El proceso 1-2s es isoentrópico, luego

$$T_{2s} = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} \quad \rightarrow \quad T_{2s} = 610.18\ K \tag{3}$$

Utilizando la eficiencia isoentrópica del compresor y que $\Delta h = c_P \Delta T$ tenemos que

$$\eta_C = \frac{h_{2s} - h_1}{h_2 - h_1} = \frac{T_{2s} - T_1}{T_2 - T_1} \quad \rightarrow \quad T_2 = T_1 + \frac{(T_{2s} - T_1)}{\eta_C} \quad \rightarrow \quad T_2 = 678.27\ K \tag{4}$$

Para determinar T_3 sabemos que el proceso 3-4s es isoentrópico y conocemos la eficiencia de la turbina η_T =0.88 y la temperatura a la salida de esta $T_4 = 700\ K$,

$$T_{4s} = T_3 \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{(k-1)/k} \quad y \quad \eta_T = \frac{h_3 - h_4}{h_3 - h_{4s}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4s}} \tag{5}$$

luego

$$T_4 = T_3 \left[(1 - \eta_T) + \eta_T \left(\frac{1}{12}\right)^{(k-1)/k}\right] \quad \rightarrow \quad T_3 = 1266.5\ K \tag{6}$$

Entonces el trabajo neto se puede calcular mediante

$$q_{in} = h_3 - h_2 = c_P(T_3 - T_2) = +591.18\ kJ/kg \tag{7}$$

$$q_{out} = h_1 - h_4 = c_P(T_1 - T_4) = -402.00\ kJ/kg \tag{8}$$

$$w_{neto} = q_{in} + q_{out} = 189.18\ kJ/kg \tag{9}$$

Para determinar la potencia de la planta calculamos

$$\dot{W}_{neto} = \dot{m} w_{neto} \quad con \quad \dot{m} = \dot{V}\rho \quad con \quad \rho = \frac{P}{R_e T} \tag{10}$$

Debido a la conservación de masa, $\dot{m}$ es una constante durante el ciclo y podemos calcular en cualquier punto de este. En particular sabemos que a la entrada del compresor

$$\dot{V} = 150\ m^3/min \qquad y \qquad \rho = \frac{100\ kPa}{0.827\ kJ/kg \cdot K \times 300\ K} = 1.16\ kg/m^3 \tag{11}$$

Luego,

$$\dot{m} = \dot{V}\rho = 150 \times 1.16/60 = 2.9\ kg/s \qquad \rightarrow \qquad \dot{W}_{neto} = 548.62\ W \tag{12}$$

(c) (1 punto) Determine el trabajo de retroceso o la relación de acoplamiento turbina compresor (back work ratio).

El trabajo de retroceso es

$$r_{bw} = \frac{w_{compresor}}{w_{turbina}} = \frac{c_P(T_1 - T_2)}{c_P(T_3 - T_4)} = \frac{380.16}{569.34} = 66.8\,\% \tag{13}$$

(d) (1 punto) Determine la eficiencia térmica.

La eficiencia térmica es

$$\eta_t = \frac{w_{neto}}{q_{in}} = \frac{189.18}{591.18} = 32\,\% \tag{14}$$

La capacidad especfica del aire a presión constante es 1.005 kJ/kg y la razón entre las capacidades específicas es k =1.4.

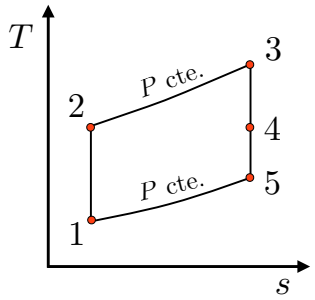
Nombre: _____

Problema 2

Considere un avión que utiliza un motor turbo con un razón de presión de 12. El avión se encuentra detenido en la pista mediante sus frenos. La temperatura ambiente del aire son 310 K y entra al motor a una tasa de 10 kg/s. El combustible tiene una capacidad energética de 80,000 kJ/kg, y es quemado completamente a una tasa de 0.1 kg/s.

(a) (4 puntos) Determine la velocidad de salida de los gases.

Para determinar la velocidad de salida de los gases recorreremos cada una de las partes de la turbina hasta llegar a la tobera. Consideremos la siguiente figura.



La temperatura $T_1 = 310\ K$ *es la temperatura ambiente. Considerando la tabla A-21 obtenemos*

$$T_1 = 310\ K \qquad \rightarrow \qquad h_1 = 310{,}24\ kJ/kg \qquad y \qquad P_{r1} = 1.55 \tag{15}$$

Utilizando la razón entre las presiones tenemos ($P_2/P_1 = 12$)*, podemos calcular la presión relativa en 2,*

$$P_{r2} = \frac{P_2}{P_1} P_{r1} = 18.66 \tag{16}$$

Ubicando los valores más cercanos a P_{r2} *en la tabla, obtenemos la entalpía a la salida del compresor mediante interpolación,*

$$h_2 = 628.07 + \frac{638.63 - 628.07}{19.84 - 18.36}(P_{r2} - 18.36) \qquad \rightarrow \qquad h_2 = 630.21\ kJ/kg \tag{17}$$

Para determinar h_3 *debemos calcular el calor ingresado,*

$$q_{in} = \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = \frac{\dot{m}_{conbustible} \times 80000\ kJ/kg}{10\ kg/s} = 8\ MW \tag{18}$$

luego

$$q_{in} = h_3 - h_2 \qquad \rightarrow \qquad h_3 = 1430.20\ kJ/kg \tag{19}$$

Ubicando los valores más cercanos a h_3 en la tabla podemos estimar P_{r3} mediante interpolación

$$P_{r3} = 352.5 + \frac{375.3 - 352.5}{1443.6 - 1419.76}(h_3 - 1419.76) \qquad \rightarrow \qquad P_{r3} = 362.48 \tag{20}$$

Debido a que en una turbina para avión se entrega todo el trabajo de la turbina al compresor, podemos calcular h_4 mediante,

$$w_{compresor} = h_2 - h_1 = h_3 - h_4 = w_{turbina} \qquad \rightarrow \qquad h_4 = h_3 - h_2 + h_1 = 1110.2\ kJ/kg \tag{21}$$

La presión relativa a la salida de la turbina la podemos estimar mediante,

$$P_{r5} = \frac{P_5}{P_3} P_{r3} = 30.21 \tag{22}$$

y la entalpía h_5 la calculamos mediante interpolación,

$$h_5 = 713{,}27 + \frac{724.04 - 713.27}{30.38 - 28.80}(P_{r5} - 28.80) = 722.88\ kJ/kg \tag{23}$$

Finalmente, la velocidad de los gases a la salida de la tobera la podemos estimar mediante balance de energía,

$$\theta_4 = \theta_5 \quad \rightarrow \quad h_4 + \frac{V_4^2}{2} = h_5 + \frac{V_5^2}{2} \quad \rightarrow \quad V_5 = \sqrt{2(h4 - h5)} = 880.18\ m/s \tag{24}$$

donde hemos despreciado la velocidad de los gases a la salida de la turbina.

(b) (2 puntos) Determine la fuerza que ejercen los frenos sobre la pista.

La fuerza que ejercen los frenos sobre la pista es la misma fuerza que ejerce los gases sobre el motor. Esta la calculamos como

$$F = \dot{m}(V_{out} - V_{in}) = 10\ kg/s\ \times\ 880.18\ m/s = 8801.8\ N \tag{25}$$

donde $V_{in} = 0$ ya que el avión se encuentra detenido.

Desprecie el efecto del difusor, el pequeño aumento de masa debido a la quema de combustible y las ineficiencias de las componentes del motor. Considere capacidades específicas variables. Para esto recuerde que

$$P_{r1} = P_{r2}\frac{P_1}{P_2}$$

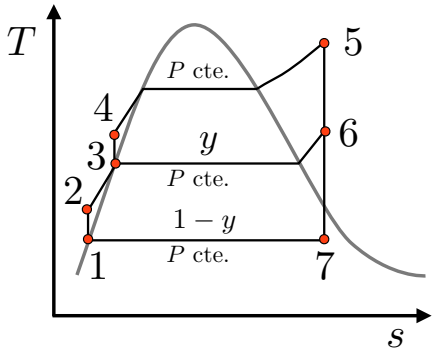
donde P_{ri} es la presión relativa y P_i la presión del gas (utilice la tabla A-21 y la ecuación de interpolación dada en el formulario).

Nombre: _____

Problema 3

Una planta eléctrica de vapor de agua opera en un ciclo de Rankine ideal regenerativo con un calentador abierto de agua. El vapor entra en la turbina a 8 MPa y 500 °C y se condensa en el condensador a 10 kPa. Parte del vapor es extraído de una turbina a 0.5 MPa para calentar el agua en el calentador abierto de agua. El agua deja el calentador como líquido saturado.

(a) (1 punto) Realice un diagrama T-s del ciclo.



(b) (1 punto) Determine los trabajos realizados por las bombas I y II.

Sabemos que

$$P_1 = P_7 = 10\ kPa \qquad P_2 = P_3 = P_6 = 0.5\ MPa \qquad P_4 = P_5 = 8\ MPa \tag{26}$$

Para estimar los trabajos realizados por las bombas notamos que

$$h_1 = H_{f@10\ kPa} = 191.81\ kJ/kg \qquad v_1 = v_{f@10\ kPa} = 0.001010\ m^3/kg \tag{27}$$

$$h_3 = H_{f@0{,}5\ MPa} = 640.09\ kJ/kg \qquad v_3 = v_{f@0{,}5\ MPa} = 0.001093\ m^3/kg \tag{28}$$

luego

$$w_{bomba,I} = v_1(P_2 - P_1) = 0.4949\ kJ/kg \tag{29}$$

$$w_{bomba,II} = v_3(P_4 - P_3) = 8.20\ kJ/kg \tag{30}$$

(c) (2 puntos) Determine la fracción y que sale de la turbina hacia el calentador abierto de agua (Hint: la cantidad y queda determinada al considerar el balance de energía para el calentador abierto de agua).

Para determinar la fracvión y consideramos el balance de energía en el calentador abierto de agua,

$$\sum \dot{m}_{out} h_{out} = \sum_{in} h_{in} \qquad \rightarrow \qquad y h_6 + (1-y) h_2 = h_3 \tag{31}$$

Por lo tanto debemos conocer h_2 y h_6. La emtalpía a la salida de la bomba I la podemos calcular mediante

$$w_{bomba,I} = h_2 - h_1 \qquad \rightarrow \qquad h_2 = h_1 + w_{bomba,I} = 192.30 \ kJ/kg \tag{32}$$

Mientras que para la entalpía h_6 notamos primero que

$$\begin{array}{c} P_5 = 8 \ MPa \\ T_5 = 500 \ ^\circ C \end{array} \quad \rightarrow \quad \begin{array}{c} h_5 = 3399.5 \ kJ/kg \\ s_5 = 6.7266 \ kJ/kg \cdot K \end{array} \tag{33}$$

y que

$$\begin{array}{c} P_6 = 8 \ MPa \\ s_6 = s_5 \end{array} \quad \rightarrow \quad \begin{array}{c} s_f = 1.8604 \ kJ/kg \cdot K \\ s_g = 6.8207 \ kJ/kg \cdot K \end{array} \tag{34}$$

Nos damos cuenta que $s_f < s_6 < s_g$, por lo tanto el agua se encuentra en la región de mezcla líquido-vapor. La calidad y entalpía la calculamos entonces como,

$$x_6 = \frac{s_6 - s_f}{s_{fg}} = 98.1\,\% \tag{35}$$

$$h_6 = h_f + x_6 h_{fg} = 640.09 + 0.981 \times 2108.0 = 2708.1 \ kJ/kg \tag{36}$$

Entonces la fracción y es

$$y = \frac{h_3 - h_2}{h_6 - h_2} = 0.178 \tag{37}$$

(d) (1 punto) Determine el trabajo neto de salida.

El trabajo neto de salida lo calculamos como,

$$w_{neto} = q_{in} + q_{out} \tag{38}$$

$$q_{in} = h_5 - h_4 = 2751.2 \ kJ/kg \tag{39}$$

$$q_{out} = (1-y)(h_1 - h_7) \tag{40}$$

Para calcular h_7 consideramos que

$$\begin{array}{c} P_7 = 10 \ kPa \\ s_7 = s_5 \end{array} \quad \rightarrow \quad \begin{array}{c} s_f = 0.6492 \ kJ/kg \cdot K \\ s_g = 8.1488 \ kJ/kg \cdot K \end{array} \tag{41}$$

Como es de esperar, el agua se encuentra en la región de mezcla líquido-vapor saturado, luego

$$x_7 = \frac{s_7 - s_f}{s_{fg}} = 81.04\,\% \tag{42}$$

$$h_7 = h_f + x_7 h_{fg} = 191.81 + 0.81 \times 2392{,}1 = 2130.4\ kJ/kg \tag{43}$$

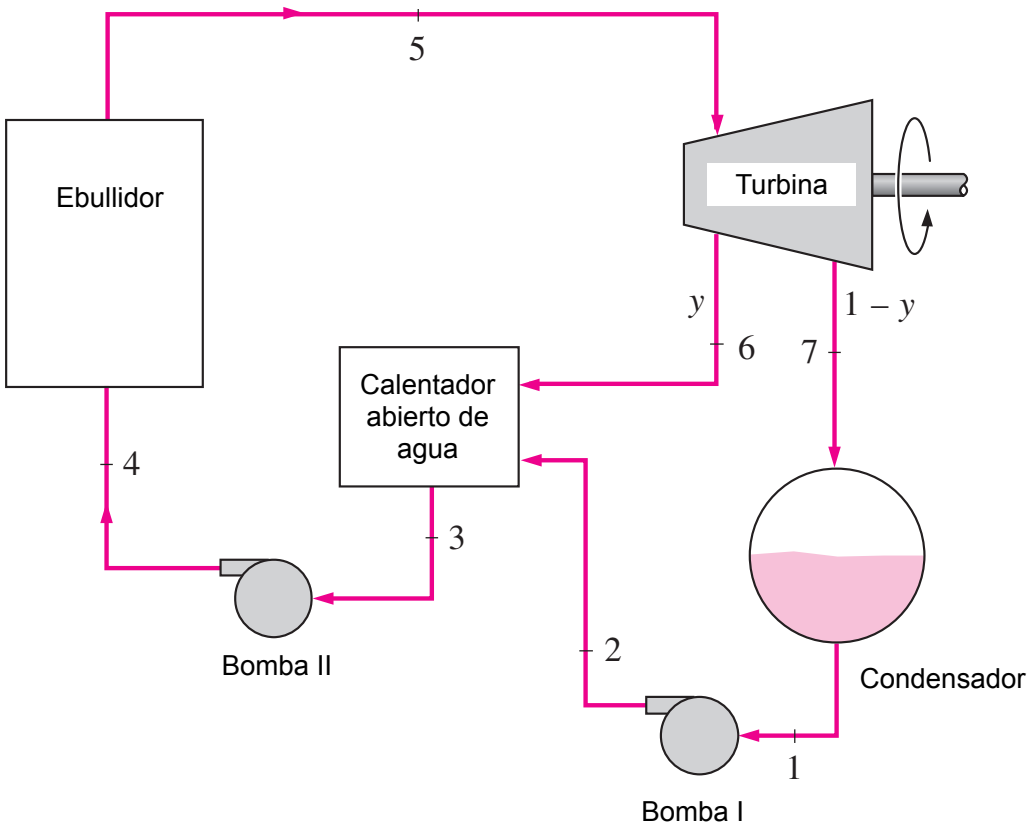
Luego,

$$q_{out} = -1593.5\ kJ/kg \qquad \rightarrow \qquad w_{neto} = 1157.7\ kJ/kg \tag{44}$$

(e) (1 punto) Determine la eficiencia térmica del ciclo.

Finalmente, la eficiencia térmica es

$$\eta_t = 1 + \frac{q_{out}}{q_{in}} = 42.1\,\% \tag{45}$$



FIS1523 - Interrogación No. 3

FACULTAD DE FÍSICA - Pontificia Universidad Católica de Chile

Primer Semestre 2013

Fórmulas

- Balance de energía para sistemas cerrados: $\Delta U = Q - W$
- Balance de energía para sistemas abiertos ($\theta = h + \frac{V^2}{2} + gz$):

$$\dot{Q} - \dot{W}_{otros} = \frac{d}{dt}\int_{V_C} \rho e dV + \sum \dot{m}_{out}\theta_{out} - \sum \dot{m}_{in}\theta_{in}$$

- Balance de masa para sistemas abiertos: $\sum \dot{m}_{in} - \sum \dot{m}_{out} = \frac{dm_{V_C}}{dt}$
- Proceso isoentrópico: $Pv^k = cte.$ $\quad TP^{(1-k)/k} = cte.$ $\quad Tv^{k-1} = cte.$
- Presión relativa: $P_r = \exp(s^0/R)$, $P_{r1}/P_{r2} = P_1/P_2$
- Primera (segunda) ecuación de Gibbs: $Tds = du + Pdv$, $(Tds = dh - vdP)$
- Eficiencia isoentrópica compresor (turbina): $\eta_C = \frac{w_{iso}}{w_{real}}$, $(\eta_T = \frac{w_{real}}{w_{iso}})$
- Eficiencia térmica Carnot: $\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_C}{T_H}$
- Razón de compresión: $r = v_{max}/v_{min}$
- Presón media efectiva: $PME = W_{neto}/(V_{max} - V_{min})$
- Eficiencia térmica Otto: $\eta_{Otto} = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$
- Eficiencia térmica Brayton ideal: $\eta_{Brayton\ ideal} = 1 - \frac{1}{r_P^{(k-1)/k}}$
- Relación acoplamiento turbina-compresor: $r_{bw} = w_{compresor}/w_{turbina}$
- Eficiencia de regeneración: $\varepsilon = q_{reg}/q_{reg,max}$
- Presión óptima recalentamiento intermedio: $P_x = \sqrt{P_1 P_2}$
- Fuerza sobre turbina: $F = \dot{m}(V_{out} - V_{in})$
- Eficiencia propulsión: $\eta_P = \dot{W}_P/\dot{Q}_{in}$
- Rankine con recalentamiento, calor ingresado: $q_{in} = q_{in,0} + q_{recal}$
- Rankine con recalentamiento, trabajo: $w_{turbina} = w_{turbina,I} + w_{turbina,II}$
- Rankine con regeneración, trabajo turbina: $w_{turbina} = h_5 - h_6 + (1-y)(h_6 - h_7)$
- Rankine con regeneración, trabajo bomba: $w_{bomba} = (1-y)w_{bomba,I} + w_{bomba,I}$
- Interpolación: $y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}(x - x_1)$

TABLE A–21

Ideal-gas properties of air

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
200	199.97	0.3363	142.56	1707.0	1.29559	580	586.04	14.38	419.55	115.7	2.37348
210	209.97	0.3987	149.69	1512.0	1.34444	590	596.52	15.31	427.15	110.6	2.39140
220	219.97	0.4690	156.82	1346.0	1.39105	600	607.02	16.28	434.78	105.8	2.40902
230	230.02	0.5477	164.00	1205.0	1.43557	610	617.53	17.30	442.42	101.2	2.42644
240	240.02	0.6355	171.13	1084.0	1.47824	620	628.07	18.36	450.09	96.92	2.44356
250	250.05	0.7329	178.28	979.0	1.51917	630	638.63	19.84	457.78	92.84	2.46048
260	260.09	0.8405	185.45	887.8	1.55848	640	649.22	20.64	465.50	88.99	2.47716
270	270.11	0.9590	192.60	808.0	1.59634	650	659.84	21.86	473.25	85.34	2.49364
280	280.13	1.0889	199.75	738.0	1.63279	660	670.47	23.13	481.01	81.89	2.50985
285	285.14	1.1584	203.33	706.1	1.65055	670	681.14	24.46	488.81	78.61	2.52589
290	290.16	1.2311	206.91	676.1	1.66802	680	691.82	25.85	496.62	75.50	2.54175
295	295.17	1.3068	210.49	647.9	1.68515	690	702.52	27.29	504.45	72.56	2.55731
298	298.18	1.3543	212.64	631.9	1.69528	700	713.27	28.80	512.33	69.76	2.57277
300	300.19	1.3860	214.07	621.2	1.70203	710	724.04	30.38	520.23	67.07	2.58810
305	305.22	1.4686	217.67	596.0	1.71865	720	734.82	32.02	528.14	64.53	2.60319
310	310.24	1.5546	221.25	572.3	1.73498	730	745.62	33.72	536.07	62.13	2.61803
315	315.27	1.6442	224.85	549.8	1.75106	740	756.44	35.50	544.02	59.82	2.63280
320	320.29	1.7375	228.42	528.6	1.76690	750	767.29	37.35	551.99	57.63	2.64737
325	325.31	1.8345	232.02	508.4	1.78249	760	778.18	39.27	560.01	55.54	2.66176
330	330.34	1.9352	235.61	489.4	1.79783	780	800.03	43.35	576.12	51.64	2.69013
340	340.42	2.149	242.82	454.1	1.82790	800	821.95	47.75	592.30	48.08	2.71787
350	350.49	2.379	250.02	422.2	1.85708	820	843.98	52.59	608.59	44.84	2.74504
360	360.58	2.626	257.24	393.4	1.88543	840	866.08	57.60	624.95	41.85	2.77170
370	370.67	2.892	264.46	367.2	1.91313	860	888.27	63.09	641.40	39.12	2.79783
380	380.77	3.176	271.69	343.4	1.94001	880	910.56	68.98	657.95	36.61	2.82344
390	390.88	3.481	278.93	321.5	1.96633	900	932.93	75.29	674.58	34.31	2.84856
400	400.98	3.806	286.16	301.6	1.99194	920	955.38	82.05	691.28	32.18	2.87324
410	411.12	4.153	293.43	283.3	2.01699	940	977.92	89.28	708.08	30.22	2.89748
420	421.26	4.522	300.69	266.6	2.04142	960	1000.55	97.00	725.02	28.40	2.92128
430	431.43	4.915	307.99	251.1	2.06533	980	1023.25	105.2	741.98	26.73	2.94468
440	441.61	5.332	315.30	236.8	2.08870	1000	1046.04	114.0	758.94	25.17	2.96770
450	451.80	5.775	322.62	223.6	2.11161	1020	1068.89	123.4	776.10	23.72	2.99034
460	462.02	6.245	329.97	211.4	2.13407	1040	1091.85	133.3	793.36	23.29	3.01260
470	472.24	6.742	337.32	200.1	2.15604	1060	1114.86	143.9	810.62	21.14	3.03449
480	482.49	7.268	344.70	189.5	2.17760	1080	1137.89	155.2	827.88	19.98	3.05608
490	492.74	7.824	352.08	179.7	2.19876	1100	1161.07	167.1	845.33	18.896	3.07732
500	503.02	8.411	359.49	170.6	2.21952	1120	1184.28	179.7	862.79	17.886	3.09825
510	513.32	9.031	366.92	162.1	2.23993	1140	1207.57	193.1	880.35	16.946	3.11883
520	523.63	9.684	374.36	154.1	2.25997	1160	1230.92	207.2	897.91	16.064	3.13916
530	533.98	10.37	381.84	146.7	2.27967	1180	1254.34	222.2	915.57	15.241	3.15916
540	544.35	11.10	389.34	139.7	2.29906	1200	1277.79	238.0	933.33	14.470	3.17888
550	555.74	11.86	396.86	133.1	2.31809	1220	1301.31	254.7	951.09	13.747	3.19834
560	565.17	12.66	404.42	127.0	2.33685	1240	1324.93	272.3	968.95	13.069	3.21751
570	575.59	13.50	411.97	121.2	2.35531						

(Continued)

TABLE A–21

Ideal-gas properties of air (*Concluded*)

T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K	T K	h kJ/kg	P_r	u kJ/kg	v_r	s° kJ/kg · K
1260	1348.55	290.8	986.90	12.435	3.23638	1600	1757.57	791.2	1298.30	5.804	3.52364
1280	1372.24	310.4	1004.76	11.835	3.25510	1620	1782.00	834.1	1316.96	5.574	3.53879
1300	1395.97	330.9	1022.82	11.275	3.27345	1640	1806.46	878.9	1335.72	5.355	3.55381
1320	1419.76	352.5	1040.88	10.747	3.29160	1660	1830.96	925.6	1354.48	5.147	3.56867
1340	1443.60	375.3	1058.94	10.247	3.30959	1680	1855.50	974.2	1373.24	4.949	3.58335
1360	1467.49	399.1	1077.10	9.780	3.32724	1700	1880.1	1025	1392.7	4.761	3.5979
1380	1491.44	424.2	1095.26	9.337	3.34474	1750	1941.6	1161	1439.8	4.328	3.6336
1400	1515.42	450.5	1113.52	8.919	3.36200	1800	2003.3	1310	1487.2	3.994	3.6684
1420	1539.44	478.0	1131.77	8.526	3.37901	1850	2065.3	1475	1534.9	3.601	3.7023
1440	1563.51	506.9	1150.13	8.153	3.39586	1900	2127.4	1655	1582.6	3.295	3.7354
1460	1587.63	537.1	1168.49	7.801	3.41247	1950	2189.7	1852	1630.6	3.022	3.7677
1480	1611.79	568.8	1186.95	7.468	3.42892	2000	2252.1	2068	1678.7	2.776	3.7994
1500	1635.97	601.9	1205.41	7.152	3.44516	2050	2314.6	2303	1726.8	2.555	3.8303
1520	1660.23	636.5	1223.87	6.854	3.46120	2100	2377.7	2559	1775.3	2.356	3.8605
1540	1684.51	672.8	1242.43	6.569	3.47712	2150	2440.3	2837	1823.8	2.175	3.8901
1560	1708.82	710.5	1260.99	6.301	3.49276	2200	2503.2	3138	1872.4	2.012	3.9191
1580	1733.17	750.0	1279.65	6.046	3.50829	2250	2566.4	3464	1921.3	1.864	3.9474

Note: The properties P_r (relative pressure) and v_r (relative specific volume) are dimensionless quantities used in the analysis of isentropic processes, and should not be confused with the properties pressure and specific volume.

Source: Kenneth Wark, *Thermodynamics,* 4th ed. (New York: McGraw-Hill, 1983), pp. 785–86, table A–5. Originally published in J. H. Keenan and J. Kaye, *Gas Tables* (New York: John Wiley & Sons, 1948).

TABLE A–5

Saturated water—Pressure table

		Specific volume, m^3/kg		Internal energy, kJ/kg			Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg · K		
Press., P kPa	Sat. temp., T_{sat} °C	Sat. liquid, v_f	Sat. vapor, v_g	Sat. liquid, u_f	Evap., u_{fg}	Sat. vapor, u_g	Sat. liquid, h_f	Evap., h_{fg}	Sat. vapor, h_g	Sat. liquid, s_f	Evap., s_{fg}	Sat. vapor, s_g
1.0	6.97	0.001000	129.19	29.302	2355.2	2384.5	29.303	2484.4	2513.7	0.1059	8.8690	8.9749
1.5	13.02	0.001001	87.964	54.686	2338.1	2392.8	54.688	2470.1	2524.7	0.1956	8.6314	8.8270
2.0	17.50	0.001001	66.990	73.431	2325.5	2398.9	73.433	2459.5	2532.9	0.2606	8.4621	8.7227
2.5	21.08	0.001002	54.242	88.422	2315.4	2403.8	88.424	2451.0	2539.4	0.3118	8.3302	8.6421
3.0	24.08	0.001003	45.654	100.98	2306.9	2407.9	100.98	2443.9	2544.8	0.3543	8.2222	8.5765
4.0	28.96	0.001004	34.791	121.39	2293.1	2414.5	121.39	2432.3	2553.7	0.4224	8.0510	8.4734
5.0	32.87	0.001005	28.185	137.75	2282.1	2419.8	137.75	2423.0	2560.7	0.4762	7.9176	8.3938
7.5	40.29	0.001008	19.233	168.74	2261.1	2429.8	168.75	2405.3	2574.0	0.5763	7.6738	8.2501
10	45.81	0.001010	14.670	191.79	2245.4	2437.2	191.81	2392.1	2583.9	0.6492	7.4996	8.1488
15	53.97	0.001014	10.020	225.93	2222.1	2448.0	225.94	2372.3	2598.3	0.7549	7.2522	8.0071
20	60.06	0.001017	7.6481	251.40	2204.6	2456.0	251.42	2357.5	2608.9	0.8320	7.0752	7.9073
25	64.96	0.001020	6.2034	271.93	2190.4	2462.4	271.96	2345.5	2617.5	0.8932	6.9370	7.8302
30	69.09	0.001022	5.2287	289.24	2178.5	2467.7	289.27	2335.3	2624.6	0.9441	6.8234	7.7675
40	75.86	0.001026	3.9933	317.58	2158.8	2476.3	317.62	2318.4	2636.1	1.0261	6.6430	7.6691
50	81.32	0.001030	3.2403	340.49	2142.7	2483.2	340.54	2304.7	2645.2	1.0912	6.5019	7.5931
75	91.76	0.001037	2.2172	384.36	2111.8	2496.1	384.44	2278.0	2662.4	1.2132	6.2426	7.4558
100	99.61	0.001043	1.6941	417.40	2088.2	2505.6	417.51	2257.5	2675.0	1.3028	6.0562	7.3589
101.325	99.97	0.001043	1.6734	418.95	2087.0	2506.0	419.06	2256.5	2675.6	1.3069	6.0476	7.3545
125	105.97	0.001048	1.3750	444.23	2068.8	2513.0	444.36	2240.6	2684.9	1.3741	5.9100	7.2841
150	111.35	0.001053	1.1594	466.97	2052.3	2519.2	467.13	2226.0	2693.1	1.4337	5.7894	7.2231
175	116.04	0.001057	1.0037	486.82	2037.7	2524.5	487.01	2213.1	2700.2	1.4850	5.6865	7.1716
200	120.21	0.001061	0.88578	504.50	2024.6	2529.1	504.71	2201.6	2706.3	1.5302	5.5968	7.1270
225	123.97	0.001064	0.79329	520.47	2012.7	2533.2	520.71	2191.0	2711.7	1.5706	5.5171	7.0877
250	127.41	0.001067	0.71873	535.08	2001.8	2536.8	535.35	2181.2	2716.5	1.6072	5.4453	7.0525
275	130.58	0.001070	0.65732	548.57	1991.6	2540.1	548.86	2172.0	2720.9	1.6408	5.3800	7.0207
300	133.52	0.001073	0.60582	561.11	1982.1	2543.2	561.43	2163.5	2724.9	1.6717	5.3200	6.9917
325	136.27	0.001076	0.56199	572.84	1973.1	2545.9	573.19	2155.4	2728.6	1.7005	5.2645	6.9650
350	138.86	0.001079	0.52422	583.89	1964.6	2548.5	584.26	2147.7	2732.0	1.7274	5.2128	6.9402
375	141.30	0.001081	0.49133	594.32	1956.6	2550.9	594.73	2140.4	2735.1	1.7526	5.1645	6.9171
400	143.61	0.001084	0.46242	604.22	1948.9	2553.1	604.66	2133.4	2738.1	1.7765	5.1191	6.8955
450	147.90	0.001088	0.41392	622.65	1934.5	2557.1	623.14	2120.3	2743.4	1.8205	5.0356	6.8561
500	151.83	0.001093	0.37483	639.54	1921.2	2560.7	640.09	2108.0	2748.1	1.8604	4.9603	6.8207
550	155.46	0.001097	0.34261	655.16	1908.8	2563.9	655.77	2096.6	2752.4	1.8970	4.8916	6.7886
600	158.83	0.001101	0.31560	669.72	1897.1	2566.8	670.38	2085.8	2756.2	1.9308	4.8285	6.7593
650	161.98	0.001104	0.29260	683.37	1886.1	2569.4	684.08	2075.5	2759.6	1.9623	4.7699	6.7322
700	164.95	0.001108	0.27278	696.23	1875.6	2571.8	697.00	2065.8	2762.8	1.9918	4.7153	6.7071
750	167.75	0.001111	0.25552	708.40	1865.6	2574.0	709.24	2056.4	2765.7	2.0195	4.6642	6.6837

(Continued)

TABLE A–6

Superheated water

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
	P = 0.01 MPa (45.81°C)*				P = 0.05 MPa (81.32°C)				P = 0.10 MPa (99.61°C)			
Sat.†	14.670	2437.2	2583.9	8.1488	3.2403	2483.2	2645.2	7.5931	1.6941	2505.6	2675.0	7.3589
50	14.867	2443.3	2592.0	8.1741								
100	17.196	2515.5	2687.5	8.4489	3.4187	2511.5	2682.4	7.6953	1.6959	2506.2	2675.8	7.3611
150	19.513	2587.9	2783.0	8.6893	3.8897	2585.7	2780.2	7.9413	1.9367	2582.9	2776.6	7.6148
200	21.826	2661.4	2879.6	8.9049	4.3562	2660.0	2877.8	8.1592	2.1724	2658.2	2875.5	7.8356
250	24.136	2736.1	2977.5	9.1015	4.8206	2735.1	2976.2	8.3568	2.4062	2733.9	2974.5	8.0346
300	26.446	2812.3	3076.7	9.2827	5.2841	2811.6	3075.8	8.5387	2.6389	2810.7	3074.5	8.2172
400	31.063	2969.3	3280.0	9.6094	6.2094	2968.9	3279.3	8.8659	3.1027	2968.3	3278.6	8.5452
500	35.680	3132.9	3489.7	9.8998	7.1338	3132.6	3489.3	9.1566	3.5655	3132.2	3488.7	8.8362
600	40.296	3303.3	3706.3	10.1631	8.0577	3303.1	3706.0	9.4201	4.0279	3302.8	3705.6	9.0999
700	44.911	3480.8	3929.9	10.4056	8.9813	3480.6	3929.7	9.6626	4.4900	3480.4	3929.4	9.3424
800	49.527	3665.4	4160.6	10.6312	9.9047	3665.2	4160.4	9.8883	4.9519	3665.0	4160.2	9.5682
900	54.143	3856.9	4398.3	10.8429	10.8280	3856.8	4398.2	10.1000	5.4137	3856.7	4398.0	9.7800
1000	58.758	4055.3	4642.8	11.0429	11.7513	4055.2	4642.7	10.3000	5.8755	4055.0	4642.6	9.9800
1100	63.373	4260.0	4893.8	11.2326	12.6745	4259.9	4893.7	10.4897	6.3372	4259.8	4893.6	10.1698
1200	67.989	4470.9	5150.8	11.4132	13.5977	4470.8	5150.7	10.6704	6.7988	4470.7	5150.6	10.3504
1300	72.604	4687.4	5413.4	11.5857	14.5209	4687.3	5413.3	10.8429	7.2605	4687.2	5413.3	10.5229
	P = 0.20 MPa (120.21°C)				P = 0.30 MPa (133.52°C)				P = 0.40 MPa (143.61°C)			
Sat.	0.88578	2529.1	2706.3	7.1270	0.60582	2543.2	2724.9	6.9917	0.46242	2553.1	2738.1	6.8955
150	0.95986	2577.1	2769.1	7.2810	0.63402	2571.0	2761.2	7.0792	0.47088	2564.4	2752.8	6.9306
200	1.08049	2654.6	2870.7	7.5081	0.71643	2651.0	2865.9	7.3132	0.53434	2647.2	2860.9	7.1723
250	1.19890	2731.4	2971.2	7.7100	0.79645	2728.9	2967.9	7.5180	0.59520	2726.4	2964.5	7.3804
300	1.31623	2808.8	3072.1	7.8941	0.87535	2807.0	3069.6	7.7037	0.65489	2805.1	3067.1	7.5677
400	1.54934	2967.2	3277.0	8.2236	1.03155	2966.0	3275.5	8.0347	0.77265	2964.9	3273.9	7.9003
500	1.78142	3131.4	3487.7	8.5153	1.18672	3130.6	3486.6	8.3271	0.88936	3129.8	3485.5	8.1933
600	2.01302	3302.2	3704.8	8.7793	1.34139	3301.6	3704.0	8.5915	1.00558	3301.0	3703.3	8.4580
700	2.24434	3479.9	3928.8	9.0221	1.49580	3479.5	3928.2	8.8345	1.12152	3479.0	3927.6	8.7012
800	2.47550	3664.7	4159.8	9.2479	1.65004	3664.3	4159.3	9.0605	1.23730	3663.9	4158.9	8.9274
900	2.70656	3856.3	4397.7	9.4598	1.80417	3856.0	4397.3	9.2725	1.35298	3855.7	4396.9	9.1394
1000	2.93755	4054.8	4642.3	9.6599	1.95824	4054.5	4642.0	9.4726	1.46859	4054.3	4641.7	9.3396
1100	3.16848	4259.6	4893.3	9.8497	2.11226	4259.4	4893.1	9.6624	1.58414	4259.2	4892.9	9.5295
1200	3.39938	4470.5	5150.4	10.0304	2.26624	4470.3	5150.2	9.8431	1.69966	4470.2	5150.0	9.7102
1300	3.63026	4687.1	5413.1	10.2029	2.42019	4686.9	5413.0	10.0157	1.81516	4686.7	5412.8	9.8828
	P = 0.50 MPa (151.83°C)				P = 0.60 MPa (158.83°C)				P = 0.80 MPa (170.41°C)			
Sat.	0.37483	2560.7	2748.1	6.8207	0.31560	2566.8	2756.2	6.7593	0.24035	2576.0	2768.3	6.6616
200	0.42503	2643.3	2855.8	7.0610	0.35212	2639.4	2850.6	6.9683	0.26088	2631.1	2839.8	6.8177
250	0.47443	2723.8	2961.0	7.2725	0.39390	2721.2	2957.6	7.1833	0.29321	2715.9	2950.4	7.0402
300	0.52261	2803.3	3064.6	7.4614	0.43442	2801.4	3062.0	7.3740	0.32416	2797.5	3056.9	7.2345
350	0.57015	2883.0	3168.1	7.6346	0.47428	2881.6	3166.1	7.5481	0.35442	2878.6	3162.2	7.4107
400	0.61731	2963.7	3272.4	7.7956	0.51374	2962.5	3270.8	7.7097	0.38429	2960.2	3267.7	7.5735
500	0.71095	3129.0	3484.5	8.0893	0.59200	3128.2	3483.4	8.0041	0.44332	3126.6	3481.3	7.8692
600	0.80409	3300.4	3702.5	8.3544	0.66976	3299.8	3701.7	8.2695	0.50186	3298.7	3700.1	8.1354
700	0.89696	3478.6	3927.0	8.5978	0.74725	3478.1	3926.4	8.5132	0.56011	3477.2	3925.3	8.3794
800	0.98966	3663.6	4158.4	8.8240	0.82457	3663.2	4157.9	8.7395	0.61820	3662.5	4157.0	8.6061
900	1.08227	3855.4	4396.6	9.0362	0.90179	3855.1	4396.2	8.9518	0.67619	3854.5	4395.5	8.8185
1000	1.17480	4054.0	4641.4	9.2364	0.97893	4053.8	4641.1	9.1521	0.73411	4053.3	4640.5	9.0189
1100	1.26728	4259.0	4892.6	9.4263	1.05603	4258.8	4892.4	9.3420	0.79197	4258.3	4891.9	9.2090
1200	1.35972	4470.0	5149.8	9.6071	1.13309	4469.8	5149.6	9.5229	0.84980	4469.4	5149.3	9.3898
1300	1.45214	4686.6	5412.6	9.7797	1.21012	4686.4	5412.5	9.6955	0.90761	4686.1	5412.2	9.5625

*The temperature in parentheses is the saturation temperature at the specified pressure.

† Properties of saturated vapor at the specified pressure.

TABLE A–6

Superheated water (*Continued*)

T °C	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m³/kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
	P = 4.0 MPa (250.35°C)				P = 4.5 MPa (257.44°C)				P = 5.0 MPa (263.94°C)			
Sat.	0.04978	2601.7	2800.8	6.0696	0.04406	2599.7	2798.0	6.0198	0.03945	2597.0	2794.2	5.9737
275	0.05461	2668.9	2887.3	6.2312	0.04733	2651.4	2864.4	6.1429	0.04144	2632.3	2839.5	6.0571
300	0.05887	2726.2	2961.7	6.3639	0.05138	2713.0	2944.2	6.2854	0.04535	2699.0	2925.7	6.2111
350	0.06647	2827.4	3093.3	6.5843	0.05842	2818.6	3081.5	6.5153	0.05197	2809.5	3069.3	6.4516
400	0.07343	2920.8	3214.5	6.7714	0.06477	2914.2	3205.7	6.7071	0.05784	2907.5	3196.7	6.6483
450	0.08004	3011.0	3331.2	6.9386	0.07076	3005.8	3324.2	6.8770	0.06332	3000.6	3317.2	6.8210
500	0.08644	3100.3	3446.0	7.0922	0.07652	3096.0	3440.4	7.0323	0.06858	3091.8	3434.7	6.9781
600	0.09886	3279.4	3674.9	7.3706	0.08766	3276.4	3670.9	7.3127	0.07870	3273.3	3666.9	7.2605
700	0.11098	3462.4	3906.3	7.6214	0.09850	3460.0	3903.3	7.5647	0.08852	3457.7	3900.3	7.5136
800	0.12292	3650.6	4142.3	7.8523	0.10916	3648.8	4140.0	7.7962	0.09816	3646.9	4137.7	7.7458
900	0.13476	3844.8	4383.9	8.0675	0.11972	3843.3	4382.1	8.0118	0.10769	3841.8	4380.2	7.9619
1000	0.14653	4045.1	4631.2	8.2698	0.13020	4043.9	4629.8	8.2144	0.11715	4042.6	4628.3	8.1648
1100	0.15824	4251.4	4884.4	8.4612	0.14064	4250.4	4883.2	8.4060	0.12655	4249.3	4882.1	8.3566
1200	0.16992	4463.5	5143.2	8.6430	0.15103	4462.6	5142.2	8.5880	0.13592	4461.6	5141.3	8.5388
1300	0.18157	4680.9	5407.2	8.8164	0.16140	4680.1	5406.5	8.7616	0.14527	4679.3	5405.7	8.7124
	P = 6.0 MPa (275.59°C)				P = 7.0 MPa (285.83°C)				P = 8.0 MPa (295.01°C)			
Sat.	0.03245	2589.9	2784.6	5.8902	0.027378	2581.0	2772.6	5.8148	0.023525	2570.5	2758.7	5.7450
300	0.03619	2668.4	2885.6	6.0703	0.029492	2633.5	2839.9	5.9337	0.024279	2592.3	2786.5	5.7937
350	0.04225	2790.4	3043.9	6.3357	0.035262	2770.1	3016.9	6.2305	0.029975	2748.3	2988.1	6.1321
400	0.04742	2893.7	3178.3	6.5432	0.039958	2879.5	3159.2	6.4502	0.034344	2864.6	3139.4	6.3658
450	0.05217	2989.9	3302.9	6.7219	0.044187	2979.0	3288.3	6.6353	0.038194	2967.8	3273.3	6.5579
500	0.05667	3083.1	3423.1	6.8826	0.048157	3074.3	3411.4	6.8000	0.041767	3065.4	3399.5	6.7266
550	0.06102	3175.2	3541.3	7.0308	0.051966	3167.9	3531.6	6.9507	0.045172	3160.5	3521.8	6.8800
600	0.06527	3267.2	3658.8	7.1693	0.055665	3261.0	3650.6	7.0910	0.048463	3254.7	3642.4	7.0221
700	0.07355	3453.0	3894.3	7.4247	0.062850	3448.3	3888.3	7.3487	0.054829	3443.6	3882.2	7.2822
800	0.08165	3643.2	4133.1	7.6582	0.069856	3639.5	4128.5	7.5836	0.061011	3635.7	4123.8	7.5185
900	0.08964	3838.8	4376.6	7.8751	0.076750	3835.7	4373.0	7.8014	0.067082	3832.7	4369.3	7.7372
1000	0.09756	4040.1	4625.4	8.0786	0.083571	4037.5	4622.5	8.0055	0.073079	4035.0	4619.6	7.9419
1100	0.10543	4247.1	4879.7	8.2709	0.090341	4245.0	4877.4	8.1982	0.079025	4242.8	4875.0	8.1350
1200	0.11326	4459.8	5139.4	8.4534	0.097075	4457.9	5137.4	8.3810	0.084934	4456.1	5135.5	8.3181
1300	0.12107	4677.7	5404.1	8.6273	0.103781	4676.1	5402.6	8.5551	0.090817	4674.5	5401.0	8.4925
	P = 9.0 MPa (303.35°C)				P = 10.0 MPa (311.00°C)				P = 12.5 MPa (327.81°C)			
Sat.	0.020489	2558.5	2742.9	5.6791	0.018028	2545.2	2725.5	5.6159	0.013496	2505.6	2674.3	5.4638
325	0.023284	2647.6	2857.1	5.8738	0.019877	2611.6	2810.3	5.7596				
350	0.025816	2725.0	2957.3	6.0380	0.022440	2699.6	2924.0	5.9460	0.016138	2624.9	2826.6	5.7130
400	0.029960	2849.2	3118.8	6.2876	0.026436	2833.1	3097.5	6.2141	0.020030	2789.6	3040.0	6.0433
450	0.033524	2956.3	3258.0	6.4872	0.029782	2944.5	3242.4	6.4219	0.023019	2913.7	3201.5	6.2749
500	0.036793	3056.3	3387.4	6.6603	0.032811	3047.0	3375.1	6.5995	0.025630	3023.2	3343.6	6.4651
550	0.039885	3153.0	3512.0	6.8164	0.035655	3145.4	3502.0	6.7585	0.028033	3126.1	3476.5	6.6317
600	0.042861	3248.4	3634.1	6.9605	0.038378	3242.0	3625.8	6.9045	0.030306	3225.8	3604.6	6.7828
650	0.045755	3343.4	3755.2	7.0954	0.041018	3338.0	3748.1	7.0408	0.032491	3324.1	3730.2	6.9227
700	0.048589	3438.8	3876.1	7.2229	0.043597	3434.0	3870.0	7.1693	0.034612	3422.0	3854.6	7.0540
800	0.054132	3632.0	4119.2	7.4606	0.048629	3628.2	4114.5	7.4085	0.038724	3618.8	4102.8	7.2967
900	0.059562	3829.6	4365.7	7.6802	0.053547	3826.5	4362.0	7.6290	0.042720	3818.9	4352.9	7.5195
1000	0.064919	4032.4	4616.7	7.8855	0.058391	4029.9	4613.8	7.8349	0.046641	4023.5	4606.5	7.7269
1100	0.070224	4240.7	4872.7	8.0791	0.063183	4238.5	4870.3	8.0289	0.050510	4233.1	4864.5	7.9220
1200	0.075492	4454.2	5133.6	8.2625	0.067938	4452.4	5131.7	8.2126	0.054342	4447.7	5127.0	8.1065
1300	0.080733	4672.9	5399.5	8.4371	0.072667	4671.3	5398.0	8.3874	0.058147	4667.3	5394.1	8.2819