

## MOLEKUL ANTARBINTANG DAN STRUKTUR GALAKSI<sup>\*)</sup>

Bambang Hidajat<sup>\*\*)</sup>

### R I N G K A S A N

*Tulisan ini merupakan tinjauan ulang penemuan molekul di dalam ruang antarbintang, kemungkinan pembentukannya dan kaitannya dengan struktur Galaktika.*

### A B S T R A C T

*A review on the discovery of interstellar molecules and the theory of the molecule formation in space are given. The relationship between dense dust cloud and the structure of galaxy is briefly outlined.*

### I. PENDAHULUAN

Dalam 10 tahun terakhir ini telah ditemukan tidak kurang dari 20 macam molekul kompleks, 34 macam isotop atom dan molekul, di dalam ruang antarbintang. Hadirnya molekul tersebut dikenali dari garis-garis spektrum radio dan gelombang mikro, 75 buah banyaknya, yang tersebar di antara panjang gelombang 1 milimeter sampai dengan 100 sentimeter (kira-kira antara 300 GHz dan 30 MHz). Penemuan tersebut tidak hanya dimungkinkan oleh karena transparansinya angkasa Bumi kita (terhadap daerah

---

<sup>\*)</sup> Review diberikan pada Simposium Fisika, Jogjakarta 1-6 Desember 1975.

<sup>\*\*)</sup> Observatorium Bosscha, Dept. Astronomi, Institut Teknologi Bandung.

panjang gelombang termaksud) tetapi, terutama, disebabkan majunya teknik penerimaan di dalam daerah panjang gelombang inframerah dan mikro. Hadirnya molekul yang kompleks di dalam awan-awan antarbintang membukakan era baru dalam penyelidikan kelimpahan materi (dan isotop), termodinamika zat antarbintang serta struktur dan evolusi galaksi kita.

Di dalam tulisan singkat ini ada tiga hal yang hendak dijadikan pokok tinjauan, yakni:

- i. Dengan identifikasi garis-garis spektrum, akan dicoba mengetahui kondensasi apa yang terjadi di dalam ruang antarbintang, sebelum materi antarbintang menjadi sebuah bintang
- ii. Mencoba menurunkan sifat dan hakekat antarbintang, serta tingkat eksitasi materi tersebut yang terdapat di sekitar bintang panas
- iii. Mengetahui dari mana asal dan evolusi molekul antarbintang.

## II. MOLEKUL ANTARBINTANG

Sejak diterapkannya spektroskopi pada penyelidikan benda langit telah ditemukan elemen kimia yang diduga bukan menjadi bagian suatu bintang. Elemen tadi, terdapat di antara bintang dan Bumi, dinamai zat antarbintang. Karena penyelidikan optis hanya dapat mendeteksi garis-garis spektrum yang terdapat di antara 3800Å sampai kira-kira 8000Å, maka penemuan optik terbatas kepada penemuan atom-atom dan beberapa macam molekul saja, yang mengandung karbon, seperti CN, CH dan CH<sup>+</sup>. Kalau materi yang dideteksi secara spektroskopi optik hanya memancarkan radiasi pada daerah panjang gelombang tampak sebenarnya bukan terjadi secara kebetulan. Radiasi tersebut bersesuaian dengan transisi elektronik yang energinya berubah dengan orde 5 ev. Kita ketahui bahwa energy tingkat atas atom-atom (dan molekul) pada umumnya terdapat dalam daerah 10 ev. Oleh karena itu cahaya yang dapat kita amati jadi berasal dari permukaan bintang, yang mampu meningkatkan atom sehingga dapat mencapai tingkat energy disekitar 10 ev.

Sebaliknya dengan hal di atas, diketahui bahwa energy disosiasi kebanyakan molekul berada pada daerah di bawah 10 ev. Oleh karena itu, pengamatan molekul hampir selalu terhindar dari penangkapan spektroskopi optik, yang mempunyai kepekaan detektor di antara, katakan, 4000 sd. 8000Å. Sebagaimana dikatakan di atas, kekecualian terjadi pada senyawa-senyawa yang mengandung karbon, titanium-oksida dan vanadium-oksida. Kedua buah molekul yang terakhir itu bukan merupakan komponen zat antarbintang, tetapi merupakan pembangun angkasa bintang-bintang dingin (yang mempunyai suhu permukaan kira-kira 2000-3000°K).

Sejak tahun 1951 mulai ditemukan, dengan astronomi radio, atom-atom hidrogen yang merupakan komponen utama gas antar-bintang. Atom tersebut memancarkan gelombang radio 21 cm. Berdasar pengamatan dan bantuan teori, kemudian dikenal suatu model gas antarbintang yang tersusun terutama dari hidrogen, yang terionisir dan yang netral:

1. Daerah Hidrogen netral (HI)

Ruang antarbintang yang terdiri atas hidrogen netral, mempunyai temperatur karakteristik 50-125°K. Kerapatannya terdapat dalam order 10-50 atom cm<sup>-3</sup>. Pada saat ini kerapatan relatif daerah HI, diperkirakan sama dengan kerapatan relatif Matahari. Perbandingan relatif elemen di Matahari kita adalah:

$$\text{He} : \text{H} = 10^{-1} ; \text{O} : \text{H} = 7 \times 10^{-4} ; \text{C} : \text{H} = 3 \times 10^{-4} ; \text{ dan} \\ \text{N} : \text{H} = 1 \times 10^{-4} .$$

2. Daerah Hidrogen terionisir (HII)

Terutama terdapat disekitar bintang baru yang panas ( $T = 20.000^{\circ}\text{K}$ ). Pancaran radiasi ultraviolet bintang tersebut adalah penyebab photoionisasi. Photoelektron yang terlempar ke dalam HII membuat daerah HII bersuhu disekitar  $10.000^{\circ}\text{K}$ . Daerah perbatasan antara HI dan HII ditandai dengan zone yang mempunyai keseimbangan antara proses-proses rekombinasi (elektron dengan proton) dan photoionisasi. Jauhnya daerah perbatasan tersebut dari pusat bintang panas tergantung kepada suhu bintang, rapat gas dan kerapatan bintang disekeliling gas tersebut.

Komponen lain materi antarbintang adalah debu, terutama silikat, yang mempunyai dimensi dalam orde besaran submikron (0.2 mikron). Komponen debu dan gas pada umumnya tercampur, terutama di dalam awan-awan gelap. Adanya komponen materi antarbintang yang berbentuk debu (atau bulir) dapat diselidiki dengan dua cara:

a. Hukum pemerahan

Bintang-bintang yang jauh dimerahkan, seperti halnya pemerahan menurut Hukum Mie (sebanding terbalik dengan panjang gelombang)

b. Penyelidikan polarisasi

Cahaya bintang terpolarisasi dan polarisasi ini menurut Hukum tertentu, yang dapat dihubungkan dengan orientasi bulir antarbintang.

Existensi gas-gas  $\text{CH}^+$ , CN, dan CH sudah dapat diketahui sejak lama, berdasar adanya absorpsi pada 4000Å. Absorpsi ini disebabkan oleh transisi elektronik dari tingkat dasar ketingkat yang lebih tinggi.

### III. ASTRONOMI MOLEKULER

Berbeda dengan spektrum optik, spektrum radio tidak banyak mengandung spektrum yang diskrit. Tabel di bawah ini memperlihatkan garis besar perbedaan tersebut:

#### SPEKTRUM OPTIK

Banyak garis-garis yang diskrit berasal dari transisi antar tingkat eksitasi elektronik.

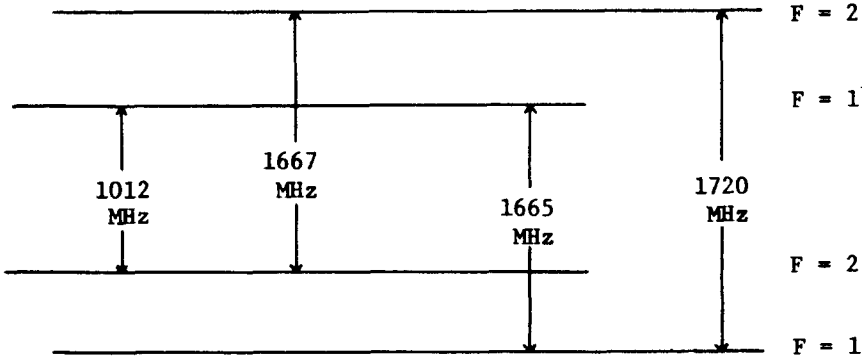
#### SPEKTRUM RADIO

Radiasi kontinyu, berasal dari sumber sinkrotron atau termal. Dalam hal spektrum radio transisi antara berbagai tingkat sangat lemah.

Berbeda dengan kebanyakan spektrum radio, spektrum hidrogen netral (21 cm) sangat tajam dan kuat. Spektrum ini disebabkan adanya spin elektron dan proton yang sejajar ( $F = 1$ ), pada tingkat atas kedua tingkatan. Pada tingkatan bawahnya  $F=0$  (antiparalel). Sebenarnya transisinya mempunyai dipole magnetik yang lemah, dengan kebolehdjadian hanya sebesar  $10^{-12}$  sek<sup>-1</sup> (bandingkan dengan transisi optik yang mempunyai kebolehdjadian antara  $10^6$  sd.  $10^8$  sek<sup>-1</sup>). Hanya karena jumlah hidrogen yang luar biasanya banyaknya, yang terdapat sepanjang garis penglihatan, maka sinyal-sinyal hidrogen netral tadi dapat diamati dari Bumi.

Sudah sejak tahun 1963, grup radio astronomi di MIT, di bawah pimpinan Weinreb et al. (1963) membuka era penyelidikan molekul kompleks, dengan ditemukannya hidroksil (OH) oleh mereka. Transisi rotasi hidroksil (OH) terletak pada daerah inframerah. Tingkatan rotasinya terbelah menjadi dua buah, disebut Lambda Doublets. Perbedaan tingkat tersebut bersesuaian dengan pengarahannya (searah atau berlawanan arah dengan jarum jam) rotasi nuklir, relatif terhadap komponen momentum putar elektronik (yang berarah sepanjang sumbu penghubung inti). Oleh karena itu terdapat hyperfine structure pada setiap tingkat, yang ditentukan oleh spin elektron dan proton. Jadi untuk OH terdapat 4 buah tingkatan pada tingkat dasar, yang dapat menimbulkan 4 macam loncatan elektrikdipole, pada frekwensi 1720, 1667, 1665 dan 1612 MHz atau pada panjang gelombang 18 cm (perhatikan gambar 1). Weinreb et al, menemukan absorpsi hidroksil di atas latar belakang sumber radiasi kontinyu. Dua tahun kemudian Weaver et al. (1965) menemukan emisi hidroksil. Namun karakteristik profilnya menunjukkan bahwa emisi hidroksil ini terjadi tidak secara spontan, dan menimbulkan kesulitan interpretasi. Kemudian diterangkan bahwa MASER adalah penyebab kebangkitan emisi tadi.

Pada tahun 1968, Cheung et al. (1968, 1969) mencari dan menemukan amonia (NH<sub>3</sub>) dan air, H<sub>2</sub>O, pada panjang gelombang 1.26 dan 1.35 cm. Garis radio yang berasal dari H<sub>2</sub>O diamati



Gambar 1: Kwartet Tingkat Dasar Hidroksil

sebagai Maser yang sangat kuat, dengan emisi yang intens, berasal dari berbagai daerah yang beraneka ragam (sifat dan besarnya), termasuk berasal bintang-bintang inframerah. Pada saat yang hampir bersamaan dengan penemuan gelombang mikro tersebut Heiles (1968) mengamati emisi termal OH di awan galaksi yang gelap. Awan galaksi ini hanya mengandung sedikit atau tidak mengandung sama sekali radiasi 21 cm. Dengan begitu penemuan Heiles tersebut merupakan petunjuk pertama, yang jelas, bahwa awan gelap dapat dihuni oleh molekul tanpa atom. Kelak hal ini akan dipergunakan untuk membentuk pengertian tentang lahirnya bintang. Secara teoritis dapat diterangkan bahwa pembentukan dan disosiasi molekul Hidrogen ( $H_2$ ) dapat terselenggara pada permukaan bulir-bulir antarbintang, asal awan gelap tempat bulir-bulir tadi cukup padat (100 bulir tiap  $cm^3$ ). Tetapi pengamatan bulir dengan molekul  $H_2$  ini tidak mudah, karena  $H_2$  hanya memancarkan radiasi di daerah ultraviolet, suatu daerah spektrum yang tak dapat diamati langsung dari permukaan Bumi.  $H_2$  adalah molekul yang simetris, tanpa mempunyai dipole listrik yang permanen. Oleh karena itu  $H_2$  hanya mempunyai transisi rotasi yang sangat, lemah dari padanya tidak ada yang bertepatan dengan daerah panjang gelombang radio.

Ketika pada tahun 1969 Snyder et al. (1969) menemukan formaldehyde ( $H_2CO$ ) pada panjang gelombang 6 cm (berasal dari doubling type k,  $J=1$ ), makin disadari bahwa keanekaragaman elemen kimiawi dalam awan gelap melebihi apa yang diperkirakan sampai saat ini. Ringkasan penemuan molekul antarbintang sampai dengan tahun 1974 dipertunjukkan pada TABEL I, yang disarikan dari artikel Salomon (1974) dan Cook (1975). Dalam TABEL I ini tertera tahun-tahun penemuan, beserta rumus Kimiawinya, serta frekwensinya dalam GHz ( $1 \text{ GHz} = 10^9$  cycles tiap sekon).

Di antara molekul yang tertera di dalam Tabel tersebut ada yang berkecenderungan hanya menempati daerah pusat Galaksi saja, beberapa molekul lainnya (CO, CN, CH dan  $\text{CH}^+$ ) dapat ditemukan di dalam galaksi tanpa ada preferensi, kecuali adanya awan gelap saja. Hidroksil dan air terlihat berkaitan lokasinya dengan daerah HII dan bintang inframerah (Buhl, 1973), dan di antara bintang-bintang rambunkus bintang merah tersebut (Abe, 1973).

Berdasarkan isoton suatu molekul dapat dilaksanakannya dengan menentukan perbedaan frekuensi akibat perbedaan spektrum rotasi (line yang hampir serendeng dengan perbedaan massa molekul) dibandingkan dengan penyelidikan isoton atom, maka penyelidikan isoton molekul relatif lebih gampang untuk menentukan jumlah dan kelimpahan atom yang bersangkutan. Tetapi detail pengungkapan isoton tidak akan dicarakan dalam tulisan ini. Dari Tabel I, terlihat adanya ikatan yang mengandung C dan O merupakan ikatan yang dominan di dalam galaksi kita (termasuk juga H<sub>2</sub>O dan metilalkohol, H<sub>3</sub>COH, sebagai contoh).

#### IV. PEMBENTUKAN MOLEKUL

Secara umum dapat dikatakan bahwa molekul di dalam galaksi kita tak dapat mempunyai kalahidupan yang panjang, akibat melimpahnya radiasi ultraviolet dari bintang-bintang. Kecuali jika molekul tersebut memperoleh selubung awan gelap dan debu, maka umur molekul tak dapat lebih panjang dari  $10^3$  tahun. Oleh karena itu terlihatnya molekul dari dalam awan antarbintang harus diartikan bahwa di dalam ruang tersebut terdapat keseimbangan dinamik antara pembentukan dan perombakan molekul. Molekul yang sudah terbentuk tadi, pada salah satu momen dalam kehidupannya yang pendek, tereksitasi. Itulah sebabnya dapat diamati. Dari keadaan eksitasi molekul itu dapat diperoleh pengetahuan mengenai keadaan fisik ruang antarbintang tempat ditemukannya molekul yang bersangkutan. Namun, sebenarnya perlu disadari bahwa tidak mudah untuk secara langsung menarik kesimpulan tentang keseimbangan termal di dalam ruang antarbintang, karena tingkatan eksitasi molekul kadang-kadang tidak hanya bertautan dengan satu parameter termal saja.

Penyelidikan dengan gelombang mikro dalam astronomi yang sampai sekarang dilaksanakan itu memberikan alat diagnostik untuk mengetahui kehadiran molekul itu sendiri, bukan peristiwa pembentukannya atau perombakannya, yang tak dapat disaksikan secara langsung. Untuk mencari jawab, bilamana dan di mana molekul tersebut terbentuk perlu diketahui informasi mengenai keadaan ruang antarbintang, di mana peristiwa pembentukan molekul makin berlangsung. Di bawah ini adalah ri-salah umum mengenai keadaan ruang antarbintang, yang dapat diturunkan dari data pancaran gelombang mikro dan radio:

Tabel I. Molekul dalam Medium Antarbintang

Molekul dan tahun Penemuannya	Frekuensi (CHZ)	Transisi	Isotop	Jumlah transisi	Rapat dalam awan (per $\text{cm}^3$ )
$\text{H}_2$	(1970)	-	Dalam daerah ultraviolet	-	$10^{+4}$
$\text{CH}^+$	(1937)	Optik	$\text{C}^{13}\text{H}^+$	-	Tek diamati dalam $\text{H}_2$
CH	(1937)	Optik	-	-	Tek diamati dalam $\text{H}_2$
CN	(1938)	Optik dan 113.492	$J = 1 \rightarrow 0$	1	$10^{-4}$
OH	(1963)	1.665	$J = 3/2$ $\Lambda$ doubling	$\text{O}^{18}\text{H}$ 10	$10^{-2}$
CO	(1970)	115.271	$J = 1 \rightarrow 0$	$\text{CH}^{13}\text{O}; \text{CO}^{18}$ 3	1
CS	(1971)	146.969	$J = 3 \rightarrow 2$	$\text{CS}^{34}; \text{C}^{13}\text{S}$ 7	$10^{-3}$
SiO	(1971)	130.268	$J = 3 \rightarrow 2$	-	$(10^{-5})$
$\text{H}_2\text{O}$	(1969)	22.235	$J_{K-1K1} = 6_{16} + 5_{23}$	-	1 ? Hanya maser
HCN	(1970)	86.339	$J = 1 \rightarrow 0$	$\text{HC}^{13}\text{N}; \text{HCN}^{15}$ DCN 6	$10^{-3}$
$\text{H}_2\text{S}$	(1974)	168.762	$J_{K-1K1} = 1_{10} + 1_{01}$	-	1 $10^{-4}$
OCS	(1971)	109.463	$J = 9 \rightarrow 8$	-	4 $(10^{-4})$
$\text{NH}_3$	(1968)	23.694	$J_K = 1_1$ Inversion doublet	-	7 $10^{-2}$
$\text{H}_2\text{CO}$	(1969)	4.830	$J_{K-1K1} = 1_{11} + 1_{10}$	$\text{H}_2\text{C}^{13}\text{O}; \text{H}_2\text{CO}^{18}$ 10	$10^{-4}$
$\text{H}_2\text{Cs}$	(1971)	3.139	$J_{K-1K1} = 2_{12} + 2_{11}$	-	1 $10^{-5}$
HNCO	(1971)	87.925	$J_{K-1K1} = 4_{04} + 3_{03}$	-	3 $(10^{-4})$
HCOOH	(1970)?	1.639	$J_{K-1K1} = 1_{01} + 1_{11}$	-	1 -
$\text{HC}_3\text{N}$	(1970)	9.098	$J = 1 \rightarrow 0$	-	3 $(10^{-4})$
$\text{CH}_3\text{OH}$	(1970)	0.834	$J_{J-1K1} = 1_{11} + 1_{10}$	-	9 $10^{-3}$
$\text{CH}_3\text{CN}$	(1971)	110.383	$J_K = 6 + 5$	-	5 $(10^{-4})$
$\text{NH}_2\text{HCO}$	(1972)	4.619	$J_{K-1K1} = 2_{11} + 2_{12}$	-	1 $(>10^{-5})$
$\text{CH}_3\text{C}_2\text{H}$	(1974)	85.457	$J_K = 5_0 + 4_0$	-	1 $(10^{-4})$
$\text{CH}_3\text{HCO}$	(1971)	1.065	$J_{K-1K1} = 1_{10} + 1_{11}$	-	1 $(>10^{-5})$

## i. LADANG DAN RADIASI

Salah satu peristiwa penting di dalam astronomi dan fisika dalam dasawarsa terakhir ini ialah penemuan radiasi (latar belakang) yang isotropis, terdapat di mana-mana di dalam galaksi. Intensitas berbagai frekwensi menunjukkan bahwa radiasi tersebut beresesuaian dengan temperatur benda hitam pada suhu 3°K (Hoyle, 1951). Tetapi medan radiasi di dalam awan antarbintang haruslah merupakan paduan antara radiasi latarbelakang tersebut dengan medan radiasi yang telah diubah oleh debu dan awan antarbintang, jadi dapat diduga beberapa derajat lebih tinggi dari pada medan radiasi tersebut.

## ii. SUHU AWAN ANTARBINTANG

Untuk memperkirakan tingginya suhu ruang antarbintang yang memancarkan gelombang mikro atau radio, dapat diandaikan kondisi physik sebagai berikut. Andaikan intensitas garis radio tersebut  $I_{\nu}$ , yang berasal dari sebuah awan antarbintang, maka persamaan perpindahan panas memberikan hubungan

$$I_{\nu} = B_{\nu}(T_{mn}) (1 - e^{-t_{\nu}}) \quad (1)$$

dimana  $B_{\nu}(T)$  = fungsi Planck

$t_{\nu} = N_m a_{\nu} =$  tebal optis pada frekwensi  $\nu$

$a_{\nu} =$  koefisien absorpsi, dan

$N_m =$  rapat materi sepanjang kolom (per  $\text{cm}^2$ )

$T_{mn} =$  temperatur eksitasi

jika  $h\nu \ll kT$ , maka persamaan (1) dapat dituliskan sebagai Temperatur kecerahan (brightness temperature)  $T_b$ , yang besarnya

$$T_b = T_{mn} (1 - \exp - t_{\nu})$$

Untuk daerah interes astronomi, tebal optis biasanya besar, dan karena itu  $t_{\nu} \gg 1$ . Dalam hal ini maka

$$T_b = T_{mn} \quad (2)$$



Sebaliknya, jika awan gelap tempat pemancar gelombang radio tidak terlalu tebal, maka  $t_{\nu} \ll 1$  (tebal optis rendah), maka persamaan (1) berubah menjadi

$$T_b(\nu) = N_m a_{\nu} T_{mn} \quad (3)$$

Rumus (2) di atas menyatakan bahwa bagi daerah dengan tebal optis yang besar (yang hampir tak tembus radiasi) temperatur kecerahan sama besarnya dengan ukuran temperatur keadaan. Kelimpahan material (N) dapat diperkirakan jika koefisien absorpsi,  $a_{\nu}$ , dapat ditentukan. Karena koefisien absorpsi ini mempunyai ketergantungan dengan frekwensi maka diperlukan suatu integrasi bagi seluruh frekwensi

$$a = \int_0^{\infty} a_{\nu} d\nu$$

Dengan pertolongan matrik elemen dipole moment  $|\nu_{mn}|$ , diperoleh

$$a = \frac{8\pi^3}{3hc} |\nu_{mn}|^2 \nu [1 - \exp(-h\nu/kT_m)] \quad (4)$$

Pernyataan di dalam kurung timbul karena adanya stimulasi emission, sebanding dengan eksese molekul di tingkat bawah (m), relatif terhadap yang terdapat pada tingkat atasnya (n). Dalam keadaan di mana berlaku  $h\nu \ll kT_m$ , kelimpahan  $N_m$  dapat ditentukan langsung dari

$$N_m = \frac{3k}{T_m^2 |\nu_{mn}|^2 \nu} \int_0^{\infty} T_b d\nu \quad (5)$$

Di dalam rumus terakhir itu intensitas dinyatakan dengan cara mengintegrasikan semua komponen kecepatan molekul. Dengan pertolongan rumus di atas temperatur dan kelimpahan materi dapat ditentukan dari intensitas berbagai garis radio. Hasil yang diperoleh menunjukkan  $T_b$  berkisar dari 4°K, bagi garis-garis yang terlemah, dan  $T_b = 45^\circ\text{K}$  untuk

daerah yang intensitas radiasinya tinggi di dalam awan gelap yang bekat, seperti kabut Orion.

### iii. RAPAT MATERI ANTARBINTANG

Dinamika gerakan bintang dapat dipergunakan untuk menentukan besarnya gaya tarik dan kerapatan secara umum. Untuk daerah di sekitar Matahari dapat ditentukan kerapatan minimum materi antar bintang sebesar  $1.2 \times 10^{-24}$  g.cm<sup>-3</sup> (Allen, 1973). Sebagian dari pada komponen gasnya terdiri dari atom dan molekul hidrogen. Jumlah atom hidrogen sendiri dapat ditentukan berdasarkan intensitas transisi hyperfine, pada 21 cm. Harga rata-rata rapat hidrogen adalah 1 atom cm<sup>-3</sup>. Rapat molekul hidrogen (H<sub>2</sub>) baru dapat diperoleh oleh Drake (1974) dengan menyelidiki intensitas radiasi ultraviolet dari Satelit Kopernikus. Di sekitar Matahari diperoleh harga limit bawah, untuk setiap 1 buah atom Hidrogen terdapat dua buah molekul Hidrogen. Harga tersebut diperkirakan dapat berubah sampai faktor 3 atau 4 kali tergantung kerapatan bulir-bulir yang terdapat di dalam zat antar bintang.

Dengan latar belakang informasi tersebut akan dicoba untuk mengetengahkan teori yang menerangkan terjadinya pembentukan molekul antar bintang. Kelangkaan dan rendahnya temperatur memaksa orang harus memikirkan pembentukan molekul dengan proses terjadi di dalam laboratorium jodyana bukanlah merupakan prosede yang efektif. Walaupun pada dasarnya tumbukan antar atom yang menyebabkan terbentuknya molekul di atom (atau lebih), namun jelas bahwa persyaratan termodinamik kurang memungkinkan terbentuknya molekul kompleks, tanpa adanya agen perantara.

Buhl (1972 a, b) menerangkan bahwa pada dasarnya terdapat dua macam teori pembentukan molekul antar bintang:

- i. Molekul yang dibentuk di dalam angkasa bintang dingin. Teori ini mempunyai daya tarik karena memenuhi beberapa persyaratan, antara lain ialah prasyarat adanya kerapatan tinggi ( $10^{14}$  atom hydrogen, tiap cm<sup>3</sup>) sehingga memungkinkan terselenggara reaksi bagi materi yang terdapat dalam phase gas. Lagi pula kondisi termodinamik di dalam angkasa bintang juga menguntungkan. Molekul yang terbentuk itu kemudian terlempar ke luar dari bintang, oleh berbagai mekanisme (terutama konveksi angkasa bintang) mengisi ruang antar bintang. Kelemahannya ialah radiasi tersebut dapat bertindak sebagai penyebab photodisosiasi, yang hanya memungkinkan kala hidup molekul tadi sangat pendek, dalam orde  $10^2 - 10^4$  tahun.

ii. Didapatkannya kenyataan bahwa beberapa macam molekul ditemukan pada jarak yang jauh dari bintang, dan terdapat di dalam awan gelap, maka ada kecenderungan untuk mengatakan bahwa pembentukan molekul in situ, di dalam awan-awan gelap itu sendiri bukanlah hal yang mustahil. Jika molekul tersebut dibentuk di dalam awan gelap, maka kalahidupnya dapat menjadi lebih panjang  $10^5 - 10^6$  tahun. Tetapi seperti diuraikan di atas kondisi fisik awan gelap tersebut sangat jauh dari kondisi keseimbangan termodinamik yang akan mengingkari kemungkinan terbentuknya molekul dengan cara tumbukan langsung antara dua (atau lebih) atom-atom. Kesulitan terakhir ini dielakkan oleh Watson dan Salpeter (1974) yang menerangkan bahwa pembentukan molekul akan tetap dapat berlangsung jika di dalam awan gelap tadi terdapat bulir antarbintang. Sudah sejak tahun 1951, adanya bulir yang mengakibatkan terjadinya polarisasi cahaya bintang, dapat diamati. Oleh karena itu macam kedua teori pembentukan molekul itu lebih mendapat dasar yang kuat. Atom yang melekat pada bulir antarbintang akan lebih banyak mempunyai kesempatan bertumbukan dengan atom lain (yang sejenis atau bukan) untuk menggerombol.

Dua buah syarat yang dapat meyakinkan berlangsungnya distribusi dan pembentukan molekul itu, dengan singkat dijabarkan sebagai berikut:

- i. Tanpa adanya perantara, yakni bulir-bulir maka reaksi kimia dua buah phase gas akan memakan waktu yang terlampau lama. Di dalam kondisi ruang antarbintang yang umum, dengan kerapatan kurang dari  $10^5$  partikel tiap  $\text{cm}^3$ , diperlukan bulir yang dapat menampung (menjadi tempat melekat) partikel gas cukup lama ( $10^2 - 10^4$  sek) sebelum komponen gas lain tiba untuk bertumbukan.
- ii. Penyebaran molekul yang sudah terbentuk ke dalam ruang yang lebih luas dapat berlangsung karena adanya mekanisme perombakan bulir. Mekanisme ini dapat disebabkan oleh gelombang kejut, pemanasan radiasi kosmik maupun pemanasan biasa. Pemanasan biasa itu dapat terjadi karena pada proses pembentukan molekul, yang menempel pada permukaan bulir (diameter 0.0002 mm), dapat membangkitkan panas. Panas itu yang melepaskan kumpulan molekul dari bulir-bulir. variant lain dikemukakan Greenberg (1974): molekul justru terbentuk didalamnya bulir kristal es, dan berujud radikal yang dibekukan di dalam matriks kristal. Kristal macam itu tidak akan stabil dan oleh karena itu dengan gangguan luar yang sedikit saja (oleh sinar kosmik) dapat meledak dan menyebarkan molekul hasil bentukannya.

Kedua peristiwa yang diuraikan di atas jelas tergantung kepada sifat ikatan yang terbentuk dan menempel pada permukaan bulir. Diduga dua urutan pembentukan molekul dapat terjadi: pertama, terjadinya penempelan atom-atom H untuk membentuk senyawa yang mengandung Hidrogen, sedangkan urutan kedua ialah pembentukan molekul yang lebih kompleks. Teori yang baik harus dapat menerangkan dengan cara kuantitatif laju pembentukannya dan perombakan molekul itu, agar dapat menerangkan N, jumlah molekul yang diperkirakan ada.

## V. MOLEKUL DAN STRUKTUR GALAKSI

Sekali awan molekul terbentuk maka tidak akan timbul kesukaran untuk menerangkan urutan proses pembentukan bintang, tatasurya, bahkan planet di dalam galaksi. Adanya molekul di dalam awan bintang merupakan hal yang esensial untuk pembentukan planet-planet dengan berbagai ragam komposisi. Beberapa buah tempat dirasi Orion, diketahui mengandung "globules" (bola gas yang sangat pekat) dan sumber H<sub>2</sub>O (Larson, 1972). Secara teoritis suhu H<sub>2</sub>O dapat diperkirakan mencapai 600°K. Dapat diturunkan secara tidak langsung rapat molekul H<sub>2</sub>, 10<sup>10</sup> molekul tiap cm<sup>3</sup>. Radius kumpulan H<sub>2</sub>O dan H<sub>2</sub> ini kira-kira sama 1 satuan astronomi (yakni jarak rata-rata Matahari-Bumi, 150 juta km). Astronomi optik telah lama menduga bahwa globule merupakan bintang mula (protostar). Oleh karena itu keinsidensi antara kedudukan H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub> dan globule menyarankan suatu gambaran bahwa globule tadi memang merupakan pusat kondensasi yang kelak menjadi bintang baru. Awan gelap di dalam galaksi, seperti telah diuraikan di atas, diketahui menjadi tempat yang paling mungkin untuk membentuk molekul. Tetapi tempat itu juga merupakan tempat yang paling memungkinkan terbentuknya inti kondensasi. Walaupun secara optik tak tampak, awan gelap tempat pemancar gelombang radio dan mikro diharapkan akan merupakan tempat yang potensiil sebagai pusat pembentuk bintang-bintang.

Didapatkannya isotop molekul sangat menguntungkan penyelidikan untuk mengetahui jumlah relatif isotop atom yang bersangkutan, dan dapat dipergunakan sebagai petunjuk aktivitas synthesa inti di dalam alam semesta (Hidayat, 1974). Sebagai contoh, dari hasil survey sebanyak 9 buah awan gelap Penzias et al. (1972) dapat memperoleh perbandingan isotop C<sup>13</sup>O dan CO<sup>18</sup>. Perbandingan tersebut, dengan bantuan teori, dapat diubah menjadi perbandingan isotop O<sup>18</sup>/O<sup>16</sup> dan C<sup>13</sup>/C<sup>12</sup>. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa perbandingan itu tidak berbeda banyak (dengan faktor 2) dibandingkan dengan isotop yang

sama di Matahari dan di Bumi. Implikasinya ialah bahwa sejarah pembangkitan inti di Bumi, di Matahari dan di dalam ruang antarbintang mungkin tidak mengalami banyak perbedaan (Turner, 1973). Oleh sebab itu penyelidikan gelombang mikro ini dapat membuka halaman baru bagi penyelidikan sintesa nuklir, tidak hanya yang berlangsung di dalam bintang panas (Hidajat, 1974), tetapi juga di dalam ruang yang dingin dan yang keadaannya termodinamik kelihatannya kurang menguntungkan.

## VI. EPILOG

Penyelidikan molekul antarbintang dengan gelombang-gelombang mikro baru saja dimulai. Walaupun telah menunjukkan sifat-sifatnya yang potensial untuk memecahkan beberapa persoalan dasar, tetapi harus diakui teori yang kualitatif dan kuantitatif untuk menerangkan terjadinya semua molekul yang telah diamati, atau yang diharapkan dapat diamati, belum ada. Di sini diperlukan kerjasama yang erat antara beberapa disiplin ilmu pengetahuan astronomi, fisika dan kimia. Secara singkat, ada appeal untuk menyelesaikan 3 buah soal:

1. Identifikasi beberapa garis radio, terutama di sekitar 90 GHz. Garis tersebut belum diketahui terlempar dari molekul apa. Pengetahuan yang diperlukan ialah menghitung kebolehjadian bermacam transisi dan penampang lintang tumbukan antar atom, yang paling melimpah di dalam kosmos
2. Teori mengenai perpindahan panas dan maser
3. Penyelidikan laboratoris untuk mengetahui efek tumbukan antara molekul dan molekul hidrogen dan elektron.

Walaupun begitu tanpa menyebutkan dua buah hal yang konkrit, yang diperoleh selama ini rasanya tulisan ini belum lengkap. Dua hal yang menguntungkan dalam penyelidikan molekul ini ialah: 1) molekul mempunyai karakteristik yang nyata bagi frekwensi resonansi. Karakteristik ini dengan mudah, dan tepat, dapat dipergunakan untuk mengidentifikasi sumber. 2) Di dalam ruang antarbintang, yang temperaturnya berkisar antara 3°K sampai dalam orde 100°K, molekul dieksitasikan ke dalam beberapa tingkat rotasi. Transisi antara berbagai tingkat itu menghasilkan radiasi dalam daerah panjang gelombang radio saja, tanpa kontaminasi di dalam daerah optik.

Dalam astronomi sendiri disadari perlunya membuat antena yang lebih peka dan mempunyai daya pisah besar. Kegunaan yang terakhir itu adalah untuk mengetahui struktur pemancar gelombang radio. Satu hal penting yang merupakan impetus bagi astronomi struktur galaksi ialah dengan perkembangan astronomi molekuler ini tumbuh konsep yang lebih mengenai awan dan debu

antarbintang. Kemudian menjadi lebih jelas bahwa awan gelap yang menghuni daerah berdebu di dalam galaksi kita memegang peranan penting dalam berbagai periode evolusi: evolusi kimia molekuler di dalam awan, evolusi awan menjadi bintang dan planet serta evolusi organisme pada planet.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Dr. Winardi Sutantyo yang telah membaca tulisan ini dan memberikan saran-saran. Bantuan keuangan dari Institut Teknologi Bandung memungkinkan penulis dapat mengunjungi Symposium ini. Atas bantuan yang sangat berharga itu penulis hendak menyatakan terima kasih yang setulus-tulusnya.

#### KEPUSTAKAAN

- Akyol, M and Hidajat B, 1973, *Mitteilung der Astron. Gesellschaft*, 32, 260.
- Allen, C.W., 1973, *Astrophysical Quantities* (3rd Edition), The Athlone Press, London, 1973, p. 234.
- Buhl, D., 1972 a, *Mercury*, 1, 4.
- , 1972 b, *ibid*, 2, 4.
- , 1973, *Sky and Telescope*, 45, 156.
- Cheung, A.C., Rank, D.M., Townes, L.H., Thornton, D.C., 1968, *Physical Review Letter*, 21, 1701.
- Cook, A.H., 1975, *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Soc.*, 16, 21.
- Heiles, C., 1968, *Astrophysical Journal*, 151, 919.
- , 1971, *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, Editor: Leo Goldberg, Palo Alto, 1971, p. 293.
- Hidajat, B., 1974, *Nukleosintesa di dalam Bintang. Symposium Himp. Fisika Ind.*, 1974.
- Penzias, A.A., Jefferts, K.B., Wilson, R.W., List, H.S., 1972, *Astrophysical Journal*, 178, L35.
- Snyder, L.E., Buhl, D., Zuckermann, B., Palmer, P., 1969, *Physical Rev. Lett.* 22, 679.
- Solomon, P.M., 1972, *Astrophysical Journal*, 176, L77.
- , 1974, *Physics Today*, March, 32.

- Turner, B.E., 1972, *Astrophysical Journal*, 171, 503.
- Watson, W.D., and Salpeter, E.E., 1974, *Molecule Formation on Interstellar Grains*, in *Molecules in the Galactic Environment*, Editor: Mark A. Gordon and L. Snyder, John Wiley and Sons, New York, 1974, p. 375.
- Weaver, H.F., Williams, D.R.W., Dieter, N.H., Lum, W.T., 1965, *Nature*, 208, 29.
- Weinreb, S., Barret, A.H., Meeks, M.L., Henry, J.C., 1963, *Nature*, 200, 829.
- Welch, W.J., 1968, *Physical Rev. Letter*, 21, 1701.
- , 1971, *Nature*, 221, 626.

*(Diterima 8 Januari 1976)*

---