

# PROFIL KETINGGIAN SEBENARNYA LAPISAN IONOSFER TERHADAP FREKUENSI

Slamet Syamsudin

*Pusat Pemanfaatan Sains Antariksa Lapan  
Jl. Dr Junjuran No. 133 , Bandung*

## Abstrak

Sistem analisis ionogram untuk memperoleh ketinggian sebenarnya lapisan ionosfer telah dibahas dengan menggunakan kombinasi metode Budden dan Hojo. Dalam menghitung elemen matrik konversi di ikuti oleh versi Hojo yang lebih sederhana yaitu dengan memakai indeks bias fasa. Sedangkan dalam menghitung integrasi diikuti oleh versi Budden dengan menggunakan metoda Gauss, karena dalam segi komputasi lebih menguntungkan. Interpolasi yang digunakan pada ionogram Sumedang adalah spline kubik.

Kata kunci : Ketinggian semu ( $h'$ ), ketinggian sebenarnya ( $z$ ) dan kurva kubik

## Abstract

Ionogram analyses system for obtaining the true height of ionosphere layer has been studied by using combination method from Budden and Hojo version. In calculating of conversion matrix element is followed by Hojo's version which is simpler, it is wearing faze refractive index, while in calculating the integration is followed by Budden's version by using Gauss method, because in computing side is more beneficial. Interpolation, which is used at ionogram data from Sumedang, is cubic spline

Key word : Virtual height ( $h'$ ), true height ( $z$ ) and cubic spline

## 1. Pendahuluan

Menentukan ketinggian sebenarnya lapisan ionosfer dapat dilakukan dengan roket atau satelit. Untuk daerah dibawah ketinggian kerapatan elektron maksimal dapat juga ditentukan dengan menggunakan data dari ionogram. Ionogram adalah kurva yang menggambarkan hubungan antara ketinggian semu lapisan ionosfer dan frekuensi plasma yang diperoleh dari pengamatan menggunakan peralatan ionosonde. Dari peralatan ini dipancarkan gelombang radio dengan arah vertikal dan menerima kembali gelombang radio yang dipantulkan oleh lapisan ionosfer. Frekuensi gelombang radio tersebut selama pancaran berubah secara kontinu dari 1 Mhz sampai 20 Mhz . Yang diamati oleh peralatan ini adalah selang waktu pemancaran dan saat penerimaan kembali gelombang radio tersebut pada frekuensi tertentu dengan asumsi bahwa gelombang radio menjalar dengan kecepatan tetap yaitu kecepatan cahaya pada ruang hampa. Dan selang waktu yang diamati dapat ditentukan ketinggian semu pada saat terjadi pemantulan kembali. Jadi dapat dilihat bahwa ionogram adalah jejak atau trace yang menyatakan hubungan antara ketinggian semu sebagai fungsi frekuensi. Bentuk ionogram yang diperoleh dari

peralatan ionosonde ditunjukkan dalam bentuk kurva tergantung dari intensitas energi matahari.

Pada saat terjadi ledakan matahari yang ditandai oleh kejadian solar flare maka intensitas energi matahari yang datang di bumi akan bertambah sehingga kerapatan elektron di ionosfer juga turut bertambah. Tetapi peristiwa ini hanya dialami oleh belahan bumi yang mendapat cahaya matahari atau tepatnya pada siang hari. Oleh karena pembacaan *ionogram* yang didapat adalah ketinggian semu, maka ketinggian sebenarnya diperoleh dengan penggunaan perumusan matematik metode spline kubik dengan menggunakan data frekuensi dan ketinggian semu dari *ionogram*. Hasilnya merupakan profil frekuensi terhadap ketinggian sebenarnya lapisan ionosfer.

## 2. Metodologi

Berdasarkan teori magneto-ionic, indeks bias fasa ionosfer untuk gelombang ordiner dinyatakan oleh persamaan Appleton-Hartree yaitu

$$\mu' = \sqrt{1 - \frac{X}{1 - \frac{Y_L^2}{1-X} + \left(\frac{Y_T^4}{4(1-X)^2 + Y_T^2}\right)^{\frac{1}{2}}}} \quad \dots \quad (2-1)$$

Dengan

$$X = \frac{f_p^2}{f^2}, \quad Y = \frac{f_H}{f}, \quad Y_T = Y \sin \theta, \quad Y_L = Y \cos \theta$$

$\theta$  : sudut antara arah penjalaran gelombang

$Y_T$  : komponen Y yang tegak lurus arah penjalaran gelombang.

$Y_L$  : komponen Y yang sejajar arah penjalaran gelombang

$f_p$  : frekuensi plasma =  $[(Ne^2/4\pi^2\epsilon_0 m)^{1/2}]$

$f_H$  : frekuensi gyro

Hubungan antara ketinggian semu  $h'(f)$  dan frekuensi lapisan ionosfer pada ketinggian tersebut adalah

$$h'(f) = \int_0^{z_0} \mu'(f, f_0) dz \quad \dots \quad (2-2)$$

dengan  $f_0(z)$  adalah fungsi yang harus ditentukan. Persamaan ini akan diselesaikan dengan mencari fungsi invers  $z(f)$  dan  $f_0$  diperlakukan sebagai variabel integral di atas yaitu

$$h'(f) = \int_0^{z_0} \mu'(f, f_0) \frac{dz(f_0)}{df_0} df_0 \quad \dots \quad (2-3)$$

Persamaan ini adalah tipe *volterra* dan transformasi ini hanya dapat dilakukan jika  $z(f_0)$  adalah fungsi monoton pada interval  $0 \leq f_0 \leq f$ . Metoda penyelesaian persamaan (2-1) dengan mengasumsikan bahwa ionosfer terdiri dari lapisan-

lapisan tipis sehingga  $h'(f)$  dapat ditabulasi sebagai fungsi pada setiap interval  $\Delta f$ . Misalkan  $h'(n\Delta f) = h'_n$  dan  $n$  adalah bilangan bulat.

Batas integrasi persamaan (2 - 3) dibagi menjadi  $m$  interval diskrit dari  $\Delta f$  dan ukuran interval adalah  $(m-1)\Delta f < f_0 < m\Delta f$  dan  $m \leq n$ . Untuk setiap interval

$\frac{dz}{df_0}$  adalah konstan dan dinyatakan oleh

$$\frac{dz}{df_0} \cong \frac{z_m - z_{m-1}}{\Delta f} \quad \dots \quad (2 - 4)$$

$z_m$  adalah singkatan dari penulisan  $z(m\Delta f)$ . Selanjutnya persamaan (2 - 4) ditulis menjadi

$$h'_n \approx \sum_{m=1}^{m=n} \frac{z_m - z_{m-1}}{\Delta f} \int_{(m-1)\Delta f}^{m\Delta f} \mu'(n\Delta f, f_0) df_0 \quad \dots \quad (2 - 5)$$

Misalkan

$$M_{n,m} = \frac{1}{\Delta f} \begin{cases} \int_{(m-1)\Delta f}^{m\Delta f} \mu'(n\Delta f, f_0) df_0, & \text{jika } m \leq n \\ 0 & \text{jika } m > n \end{cases} \quad \dots \quad (2 - 6)$$

Matrik  $M_{n,m}$  merupakan matrik segitiga bawah sehingga bentuk (2 - 5) menjadi

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ \vdots \\ h_2 \\ \vdots \\ h_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ h_n \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ M_{21} & M_{22} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ M_{31} & M_{32} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ M_{41} & M_{42} & M_{43} & 0 & \dots & 0 \\ \dots & & & & & \\ \dots & & & & & \\ \dots & & & & & \\ M_{n1} & M_{n2} & M_{n3} & \dots & M_{nn} \end{pmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & \dots \\ -1 & 1 & 0 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & -1 & 1 & 0 & \dots & \dots \\ 0 & 0 & -1 & 1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ z_n \end{bmatrix} \quad \dots \quad (2 - 7)$$

atau dalam notasi matrik ditulis menjadi  $h' = MDz$  (2 - 8)

Selanjutnya inversnya adalah  $z = Lh'$  (2 - 9)

Dengan  $L = (MD)^{-1}$  maka persamaan (2 - 9) adalah solusi yang dikehendaki yaitu ketinggian sebenarnya dari lapisan ionosfer pada frekuensi tertentu. Untuk memperoleh solusi tersebut diperlukan tiga operasi numerik yaitu (a) evaluasi elemen  $M_{n,m}$  menggunakan persamaan (2 - 6), dan perkalian matrik MD, (b) inversi matrik (c) evaluasi perkalian matrik  $Lh'$  dengan menggunakan persamaan (2 - 8) Operasi perhitungan (a) dan (b) tidak memiliki ketergantungan

data dan dapat dihitung secara terpisah. Perhitungan elemen matrik  $M_{n,m}$  menyangkut perhitungan integral persamaan (2 - 6). Integral tipe demikian diselesaikan dalam menghitung ketinggian ekuivalen pantulan gelombang radio yang dipancarkan oleh ionosonda jika  $f_o(z)$  diketahui. Telah diketahui dengan baik bahwa untuk gelombang ordiner nilai  $\mu'$  menuju ke tak hingga jika  $f_o \rightarrow f$ . Jika  $f$  adalah batas atas, maka integral persamaan (2 - 6) konvergen dan secara konvensional dievaluasi dengan mengubah variabelnya.

Misalkan  $\frac{f_o}{f} = \sin \phi$ , selanjutnya integral pada persamaan (2 - 5) dapat ditulis menjadi

$$M_{n,m} = \int_{\sin^{-1}((m-1)\Delta f)}^{\sin^{-1} m\Delta f} \{ \mu'(f, f \sin \phi) f \cos \phi \} d\phi \quad \dots \quad (2 - 10)$$

Fungsi dalam tanda kurung pada persamaan (2 - 7) menjadi berhingga jika  $f_o \rightarrow f$ .

Jika  $\phi \rightarrow \frac{\pi}{2}$  maka integral pada persamaan (2 - 7) diselesaikan dengan metoda Simpson dengan menggunakan lima titik yaitu untuk harga  $m = n$  dan batas atas adalah  $\phi = \frac{\pi}{2}$ .

Untuk harga  $m = n - 1$  digunakan tiga titik. Evaluasi elemen hasil perkalian matrik MD yaitu

$$\begin{pmatrix} M_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{21} - M_{22} & M_{22} & 0 & 0 & 0 \\ M_{31} - M_{32} & M_{32} - M_{33} & M_{33} & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 0 \end{pmatrix} \dots \quad (2 - 11)$$

dilakukan dengan substitusi mundur atau dengan metoda Gauss-Siedel.

### 3. Pembahasan

Ketinggian lapisan ionosfer yang tercantum pada ionogram adalah ketinggian semu. Terlihat bahwa ketinggian semu lebih tinggi dari ketinggian sebenarnya karena adanya waktu tunda dari gelombang yang dipancarkan dari ionosonde. Untuk mendapatkan ketinggian yang sebenarnya dari lapisan ionosfer kita gunakan metode Gauss yaitu simulasi beda frekuensi ( $\Delta f$ ) dari data ionosonde yang menentukan beda ketinggian semu ( $\Delta h'$ ) diperoleh persamaan (2 - 7) yang menyatakan adanya hubungan ketinggian semu dengan ketinggian sebenarnya dan hasil perhitungannya terdapat pada lampiran. Simulasi perhitungan sebenarnya dapat terjadi bahwa ketinggian sebenarnya lebih tinggi dari ketinggian semu yang terdapat dari ionogram, jika terjadi demikian maka  $\Delta f$  harus dieliminasi (dibuang). Antara hasil perhitungan dan perhitungan

dan data ( ionogram ) ada yang mempunyai selisih yang kecil dan besar. Untuk selisih yang kecil lapisan ionosfer dalam kondisi tenang , sedangkan untuk selisih yang besar disebabkan adanya variasi dari ionosfer besar disebabkan adanya pengaruh dari matahari terlihat pada lapisan E, F<sub>1</sub> dan F<sub>2</sub> ( lampiran ) Kondisi lapisan ionosfer dalam kondisi tenang yang pada yang lain harga  $\Delta f$  yang dipilih diperoleh harga ketinggian sebenarnya lebih rendah dari ketinggian semu pada ionogram , maka harga liarga  $\Delta f$  yang demikian kita kumpulkan lagi yang nantinya bisa kita gunakan sebagai pembanding . Jika kita ingin mengukur ketinggian lapisan ionosfer menggunakan metode ( alat ) yang lain misalnya menggunakan roket , dan hasilnya  $\Delta f$  yang memenuhi syarat nantinya kita gunakan sebagai acuan pada pengukuran ketinggian lapisan ionosfer hasil perhitungan.

#### 4. Kesimpulan

Untuk dapat menentukan ketinggian sebenarnya lapisan ionosfer dengan menggunakan data ionogram maka diperlukan cara yang khusus dalam pengolahan datanya dan diperlukan pemrograman komputer terstruktur sehingga akurasi perhitungan dapat dipertanggung jawabkan.

Hasil perhitungan dengan menggunakan Sumedang menunjukkan bahwa ketinggian sebenarnya lebih rendah dari ketinggian semu dan pola ketinggian sebenarnya mengikuti ketinggian semu

( lampiran ). Ketinggian sebenarnya lapisan ionosfer ini penting untuk penelitian parameter ionosfer yang lain misalnya pada pengukuran TEC , pada pengukuran MUF dan LUF pada sistim komunikasi HF.

#### Daftar Pustaka

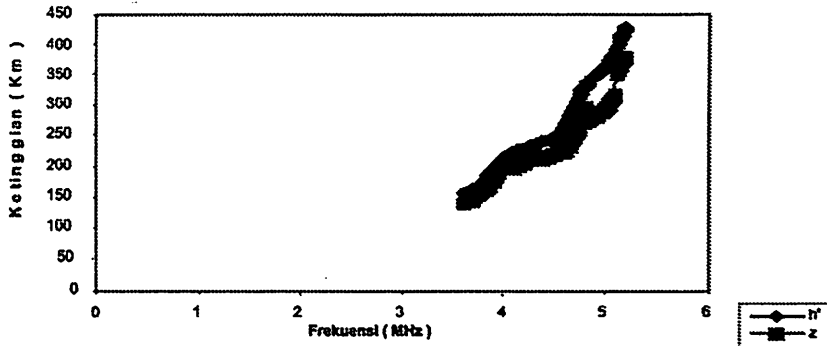
1. Hojo, H. A method of calculation of N(h) profiles from ionospheric h'(f) curves, J. Radio Res Lab, 8,41 1978.
2. Horstmann , Mastering C++, 1991 , John Wiley & Sons , New Jersey

## LAMPIRAN

**Lapisan F1 jam 09.30 tanggal 07 September 2006 Sumedang**

Frekuensi (Mhz)	Ketinggian (Km)		Frekuensi (Mhz)	Ketinggian (Km)	
	semu (h')	real (z)		semu (h')	real (z)
3.60000	156.00000	138.84000	3.60500	156.21696	139.03310
3.64000	157.79341	140.43614	3.64500	158.03511	140.65125
3.68000	159.93851	143.94466	3.68500	160.24889	144.22400
3.72000	162.78696	149.76400	3.72500	163.20999	150.15319
3.76000	166.69048	153.35524	3.76500	167.27010	153.88849
3.80000	172.00070	158.24065	3.80500	172.78055	158.95810
3.84001	178.89362	164.58213	3.84501	179.84387	165.45636
3.88001	186.84247	171.89507	3.88501	187.87535	172.84532
3.92001	195.14496	179.53336	3.92501	196.17264	180.47883
3.96001	203.09871	186.85081	3.96501	204.03343	187.71076
4.00001	210.00139	199.50132	4.00501	210.75571	200.21792
4.04001	215.33345	204.56678	4.04501	215.89629	205.10147
4.08001	219.30588	208.34058	4.08501	219.72644	208.74012
4.12001	222.31223	197.85788	4.12501	222.63969	198.14933
4.16001	224.74602	200.02396	4.16501	225.02957	200.27632
4.20001	227.00079	202.03071	4.20501	227.28949	202.28765
4.24001	229.38713	208.74229	4.24501	229.69533	209.02275
4.28002	231.88405	211.01448	4.28502	232.19878	211.30089
4.32002	234.38785	213.29294	4.32502	234.69612	213.57347
4.36002	236.79472	215.48320	4.36502	237.08360	215.74608
4.40002	239.00096	212.71086	4.40502	239.25777	212.93941
4.44002	241.05190	214.53619	4.44502	241.32620	214.78032
4.48002	243.58836	216.79364	4.48502	243.97888	217.14120
4.52002	247.39987	220.18589	4.52502	248.00529	220.72471
4.56002	253.27596	225.41560	4.56502	254.19495	226.23350
4.60002	262.00607	222.70516	4.60502	263.33661	223.83612
4.64002	274.00253	232.90215	4.64502	275.68497	234.33222
4.68002	288.17105	239.18197	4.68502	290.02161	240.71793
4.72003	303.04144	251.52440	4.72503	304.87637	253.04739
4.76003	317.14359	282.25779	4.76503	318.77908	283.71338
4.80003	329.00720	269.78591	4.80503	330.26050	270.81361
4.84003	337.63272	276.85883	4.84503	338.51733	277.58421
4.88003	343.89847	278.55776	4.88503	344.58286	279.11211
4.92003	349.15146	282.81268	4.92503	349.80399	283.34123
4.96003	354.73865	287.33830	4.96503	355.52765	287.97740
5.00003	362.00705	293.22571	5.00503	363.10022	294.11118
5.04003	371.97733	301.30163	5.04503	373.40625	302.45906
5.06003	377.90820	306.10564	5.06503	379.47662	307.37607
5.10003	391.28308	348.24194	5.10503	393.07373	349.83562
5.14004	406.17093	361.49213	5.14504	408.10815	363.21626
5.18004	421.96634	375.55004	5.18504	423.97443	377.33724

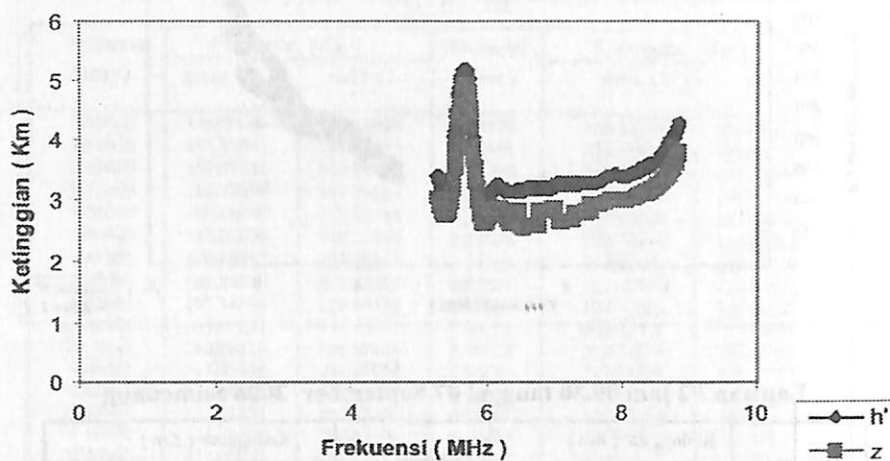
Profil ketinggian semu ( $h'$ ) dan ketinggian sebenarnya ( $z$ )  
 lapisan F1 ionosfer, jam 9.30 , tanggal 7 September 2006 ,  
 Sumedang



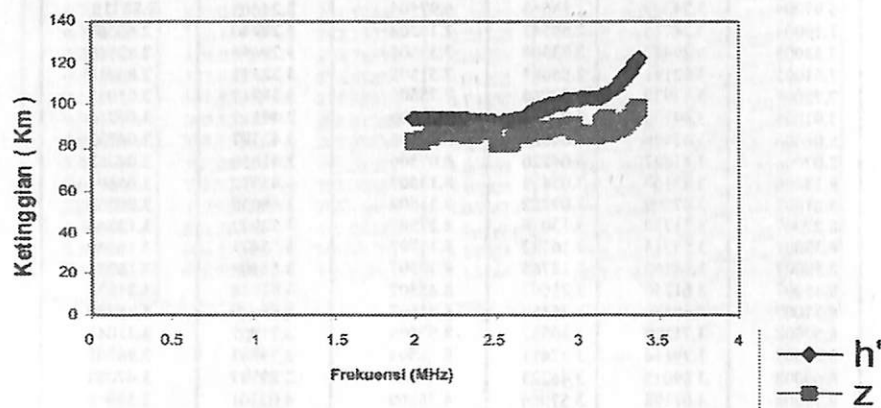
Lapisan F2 jam 09.30 tanggal 07 September 2006 Sumedang

Frekuensi (Mhz)	Ketinggian (Km)		Frekuensi (Mhz)	Ketinggian (Km)	
	semu ( $h'$ )	real ( $z$ )		semu ( $h'$ )	real ( $z$ )
5.29000	3.43000	3.05270	5.29500	3.40598	3.03133
5.47000	3.18548	2.93064	5.47500	3.21461	2.95744
5.65001	5.06805	4.66261	5.65501	5.09940	4.69144
5.89001	3.18989	2.83900	5.89501	3.15185	2.80515
6.07002	3.14112	2.85842	6.07502	3.15435	2.87046
6.25002	3.21901	2.86492	6.25502	3.21507	2.86141
6.43003	3.17476	2.63505	6.43503	3.17587	2.63597
6.61003	3.21436	2.60363	6.61503	3.21500	2.60415
6.79003	3.21574	2.86201	6.79503	3.21553	2.86182
6.97004	3.24228	2.88563	6.97504	3.24403	2.88718
7.15004	3.28716	2.69547	7.15504	3.28740	2.69567
7.33005	3.29429	2.83309	7.33505	3.29498	2.83369
7.51005	3.32191	2.85684	7.51505	3.32231	2.85719
7.75006	3.37939	3.00766	7.75506	3.38217	3.01013
7.91006	3.44120	3.06267	7.91506	3.44112	3.06260
8.01006	3.42496	3.04821	8.01506	3.42397	3.04733
8.07006	3.41827	3.04226	8.07506	3.41846	3.04243
8.13006	3.43160	3.05413	8.13507	3.43372	3.05601
8.21007	3.47699	3.09452	8.21507	3.48035	3.09752
8.27007	3.51750	3.13058	8.27507	3.52072	3.13344
8.33007	3.55215	3.16142	8.33507	3.55471	3.16369
8.39007	3.58162	3.18765	8.39507	3.58408	3.18984
8.45007	3.61356	3.21607	8.45507	3.61658	3.21875
8.51007	3.65570	3.25357	8.51507	3.65989	3.25730
8.57008	3.71389	3.30537	8.57508	3.71957	3.31041
8.63008	3.79114	3.37411	8.63508	3.79852	3.38068
8.69008	3.89015	3.46223	8.69508	3.89947	3.47053
8.75008	4.01198	3.57066	8.75508	4.02301	3.58048
8.82008	4.17527	3.71599	8.82508	4.18752	3.72689

Profil ketinggian semu ( $h'$ ) dan ketinggian sebenarnya lapisan F2 ionosfer terhadap frekuensi ( $f$ ), jam 9.30, tanggal 7 September 2006, Sumedang



Profil frekuensi terhadap ketinggian semu ( $h'$ ) dan ketinggian sebenarnya ( $z$ ), lapisan E ionosfer jam 9.30, tanggal 6 September 2006, Sumedang





Lapisan E jam 09.30 tanggal 07 September 2006 Sumedang

Frekuensi (Mhz)	Ketinggian ( Km )		Frekuensi (Mhz)	Ketinggian ( Km )	
	semu ( h ' )	real ( z )		semu ( h ' )	real ( z )
1.99	94	83.66	2.005	94.016	83.67464
2.02	94.032	83.68878	2.035	94.047	83.70193
2.05	94.06	84.65419	2.065	94.071	84.66397
2.08	94.079	84.67123	2.095	94.084	86.55716
2.11	94.085	86.55791	2.125	94.081	86.55456
2.14	94.072	86.54658	2.155	94.058	86.53346
2.17	94.038	86.5147	2.185	94.011	86.48976
2.2	93.976	86.45818	2.215	93.935	86.41994
2.23	93.886	86.37523	2.245	93.831	86.32432
2.26	93.769	86.26744	2.275	93.701	86.20482
2.29	93.627	86.13671	2.305	93.547	86.06334
2.32	93.462	85.98497	2.335	93.372	85.90182
2.35	93.276	85.81413	2.365	93.176	88.51743
2.38	93.072	88.41826	2.395	92.963	88.31517
2.41	92.853	88.20996	2.425	92.744	88.10677
2.44	92.642	88.00997	2.455	92.551	87.92389
2.47	92.477	87.85289	2.485	92.422	87.80135
2.5	92.393	82.22998	2.515	92.394	82.23032
2.53	92.428	82.26111	2.545	92.502	82.32641
2.56	92.618	82.43032	2.575	92.783	82.57688
2.59	93	82.7702	2.605	93.273	84.87823
2.62	93.597	85.17282	2.635	93.965	85.50858
2.65	94.374	85.88013	2.665	94.815	86.28205
2.68	95.285	86.70897	2.695	95.775	87.15548
2.71	96.282	87.61619	2.725	96.797	88.08572
2.74	97.317	88.55866	2.755	97.835	89.02961
2.77	98.344	89.4932	2.785	98.84	87.96723
2.8	99.315	88.39059	2.815	99.768	88.79379
2.83	100.198	89.17582	2.845	100.602	89.53566
2.86	100.98	89.87233	2.875	101.331	90.18481
2.89	101.654	90.47211	2.905	101.947	90.73323
2.92	102.21	90.96717	2.935	102.441	91.17293
2.95	102.64	91.3495	2.965	102.804	91.49591
2.98	102.934	87.49377	2.995	103.027	87.57314
3.01	103.089	87.62543	3.025	103.131	87.66104
3.04	103.166	85.62767	3.055	103.207	85.66213
3.07	103.268	85.71256	3.085	103.361	85.78973
3.1	103.499	85.90435	3.115	103.695	86.0672
3.13	103.963	86.28903	3.145	104.314	92.83943
3.16	104.762	93.23835	3.175	105.32	94.7883
3.19	106.001	86.9211	3.205	106.814	87.58772
3.22	107.753	88.35732	3.235	108.807	89.22155
3.25	109.966	89.07241	3.265	111.22	90.08832
3.28	112.559	91.17295	3.295	113.973	92.31807
3.31	115.451	93.51541	3.325	116.984	94.75674
3.34	118.56	96.0338	3.355	120.171	97.33835
3.37	121.805	98.66212			