

**LAPORAN AKHIR HASIL PENELITIAN  
HIBAH PENELITIAN KERJASAMA ANTAR PERGURUAN TINGGI  
(HIBAH PEKERTI)**

**TAHUN ANGGARAN 2003/2004**



**PENGEMBANGAN KONTAKTOR MEMBRAN  
HOLLOW FIBER UNTUK PENGENDALIAN  
EMISI GAS BUANG**

**Tim Peneliti Pengusul :**

Nita Aryanti, ST,MT  
Ir. Budiyono, M.Si  
Heru Susanto, ST,MT

**UPT-PUSTAK-UNDIP**

No. Daft: 388 /KV/ LPM/UT/21  
Jgl. : 024.2004

Dibiayai oleh Proyek Pengkajian dan Penelitian Ilmu Pengetahuan dan Teknologi  
Direktorat Jendral Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional  
Sesuai dengan Surat Perjanjian Pelaksanaan Penelitian Hibah Pekerti Nomor:  
311/P4T/DPPM/PHP/IV/2003 tanggal 25 (Dua puluh lima) bulan April tahun 2003

**Perguruan Tinggi Pengusul  
Lembaga Penelitian Universitas Diponegoro  
November 2003**

## LEMBAR IDENTITAS DAN PENGESAHAN LAPORAN AKHIR HASIL PENELITIAN HIBAH PEKERTI

A. Judul Penelitian:

PENGEMBANGAN KONTAKTOR MEMBRAN HOLLOW FIBER UNTUK  
PENGENDALIAN EMISI GAS BUANG

B. Ketua Tim Peneliti Pengusul (TPP)

- |                           |                                 |
|---------------------------|---------------------------------|
| a. Nama Lengkap dan Gelar | : Nita Aryanti, ST, MT          |
| b. Jenis Kelamin          | : L / P                         |
| c. Pangkat/ Golongan/ NIP | : Penata Muda/ IIIA/132 258 045 |
| d. Bidang Keahlian        | : Komputasi Proses Membran      |
| e. Fakultas/ Jurusan      | : Teknik / Teknik Kimia         |
| f. Perguruan Tinggi       | : Universitas Diponegoro        |

Ketua Tim Peneliti Mitra (TPM)

- |                           |                                    |
|---------------------------|------------------------------------|
| a. Nama Lengkap dan Gelar | : Dr. Ir. I Gede Wenten, MSc.      |
| b. Jenis Kelamin          | : L / P                            |
| c. Pangkat/ Golongan/ NIP | : Penata / IIIC/132 149 432        |
| d. Bidang Keahlian        | : Teknologi Membran                |
| e. Fakultas/ Jurusan      | : Teknologi Industri/ Teknik Kimia |
| f. Perguruan Tinggi       | : Institut Teknologi Bandung       |

C. Tim Peneliti

| NAMA                           | BIDANG KEAHLIAN      | FAKULTAS/<br>JURUSAN             | PERGURUAN<br>TINGGI        |
|--------------------------------|----------------------|----------------------------------|----------------------------|
| 1. Heru Susanto, ST, MT        | Teknologi Membran    | Teknik / Teknik Kimia            | Universitas Diponegoro     |
| 2. Ir. Budiyono, MSi           | Pengolahan Limbah    | Teknik / Teknik Kimia            | Universitas Diponegoro     |
| 3. Dr. Ir. Mubiar Purwasasmita | Hidrodinamika Fluida | Teknologi Industri/ Teknik Kimia | Institut Teknologi Bandung |

D. Pendanaan dan Jangka Waktu Penelitian

- Jangka Waktu Penelitian yang diusulkan : 2 tahun  
Biaya total yang diusulkan : Rp 150.831.750,00  
Biaya yang disetujui tahun I : Rp. 69.000.000,-

Semarang, 7 November 2003

Ketua Tim Peneliti Pengusul,

  
(Nita Aryanti, ST, MT)  
NIP. 132 258 045



## RINGKASAN

Sebagian besar produksi energi dunia, kurang lebih 89%, diperoleh dari pembakaran bahan bakar fosil seperti minyak, batubara dan gas alam. Pembakaran bahan bakar tersebut merupakan sumber utama timbulnya persoalan lingkungan seperti hujan asam, kabut fotokimia, dan perusakan ozon. Teknik yang sering digunakan untuk pengolahan gas buang khususnya  $\text{SO}_2$  adalah adsorpsi dan scrubbing. Teknik-teknik ini umumnya memerlukan ruang yang besar untuk pengoperasiannya dan biaya investasi yang tinggi. Selain itu penerapan teknik ini juga dibatasi oleh masalah-masalah teknis seperti *loading*, *flooding* dan *entrainment*. Untuk mengatasi masalah tersebut, dikembangkan suatu proses berbasiskan membran menggunakan kontaktor membran untuk pengendalian emisi gas buang.

Secara umum tujuan penelitian ini adalah meningkatkan kinerja kontaktor membran untuk pengendalian emisi gas buang melalui disain dan pabrikasi modul membran hollow fiber transversal. Secara khusus, tujuan penelitian tahun pertama adalah studi karakterisasi membran, studi stabilitas membran, pemodelan peristiwa perpindahan pada kontaktor membran dan pembuatan prototipe kontaktor membran longitudinal untuk pengendalian emisi gas buang. Studi karakterisasi membran meliputi ukuran pori, porositas, distribusi pori. Untuk mengetahui ukuran pori dan porositas digunakan metode bubble point, untuk mengetahui distribusi pori digunakan kombinasi metode bubble point dan etode permeabilitas dan untuk mengetahui geometri pori digunakan *Scanning Electron Microscopy*. Studi stabilitas membran dilakukan untuk mengetahui stabilitas membran terhadap bahan kimia, pH, temperatur dan gaya mekanik. Studi karakterisasi dan stabilitas membran dilakukan untuk dua jenis membran komersial Polipropilen dan Polietersulfon. Pemodelan kontaktor membran dilakukan dengan menyusun persamaan dua dimensi momentum dan konsentrasi. Hollow fiber dimodelkan sebagai silinder dengan dinding porous dengan pendekatan model Darcy dan Brinkman-Darcy. Penyelesaian model dilakukan secara numerik menggunakan Metode Volume Hingga.

Hasil yang diperoleh untuk karakterisasi membran menunjukkan bahwa ukuran pori, distribusi pori, maupun geometri pori untuk Polietersulfon (PES) dan Polipropilen (PP) memenuhi kriteria untuk digunakan sebagai kontaktor membran. Pengujian stabilitas terhadap kedua jenis membran menunjukkan bahwa kedua jenis membran menunjukkan ketahanan yang baik terhadap bahan kimia dan pH. Kedua jenis membran juga mempunyai tekanan maksimum yang diperbolehkan sebesar 3 bar. Sedangkan pengujian ketahanan terhadap temperatur menunjukkan bahwa membran Polipropilen mempunyai ketahanan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan Polietersulfon.

Hasil yang diperoleh adalah profil distribusi aliran dan profil distribusi konsentrasi. Dari validasi yang dilakukan diperoleh hasil bahwa model Brinkman-Darcy lebih sesuai untuk pendekatan kontaktor membran *hollow fiber*.

Dari hasil perbandingan antara kontaktor membran dengan scrubber konvensional, dapat diketahui bahwa kontaktor membran lebih efektif dalam pengurangan volume scrubber konvensional. Penggunaan kontaktor membran akan mengurangi volume alat sampai 27 kali lebih kecil.

## SUMMARY

Most of world energy production, approximately of 89 % is produced from fossil fuel combustion such as oil, coal and natural gas. Combustion of these fossil fuel are main sources of environmental problems i.e. acid rain, photochemical smog and ozone depletion. Techniques to remove flue gas especially for  $\text{SO}_2$  are absorption and stripping. These conventional techniques have huge space requirement and high investment cost. Moreover, conventional scrubber is limited with loading, flooding and entrainment limitation. To cope with the disadvantages, a new technology based on membrane process called membrane contactor has been developed.

The objectives of the research is to improve performance of membrane contactor for flue gas cleaning through design and fabrication of transversal hollow fiber membran module. The first year aim of the research are to study membrane characterization, membrane stability and modeling of membrane contactor. The study of membrane characterization covers pore diameter, porosity, pore structure and pore distribution. In order to obtain membrane characterization, bubble ppoint method, combination of bubble point and permeability and Scanning Electron Microscopy have been used to determine pore diameter, porosity, pore structure and pore distribution, respectively. Study of membrane stability was conducted to understand membran stability toward pH, chemicals, temperature as well as mechanical force. Study of characterization and stability were carried out using two kinds of comersial membranes, Polypropylene (PP) and Polyetersulfone (PES). Modeling of membrane contactor was performed to predict velocity and concentration profile. Models were expressed by arranging momentum and mass trasnver equations and considering a hollow fiber as cylindrical having porous media determined by Darcy and Brinkman-Darcy model. The equations were solved numerically using Finite Volume Method.

The characterization results show that pore diameter, porosity, pore distribution and pore geometry for Polypropylene (PP) and Polyetersulfone membrane are suitable for membrane contactor criteria. The stability testing of PP and PES result on good chemical stability and pH. In addition, both of membranes have maximum pressure of 3 bars. However, Polypropylene membrane has higher temperature stability than Polyetersulfone. The results of modeling membrane contactor show that Brinkman-Darcy Porous Medium Model has a good agreement with experimental data for both velocity and concentration profile. According to the comparison of membrane contactor and conventional scrubber, It was clearly shown that membrane contactor could reduce contactor volume of 27 times lower than the conventional one.

## PRAKATA

Puji syukur kehadirat Allah SWT, atas terselesaikannya penulisan laporan penelitian iHibah Pekerti ni. Penelitian ini berjudul "**Pengembangan Kontaktor Membran Hollow Fiber untuk Pengendalian Emisi Gas Buang**". Secara umum penelitian ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja kontaktor membran hollow fiber melalui desain dan fabrikasi modul membran transversal.

Ucapan terimakasih disampaikan pada Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Departemen Pendidikan Nasional yang telah membiaya penelitian ini dan semua pihak yang membantu pelaksanaan penelitian ini.

Kritik dan saran untuk perbaikan laporan ini sangat diharapkan. Akhir kata semoga penelitian ini bermanfaat bagi yang membutuhkan.

Peneliti

## DAFTAR ISI

|                                             | <b>Halaman</b> |
|---------------------------------------------|----------------|
| Lembar Identitas dan Pengesahan             | ii             |
| Ringkasan                                   | iii            |
| Summary                                     | v              |
| Prakata                                     | vi             |
| Daftar Tabel                                | viii           |
| Daftar Gambar                               | ix             |
| Daftar Lampiran                             | x              |
| I. PENDAHULUAN                              | 1              |
| II. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN           | 3              |
| III. TINJAUAN PUSTAKA                       | 4              |
| IV. METODOLOGI PENELITIAN                   | 14             |
| V. HASIL DAN PEMBAHASAN                     | 23             |
| VII. KESIMPULAN DAN SARAN                   | 38             |
| VIII. RENCANA/ PENELITIAN TAHAP SELANJUTNYA | 39             |
| A. TUJUAN KHUSUS                            | 39             |
| B. METODE                                   | 39             |
| C. JADWAL KERJA                             | 40             |
| DAFTAR PUSTAKA                              | 42             |
| LAMPIRAN                                    |                |

## DAFTAR TABEL

|                                                                                         | Halaman |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Tabel 5.1. Karakteristik Membran                                                        | 23      |
| Tabel 5.2. Kestabilan Membran Polipropilen                                              | 28      |
| Tabel 5.3. Hasil pengujian stabilitas membran terhadap temperatur                       | 28      |
| Tabel 5.4. Hasil Pengujian Stabilitas Membran Terhadap Tekanan                          | 29      |
| Tabel 5.5. Parameter yang Digunakan dalam Pemodelan                                     | 30      |
| Table 5.6. Spesifikasi membran yang digunakan oleh Pangrle, dkk.                        | 31      |
| Tabel 5.7. Perbandingan Kontaktor Membran Hollow Fiber dan Packed Column                | 36      |
| Tabel 5.8. Analisis dimensi Kontaktor untuk scrubber konvensional dan Kontaktor Membran | 37      |
| Tabel 7.1. Jadwal Kerja Tahun Kedua                                                     | 41      |

## DAFTAR GAMBAR

|                                                                                                                                                        | Halaman |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| Gambar 3.1. Modul Hollow Fiber                                                                                                                         | 12      |
| Gambar 4.1 Skematik Metodologi Penelitian                                                                                                              | 14      |
| Gambar 4.2. Prinsip Metode Bubble Point                                                                                                                | 16      |
| Gambar 4.3 Alat Karakterisasi Hasil Pengembangan                                                                                                       | 17      |
| Gambar 4.4. Skema Pembagian daerah komputasi pada satu <i>fiber</i>                                                                                    | 20      |
| Gambar 4.5. Rancangan Prototipe Kontaktor Membran untuk Pengendalian Emisi Gas Buang                                                                   | 22      |
| Gambar 5.1. Hubungan tekanan terhadap radius pori                                                                                                      | 24      |
| Gambar 5.2 Pengaruh Tekanan Terhadap Radius Pori dengan Tegangan Permukaan yang Berbeda                                                                | 24      |
| Gambar 5.3. Hubungan permeabilitas terhadap radius pori untuk tegangan permukaan yang berbeda.                                                         | 25      |
| Gambar 5.4. Distribusi pori terhadap radius pori untuk permeabilitas yang berbeda                                                                      | 25      |
| Gambar 5.5 Distribusi Jumlah pori Terhadap Radius Pori                                                                                                 | 26      |
| Gambar 5.6 Hasil SEM dengan Perbesaran 3500 x                                                                                                          | 26      |
| Gambar 5.7 Hubungan Antara kg, km dan kl pada berbagai variasi temperatur                                                                              | 29      |
| Gambar 5.8 Perbandingan antara Data eksperimen dan Model Menggunakan Pendekatan Persamaan Brinkman-Darcy                                               | 31      |
| Gambar 5.9 Prediksi profil aliran arah aksial dengan model aliran Darcy dan Brinkman-Darcy pada $z = 0.25$ m, $U_0 = 0.008$ m/s                        | 32      |
| Gambar 5.10 Prediksi kecepatan aliran arah radial menggunakan model Brinkman-Darcy and Darcy pada $z = 0.25$ m, $U_0 = 0.008$ m/s                      | 32      |
| Gambar 5.11. Perbandingan antara model dan eksperimen untuk berbagai variasi gas pada bagian lumen, $z = 0.25$ m dengan konsentrasi sorben 0.256 mol/L | 33      |
| Gambar 5.12 Prediksi Profil Konsentrasi pada arah radial menggunakan model aliran Darcy dengan $U_0 = 0.8$ m/s                                         | 34      |
| Gambar 5.13 Prediksi Profil Konsentrasi pada arah radial menggunakan model aliran Brinkman-Darcy dengan $U_0 = 0.8$ m/s                                | 34      |
| Gambar 5.14 Prediksi Profil Konsentrasi pada arah aksial menggunakan Model aliran Darcy pada $U_0 = 0.8$ m/s                                           | 35      |
| Gambar 5.15 Prediksi Profil Konsentrasi pada arah aksial menggunakan Model aliran Brinkman-Darcy pada $U_0 = 0.8$ m/s                                  | 35      |

## **DAFTAR LAMPIRAN**

|                                                                                                                                             | <b>Halaman</b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Lampiran 1. Publikasi di Jurnal Teknik Kimia Indonesia Vol II No 1<br>Juni 2003                                                             | L - 1          |
| Lampiran 2. Prototipe Kontaktor Membran untuk pengendalian Emisi Gas Buang<br>yang telah Dibuat di Laboratorium Tim Peneliti Pengusul (TPP) | L - 2          |
| Lampiran 3. Program Komputer Menggunakan Bahasa Pemrograman<br>FORTRAN                                                                      | L - 3          |

## I. PENDAHULUAN

### 1.1. Pentingnya atau Keutamaan Rencana Penelitian

Sebagian besar produksi energi dunia, kurang lebih 89%, diperoleh dari pembakaran bahan bakar fosil seperti minyak, batubara dan gas alam. Proses pembakaran ini menghasilkan gas buang yang sangat mencemari udara. Gas hasil pembakaran yang menjadi sumber polusi udara terutama adalah karbon dioksida ( $\text{CO}_2$ ), karbon monoksida (CO), hidrokarbon (HC), oksida nitrogen ( $\text{NO}_x$ ), oksida belerang ( $\text{SO}_x$ ) dan partikulat. Selain dari sisi kimiawinya, gas buang hasil pembakaran juga mengakibatkan polusi dari panas yang diemisikan karena temperatur gas buang umumnya berkisar antara 95-115°C. Pembakaran bahan bakar tersebut merupakan sumber utama timbulnya persoalan lingkungan seperti hujan asam, kabut fotokimia, dan perusakan ozon. Untuk mengatasi persoalan ini, pemerintah mengeluarkan berbagai peraturan standar emisi gas buang, diantaranya Kep-02/MENKLH/I/1998 tentang baku mutu udara ambien dan Kep-13/MENLH/3/1995 tentang baku mutu emisi  $\text{SO}_2$ .

Teknik yang sering digunakan untuk pengolahan gas buang khususnya  $\text{SO}_2$  adalah adsorpsi dan scrubbing. Pemisahan terjadi melalui fenomena fisik dan dapat dipercepat dengan reaksi menggunakan pelarut tertentu atau dengan tekanan tinggi. Teknik-teknik ini umumnya memerlukan ruang yang besar untuk pengoperasiannya dan biaya investasi yang tinggi. Selain itu penerapan teknik ini juga dibatasi oleh masalah-masalah teknis seperti *loading*, *flooding* dan *entrainment* [1,2]. Proses menggunakan membran dianggap sebagai alternatif yang menarik untuk mengurangi kadar  $\text{SO}_x$  dan  $\text{NO}_x$  pada gas buang. Keuntungan utama dalam penggunaan kontaktor membran adalah berkurangnya volume kontaktor yang digunakan dan juga menyebabkan berkurangnya investasi dan biaya operasi. Operasi dari kontaktor membran dapat dengan mudah diadaptasi dan diubah ke kondisi pabrik.

Penggunaan membran untuk proses pembersihan gas buang diawali dengan pemakaian membran mikroporous sebagai alat kontak. Zang dan Cussler (1985) [3] menggunakan membran *hollow fiber* hidrofobik untuk memisahkan zat terlarut yang mudah menguap dari larutan. Dalam penelitian tersebut dipelajari perpindahan massa cair-gas dengan reaksi kimia pada modul *hollow fiber* menggunakan membran mikroporous hidrofobik. Disamping itu, membran mikroporous dapat digunakan sebagai kontaktor gas-cair untuk memisahkan suatu komponen gas dari fasa gasnya. Proses membran seperti ini disebut dengan kontaktor membran.

### 1.2. Lingkup Penelitian

Teknik yang sering digunakan untuk pengolahan gas buang khususnya  $\text{SO}_2$  adalah adsorpsi dan scrubbing. Pemisahan terjadi melalui fenomena fisik dan dapat dipercepat dengan reaksi

menggunakan pelarut tertentu atau dengan tekanan tinggi. Teknik-teknik ini umumnya memerlukan ruang yang besar untuk pengoperasiannya dan biaya investasi yang tinggi. Selain itu penerapan teknik ini juga dibatasi oleh masalah-masalah teknis seperti *loading*, *flooding* dan *entrainment* [1,2]. Proses menggunakan membran dianggap sebagai alternatif yang potensial untuk mengurangi kadar SO<sub>x</sub> dan NO<sub>x</sub> pada gas buang. Keuntungan utama dalam penggunaan kontaktor membran adalah berkurangnya volume kontaktor yang digunakan dan juga menyebabkan berkurangnya investasi dan biaya operasi. Lebih lanjut, operasi dari kontaktor membran dapat dengan mudah diadaptasi dan diubah ke kondisi pabrik. Pada penelitian ini untuk meningkatkan kinerja kontaktor membran akan dirancang dan dipabrikasi disain modul yang dapat meningkatkan koefisien perpindahan massa. Tipe modul membran yang akan dirancang dan dipabrikasi adalah modul transversal. Dengan menggunakan modul transversal aliran umpan akan tegak lurus terhadap fiber di dalam modul membran, sehingga peristiwa channeling dapat dihindari serta dapat meningkatkan turbulensi aliran.

Namun demikian, pabrikasi modul hollow fiber transversal tidaklah mudah dan membutuhkan teknik dan peralatan yang komprehensif. Pada penelitian ini akan dilakukan studi pembuatan dan pengujian kinerja modul membran transversal. Lebih spesifik penelitian ini akan melakukan kajian fluks SO<sub>2</sub> dengan berbagai laju alir dari sorben dan gas dengan menggunakan modul transversal. Larutan sorben yang digunakan adalah Natrium sulfit.

### 1.3. Hasil yang Diharapkan

Beberapa penelitian mengenai penggunaan kontaktor membran untuk pengendalian emisi gas buang telah banyak dijumpai. Namun demikian penelitian-penelitian tersebut dilakukan dengan menggunakan konfigurasi modul membran longitudinal. Pada penelitian ini akan digunakan konfigurasi modul membran transversal. Dengan penggunaan modul jenis ini diharapkan kinerja kontaktor membran dapat ditingkatkan melalui peningkatan koefisien perpindahan massa. Selain itu, dengan modul transversal peristiwa *channeling* yang dapat menurunkan kinerja kontaktor membran dapat dihindari.

## **II. TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN TAHUN KE-1**

### **2.1. Tujuan Penelitian Tahun Pertama**

Secara umum tujuan penelitian ini adalah meningkatkan kinerja kontaktor membran untuk pengendalian emisi gas buang melalui desain dan pabrikasi modul membran hollow fiber transversal. Secara khusus, tujuan penelitian tahun pertama adalah:

1. Studi karakterisasi membran
2. Studi stabilitas membran
3. Pemodelan peristiwa perpindahan pada kontaktor membran
4. Pembuatan prototipe kontaktor membran longitudinal untuk pengendalian emisi gas buang

### **2.2. Manfaat Penelitian Tahun Pertama**

Manfaat penelitian tahun pertama adalah :

1. Mengetahui karakterisasi membran pada kontaktor membran untuk pengendalian emisi gas buang.
2. Pengetahuan tentang material membran pada kontaktor membran untuk pengendalian emisi gas buang.
3. Mengetahui fenomena yang terjadi pada kontaktor membran.
4. Aplikasi kontaktor membran untuk pengendalian emisi gas buang menggantikan proses-proses konvensional.

### III. TINJAUAN PUSTAKA

#### 3.1. Penelitian Terdahulu

Iversen,dkk,1997 [4] mengadakan penelitian tentang metode pemilihan membran yang digunakan dalam kontaktor membran untuk desulfurisasi gas buang. Mekanisme perpindahan massa untuk difusi SO<sub>2</sub> melalui mekanisme gas mengisi pori (*gas filled pore*) dapat dilakukan dengan pengukuran yang sederhana dan digunakan untuk mengidentifikasi struktur membran yang tepat pada kontaktor membran untuk pembersihan gas buang. Dengan hubungan korelasi porositas-tortuositas dari struktur porous dan korelasi empirik sifat-sifat fisik intrinsik membran, dapat dihasilkan korelasi koefisien perpindahan massa dengan sifat-sifat fisik intrinsik membran secara eksperimental. Dengan demikian, batasan fluks dapat diprediksi dengan akurasi data yang tepat dari data katalog.

Yang dan Cussler,1986 [5] mempelajari penghilangan oksigen dari air dengan pengembangan persamaan modul hollow fiber dan telah menguji koefisien perpindahan massa dalam sembilan modul *hollow fiber* yang bervariasi. Hasilnya menunjukkan bahwa aliran gas di luar dan memotong *fiber* minimal sepuluh kali lebih efektif daripada aliran gas diluar dan sejajar *fiber* dan sekitar lima kali lebih efektif daripada aliran gas di dalam *fiber*. Dari penelitian tersebut juga dapat disimpulkan bahwa tahanan membran tidak mempengaruhi perpindahan massa.

Roberts, 1980 [6,7] telah mempelajari absorpsi SO<sub>2</sub> dengan larutan sulfit menggunakan modul laboratorium *shell and tube* dengan fiber sepanjang 23 cm. Mereka mendapatkan hasil bahwa dengan aliran gas di dalam dan laju alir gas dalam rentang 3-8 m/s, penghilangan SO<sub>2</sub> dapat mencapai 99,5 % (pada konsentrasi gas masuk 1500 ppm).

Zhang dan Cussler,1985 [3,8,9] mempelajari perpindahan massa gas-cair dengan reaksi kimia dalam modul hollow fiber menggunakan membran polipropilen mikroporous yang bersifat tidak terbasahi (*non wetted membrane*). Dalam penelitian tersebut dilakukan pengukuran koefisien perpindahan massa overall untuk penyerapan H<sub>2</sub>S, CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> dan NH<sub>3</sub> dari campuran gas dengan larutan encer NaOH, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> atau amina. Untuk reaksi yang cepat seperti H<sub>2</sub>S, SO<sub>2</sub> dan NH<sub>3</sub> disimpulkan bahwa tahanan perpindahan massa pada membran mengendalikan kecepatan perpindahan massa overall. Untuk absorpsi CO<sub>2</sub> yang lebih lambat, tahanan pada sisi cairan juga berpengaruh pada kecepatan perpindahan massa. Dalam semua kasus, kecepatan perpindahan massa volumetrik meningkat 10 kali dibandingkan *scrubber* konvensional karena adanya *packing density* pada kontaktor membran.

Kreulan dkk (1993 a,b) [10,11] melakukan penelitian tentang penyerapan CO<sub>2</sub> dalam campuran air/gliserol menggunakan hollow fiber dengan porositas 3% (PS) dan 70%. Dalam penelitian ini pengaruh fasa gas diabaikan. Koefisien perpindahan massa overall sangat

dipengaruhi oleh hidrodinamika dalam fasa cairan dan tidak ada perbedaan koefisien perpindahan massa selama penelitian. Selain itu juga diteliti tentang perpindahan massa dengan reaksi kimia untuk meningkatkan absorpsi. Penelitian dilakukan dengan  $\text{CO}_2$  dan  $\text{H}_2\text{S}$  dalam larutan NaOH. Koefisien perpindahan massa sangat ditentukan oleh tahanan dalam fasa gas dan membran. Kenaikan koefisien perpindahan massa pada fasa gas lebih dari dua kali koefisien perpindahan massa pada membran tetapi tidak memberikan pengaruh yang signifikan pada membran dan menunjukkan koefisien perpindahan massa yang lebih rendah.

Rangwala,1996 [12] mempelajari absorpsi  $\text{CO}_2$  dalam larutan encer menggunakan modul membran hollow fiber (HFMM). Dalam studi ini digunakan dua HFMM komersial (diameter 0,0254 m dan panjang 0,20 m serta diameter 0,051 m dan panjang 0,61 m). Absorben yang digunakan adalah air, NaOH encer dan larutan encer dietanolamina. Korelasi untuk memprediksi koefisien perpindahan massa gas dan cair juga dikembangkan dalam studi ini. Korelasi ini dapat digunakan untuk memperkirakan kecepatan perpindahan massa HFMM 0,051. Selain itu juga dihasilkan luas permukaan kontak efektif sebesar  $2324 \text{ m}^2/\text{m}^3$  untuk HFMM 0,0254 m dan  $870 \text{ m}^2/\text{m}^3$  untuk HFMM 0,0510 m.

Rogers,dkk,1997 [13] menjelaskan suatu model untuk mengevaluasi dan memprediksi performance kontaktor membran hollow fiber untuk ekstraksi komponen dengan reaksi kimia. Model berdasarkan pada pendekatan teori film dikombinasikan dengan faktor-faktor penunjang lainnya. Koefisien perpindahan massa dihitung dengan pengaruh korelasi dan reaksi kimia. Distribusi aliran pada sisi *shell* yang disebabkan karena *packing fiber* yang acak dalam modul dapat diprediksi dengan metode Voronoi tessellation dan faktor friksi-Re. Model diverifikasi dengan data eksperimen ekstraksi uranil nitrat dari larutan asam encer dalam ekstraktan TBP/DIPB. Model tersebut tidak hanya mengkorelasikan data eksperimental dengan baik, tetapi juga dapat menjamin prediksi desain yang akurat dan informasi analisis sistem yang baik.

Viegas dkk, 1998 [14] menjelaskan metodologi *Wilson-plot* untuk memperoleh korelasi perpindahan massa. Metodologi ini dievaluasi dari proses ekstraksi membran dengan kontaktor membran hollow fiber. Dalam penelitian ini juga diberikan metode alternatif untuk memperoleh korelasi perpindahan massa. Metodologi perhitungan satu tahap tersebut menjamin pendekatan yang lebih sesuai dan kesalahan yang kecil dibandingkan dengan parameter yang diperkirakan.

Coker,dkk,1998 [15] mengembangkan model untuk pemisahan gas multikomponen menggunakan kontaktor membran hollow fiber. Model yang dikembangkan merupakan hasil simulasi dari pola aliran *co current*, *counter current* dan *crossflow* dengan *purging permeat*. Hasil simulasi menunjukkan pemisahan campuran gas multikomponen yang signifikan menggunakan sifat-sifat permeasi polimer yang sama dengan polisulfon. Pengaruh *purging*

permeat pada karakteristik pemisahan juga dilakukan untuk pemisahan udara. Pada pemisahan udara, *purgung* permeat dengan fraksi aliran residu yang rendah menghasilkan metode yang efektif untuk peningkatan efisiensi modul untuk pengeringan tetapi tidak efisien untuk peningkatan kemurnian nitrogen atau *recovery* nitrogen. Dalam campuran multikomponen, komposisi maksimal dari komponen permeabilitas intermediet bisa dinyatakan sebagai fungsi jarak sepanjang hollow fiber.

US Patents 5,749,941 oleh Jansen, dkk [16] menjelaskan tentang penyerapan satu atau lebih komponen gas dari fasa gas. Gas dikontakkan dengan fasa cair, dimana fasa gas dan cairan dipisahkan dengan membran hidrofobik dari bahan politetrafluoroetilen. Dalam paten tersebut dijelaskan tiga aspek yang diperlukan. Aspek pertama adalah fasa cair yang terdiri dari air dan air misible dan/ atau sorben yang larut dalam air. Yang kedua, adalah fasa cair yang terdiri dari larutan encer dari asam amino yang larut dalam air atau garam seperti taurin dan turunannya. Sedangkan aspek ketiga adalah fasa cairan yang terdiri dari larutan encer garam fosfat yang larut dalam air. Metode ini merupakan metode yang sesuai untuk penyerapan karbon dioksida.

Penggunaan kontaktor membran juga telah dipelajari dalam laboratorium-laboratorium membran. Misalnya ekstraksi cair-cair untuk ekstraksi logam, obat-obatan, senyawa aromatik, produk fermentasi dan polutan organik [1,16,17,18].

### 3.2. Konsep Kontaktor Membran

Kontaktor membran adalah proses pemisahan menggunakan membran sebagai alat kontak. Ada dua jenis kontaktor membran yaitu kontaktor membran gas-cair dan kontaktor membran cair-cair. Kontaktor membran yang digunakan untuk pengendalian emosi gas buang adalah kontaktor membran gas-cair. Kontaktor membran gas-cair dibagi menjadi 2 proses yaitu proses dimana gas atau uap berpindah dari fasa gas ke fasa cair, dan proses dimana gas atau uap berpindah dari fasa cair ke fasa gas [4]. Pada umumnya, membran yang digunakan dalam kontaktor membran gas-cair adalah membran berpori (*microporous membrane*) dimana membran berfungsi sebagai pembatas antara dua fasa. Jika membran hidrofobik yang digunakan, maka cairan tidak akan membiasahi pori sehingga pori akan diisi oleh gas (*non wetted membrane*). Sebaliknya jika digunakan membran hidrofilik maka cairan akan membiasahi pori sehingga pori akan diisi oleh cairan (*wetted membrane*) [2].

Proses perpindahan suatu molekul atau partikel di dalam membran disebabkan adanya gaya yang bekerja pada molekul atau partikel tersebut. Pada proses kontak, gaya dorong yang terjadi disebabkan oleh adanya beda konsentrasi. Dalam kontaktor membran, jika komponen i berpindah dari fasa gas ke fasa cair, ada tiga tahap perpindahan yang harus dilalui yaitu perpindahan dari fasa gas ke membran, difusi melewati membran, diikuti dengan perpindahan dari membran ke fasa cair [2].

Karena ada tiga tahap perpindahan, maka fluks SO<sub>2</sub> pada kontaktor membran juga dibagi dalam tiga daerah perpindahan massa yaitu lapisan film gas, membran mikroporous, dan lapisan film sorben.

### Perpindahan Massa

Komponen SO<sub>2</sub> yang berdifusi dalam lapisan tipis gas, membran mikroporous hidrofob, dan dalam lapisan tipis sorben. Fluks spesi SO<sub>2</sub> dapat dinyatakan dalam tiga daerah

$$J_{SO_2} = K_g (C_{SO_2}^g - C_{SO_2}^{memb1}) = K_m (C_{SO_2}^{memb1} - C_{SO_2}^{memb2}) = \frac{K_t}{H_{SO_2}} (C_{SO_2}^{memb2} - C_{SO_2}^t) \quad (1)$$

$$J_{SO_2} = K_{og} (C_{SO_2}^g - C_{SO_2}^t) \quad (2)$$

K<sub>og</sub> adalah koefisien perpindahan massa total. Tahanan total pada kontaktor membran bersumber dari tahanan pada gas, tahanan pada membran, dan tahanan pada sorben. Berbeda dengan tahanan pada alat absorpsi konvensional, di mana tahanannya hanya berasal dari tahanan pada gas dan sorben.

### Hambatan pada Gas Boundary Layer

Hambatan pada fasa gas ditimbulkan oleh lapisan batas gas di sisi antarfasa. Hambatan perpindahan massa ini dipengaruhi oleh hidrodinamika (difusi-konveksi) dan sifat-sifat fisik gas. Aliran dalam sistem kontaktor membran biasanya terjadi dalam rentang bilangan Reynolds yang amat rendah, sehingga analogi dari persamaan yang sudah dikembangkan untuk perpindahan panas pada aliran laminer dapat diambil. Adapun persamaan umum yang menggambarkan perpindahan massa untuk berbagai kontaktor adalah sebagai berikut [4]:

$$Sh = a Re^b Sc^c (D_h / L)^d \quad (3)$$

di mana Sh adalah Sherwood Number yang mengandung variabel koefisien perpindahan massa, k, dan difusivitas, D; Re adalah Reynolds Number yang mengandung variabel sifat fisik fluida yaitu viskositas dan densitas, eksponen b yang menyertainya menggambarkan rejim aliran (turbulen/laminer); serta Sc adalah Schmidt Number yang juga mengandung variabel difusivitas; sedangkan faktor terakhir mengandung variabel linier yang menggambarkan kondisi fisik modul.

Koefisien transfer massa pada fasa gas dapat diprediksi dengan berbagai persamaan empirik yang khusus untuk kontaktor dan konfigurasi aliran tertentu, masing-masing dalam rentang validitas tertentu pula. Untuk kontaktor membran, persamaan yang sudah ada adalah untuk konfigurasi aliran gas di dalam, di luar, dan tegak lurus hollow fiber. Kesimpulan yang dapat diambil dari berbagai hasil perhitungan ini adalah kontaktor membran dapat meningkatkan fluks pervolume kontaktor bukan hanya karena luas permukaan kontak yang lebih tinggi, tetapi juga karena dapat meningkatkan koefisien perpindahan massa dengan suatu desain aliran tertentu.

## Hambatan pada Membran

Pada mode operasi pori membran terisi gas, koefisien perpindahan massa di dalam membran tergantung pada rejim difusi gas di pori membran, dan hambatan perpindahan massa timbul dari gas yang terperangkap di dalam membran dan dari struktur membran itu sendiri. Perpindahan massa lewat pori terisi gas mencakup difusi dan konveksi. Hambatan yang timbul dari gas yang terperangkap dimodelkan dengan model difusi molekular biasa, sedangkan pengaruh struktur membran dimodelkan dengan model difusi Knudsen dan difusi aliran viscous. Fluks yang bersifat difusi (misalnya dari difusi molekular biasa dan difusi Knudsen) terjadi karena satu atau lebih spesies mempunyai kecepatan molekular lebih besar daripada kecepatan molekular rata-rata di dalam gas, dan pemisahan terjadi dalam jalur difusi yang cukup panjang, sedangkan fluks viscous terjadi di mana semua spesies mempunyai kecepatan molekular yang sama, dan tidak terjadi pemisahan [4].

Difusi molekular biasa terjadi oleh karena adanya tumbukan-tumbukan antarmolekul yang dominan. Ini adalah kasus kondisi isobarik di mana diameter pori jauh lebih besar dibandingkan dengan panjang rata-rata *free path*. Fluks akibat difusi molekular biasa mengikuti persamaan [5]:

$$N_A = \frac{\epsilon \cdot PD_{AB} (P_{A1} - P_{A2}) 2\pi \cdot L}{\tau \cdot P_{BM} RT \ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (4)$$

di mana  $D_{AB}$  adalah difusivitas biner gas, nilai dari difusivitas dalam penelitian ini yaitu difusivitas  $\text{SO}_2$  terhadap  $\text{N}_2$  dihitung dengan persamaan-persamaan sebagai berikut [19]:

$$\frac{PD_{AB}}{(P_{CA} P_{CB})^{1/3} (T_{CA} T_{CB})^{5/12} \left( \frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2}} = 2,745 \cdot 10^{-4} \left( \frac{T}{\sqrt{T_{CA} T_{CB}}} \right)^{1,823} \quad (5)$$

diperoleh  $D_{AB} = 1,274 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , lalu [6] :

$$D_{AB} = \frac{1,8583 \cdot 10^{-7} T^{3/2}}{P \sigma_{AB}^2 \Omega_{D,AB}} \left( \frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2} \quad (\text{Chapman \& Enskog}) \quad (6)$$

diperoleh  $D_{AB} = 1,276 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ , dan [6] :

$$D_{AB} = \frac{10^{-7} T^{1,75} \left( \frac{1}{M_A} + \frac{1}{M_B} \right)^{1/2}}{P \left[ \left( \sum v_A \right)^{1/3} + \left( \sum v_B \right)^{1/3} \right]^2} \quad (\text{Fuller}) \quad (7)$$

menghasilkan  $D_{AB} = 1,331 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ .

Difusi Knudsen terjadi oleh rangkaian tumbukan molekul dengan dinding pori yang lebih dominan dibandingkan tumbukan antar molekul. Difusi Knudsen menjadi mekanisme transpor yang dominan jika perbandingan radius pori membran ( $r_p$ ) dengan *free path* dari gas

( $\lambda$ ) lebih kecil dari satu, dimana koefisien perpindahan massa  $K_{im}$  dinyatakan dalam persamaan berikut [20] :

$$K_{im} = \frac{2r_p}{3} \left\{ \frac{8RT}{\pi M_i} \right\}^{\frac{1}{2}} \frac{\varepsilon_m}{\tau_{ml} t} \quad (8)$$

$\varepsilon$  adalah porositas membran,  $\tau$  adalah tortuosity,  $r_p$  adalah radius pori, dan  $M_i$  adalah berat molekul gas, dan persamaan fluksnya adalah sebagai berikut [20]:

$$J_{ki} = \frac{D_{Ki}}{RT} \frac{dP_i}{dz} \quad (9)$$

dengan  $D_{Ki}$  adalah koefisien difusi Knudsen efektif, yaitu [20] :

$$D_{Ki} = \frac{2}{3} r_p \sqrt{\frac{8RT}{\pi \cdot M_i}} \quad (10)$$

Rata-rata free path dihitung dengan persamaan-persamaan berikut [2,20] :

$$\lambda = \frac{3,2 \mu}{P} \sqrt{\frac{RT}{2\pi \cdot M}} \quad (11)$$

diperoleh  $\lambda = 4,53 \cdot 10^{-8}$  m

$$\lambda = \frac{hT}{\sqrt{2\pi \cdot d^2 P}} \quad (12)$$

diperoleh  $\lambda = 5,06 \cdot 10^{-8}$  m.

Dari kedua hasil ini, dengan rata-rata diameter pori yang dipakai dalam percobaan ini yaitu  $0,2 \mu\text{m}$ , percobaan yang dilakukan berada dalam daerah transisi antara difusi molekular biasa dan difusi Knudsen, sehingga kedua mekanisme harus diperhitungkan.

#### Hambatan pada Liquid Boundary Layer

Koefisien perpindahan massa pada fasa cair merupakan fungsi hidrodinamika dan koefisien distribusi  $\text{SO}_2$  di dalam sorben [21]:

$$k_t = \frac{k_L}{H_{\text{SO}_2}} \quad (13)$$

### 3.3. Pemilihan Membran

Membran mikroporous digunakan secara luas untuk proses pemisahan dan setiap proses pemisahan memerlukan jenis membran tertentu. Berkembangnya membran mikroporous memungkinkan digunakan untuk kontaktor membran.

Kunci penting dalam pemilihan membran untuk kontaktor membran adalah sifat perpindahan dan kestabilan membran yang dihubungkan dengan sifat hidrofob, kimia, termal, dan mekaniknya [2].

#### Sifat Transpor Membran

Parameter membran yang mempengaruhi sifat transpor membran adalah porositas, ketebalan dinding, ukuran pori dan tortuosity.

- Porositas ( $\varepsilon$ )

Porositas membran didefinisikan sebagai fraksi volume pori terhadap volume total membran. Membran mikroporous komersial biasanya memiliki porositas antara 0.3-0.85. Porositas berhubungan dengan kekuatan, biasanya porositas yang tinggi memerlukan ketebalan dinding lebih besar.

- Ketebalan dinding ( $t$ )

Ketebalan dinding sebaiknya tipis, tetapi biasanya disesuaikan dengan kekuatan mekanik yang dibutuhkan. Membran mikroporous biasanya memiliki ketebalan antara 25-500  $\mu\text{m}$ .

- Ukuran pori ( $r_p$ )

Ukuran dari pori antara 0,1-1,0  $\mu\text{m}$ . Ukuran pori yang diukur tergantung teknik pengukurannya. Distribusi ukuran pori dibutuhkan untuk mempengaruhi efisiensi proses.

- Tortuosity ( $\tau$ )

Jarak nyata yang ditempuh molekul melalui membran lebih besar dibandingkan ketebalan membran, ini berhubungan dengan luas penampang pori. Faktor berikut didefinisikan sebagai :

$$\tau = \frac{\text{Jarak nyata yang ditempuh molekul}}{\text{Ketebalan membran}}$$

Membran mikroporous komersial diklasifikasikan sebagai membran simetri, di mana morfologi pori tidak berubah sepanjang membran. Ini tidak sepenuhnya benar, karena antara porositas, tebal dinding, dan ukuran pori kemungkinan bervariasi. Sebagai contoh, porositas 75%, porositas mungkin bervariasi dari 70% pada sisi satu dan 80 % di sisi yang lain.

#### Sifat Hidrofob dan Kestabilan

Membran hidrofob akan mencegah cairan untuk melewati pori, dan pori hanya akan dipenuhi oleh gas. Fenomena permukaan dinyatakan oleh persamaan Young-Laplace [2] :

$$\Delta P = -\frac{\gamma_{lg} \cos \theta}{D_{hp,max}} = -\frac{4B\gamma_{lg} \cos \theta}{D_{p,max}} = \frac{4B(\gamma_{ml} - \gamma_{mg})}{D_{p,max}} \quad (14)$$

dimana,

$\Delta P$  = Breakthrough pressure differential

B = Konstanta geometri pori (1 bila pori berbentuk silinder)

$\gamma_{lg}$  = Tegangan permukaan antarmuka cair-gas

$\gamma_{mg}$  = Tegangan permukaan antarmuka membran-gas

$\gamma_{ml}$  = Tegangan permukaan antarmuka membran-cair

$\theta$  = Sudut kontak antara cairan dan membran

$D_{hp,max}$  = Diameter pori *hydraulik* maksimum

$D_{p,max}$  = Diameter pori maksimum

Persamaan diatas menunjukan bahwa membran tidak akan terbasahi bila sudut kontak lebih dari  $90^\circ$  ( $\gamma_{ml}/\gamma_{mg}$ ) dan dalam kasus pembersihan gas buang dari hasil pembakaran batubara, gas memiliki tekanan atmosfir.

Polimer seperti Teflon (PTFE), Polipropilena (PP), Polivinilflourida (PVDF), dan Polisulfon (PS) memiliki sifat hidrofob yang baik. Beberapa membran diurutkan mulai dari yang paling hidrofob adalah PTFE > PVDF > PP > PS. PTFE, PP, dan PVDF merupakan alternatif yang banyak diperhitungkan karena kestabilan kimia yang mempengaruhi sifat hidrofobnya. Polipropilena bekerja pada rentang temperatur  $50-90^\circ C$  (bergantung pada mutu PP) sedangkan gas buang biasanya memiliki temperatur  $110-150^\circ C$  (setelah melalui sistem pemisah debu), biasanya temperatur diturunkan untuk mencapai kondisi yang optimal [2].

### 3.4. Pemilihan Sorben

Hal penting yang perlu diperhatikan dalam meningkatkan efisiensi kerja kontaktor membran adalah pemilihan sorben. Hal-hal penting yang harus diperhatikan dalam memilih sorben adalah sebagai berikut [21]:

1. Kelarutan gas

Kelarutan gas harus tinggi guna meningkatkan laju absorpsi dan menurunkan jumlah sorben yang diperlukan. Sorben yang memiliki sifat kimia yang sama dengan komponen yang akan diabsorbsi (*solute*) memiliki kelarutan yang baik. Larutan yang terbentuk dari reaksi antara sorben dengan *solute* sebaiknya ideal, sehingga kelarutan tidak berubah seiring dengan perubahan fraksi mol. Disamping itu reaksi juga harus reversibel agar pelarut bisa didaur ulang bila digunakan lagi.

2. Kemudahan untuk menguap (*Volatility*)

Sorben harus memiliki tekanan uap yang rendah.

3. Biaya

Sorben harus murah dan mudah didapat.

4. Viskositas

Disarankan sorben yang memiliki viskositas yang rendah agar laju absorpsi menjadi cepat, penurunan tekanan lebih kecil, dan sifat pindah panas yang baik.

5. Sifat lain yang perlu diperhatikan adalah sifat tidak beracun dan tidak mudah terbakar.

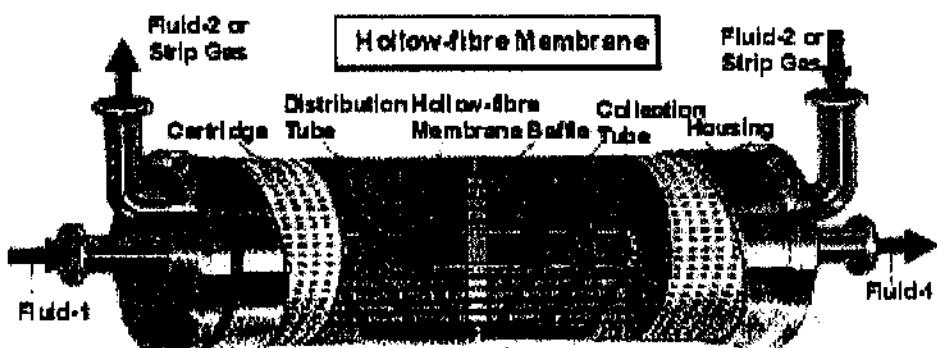
Natrium sulfit ( $Na_2SO_3$ ) digunakan dalam studi ini karena berbagai alasan :

1. Natrium sulfit memiliki kapasitas absorpsi yang lebih tinggi untuk  $SO_2$ , hal ini memungkinkan untuk mengabaikan tahanan pindah massa di dalam fasa cair dengan memilih kondisi operasi yang baik.
2.  $SO_2$  mempunyai kelarutan yang tinggi di dalam larutan  $Na_2SO_3$

3. Proses dengan sulfit bisa didaur ulang kembali, sehingga konsumsi terhadap Natrium sulfit dapat diminimumkan.
4. Sulfit telah digunakan untuk proses-proses sebelumnya sehingga data literatur tersedia.

### 3.5. Modul Hollow Fiber

Modul *hollow fiber* merupakan konfigurasi yang memiliki luas per satuan volume yang paling besar sehingga paling efektif untuk proses pemisahan (bisa mencapai  $30.000 \text{ m}^2 / \text{m}^3$ ) karena memiliki luas pertemuan antar fasa paling besar. Modul *hollow fiber* digunakan bila aliran umpan relatif bersih terutama pada pemisahan gas. Skematik modul membran hollow fiber dapat dilihat pada Gambar 3.1. Adapun keunggulan lain dari modul *hollow fiber* adalah kemudahan *back flushing*, *supporting structure*, dan konsumsi energi rendah [2,22].



Gambar 3.1. Modul *hollow fiber*

*Hollow fiber* biasanya memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan dengan membran datar (*flat membrane*) karena membran datar biasanya dihasilkan lebih tipis dan porous. Parameter yang penting dalam penggunaan *hollow fiber* untuk kontaktor membran adalah tekanan roboh (*Collapse Pressure*) dan tekanan ledak (*Burst Pressure*). Parameter ini tergantung pada diameter dalam *hollow fiber*, ketebalan, dan sifat material seperti *Modulus Young* ( $E$ ), ratio *Poisson* ( $\nu$ ), dan *Yield Stress* ( $\sigma_y$ ). Cabasso [23] menyarankan suatu persamaan tekanan roboh dan ledak :

$$P_c = \frac{2E}{(1-\nu)^2} \frac{(OR - IR)}{((OR + IR))^3} \approx \sigma_y \frac{(OR - IR)}{OR} \quad (15)$$

$$P_b = Sc \frac{(OR - IR)}{OR} \quad (16)$$

Sc adalah tegangan melintang, dalam penggunaan di kontaktor membran antara tekanan roboh dan tekanan ledak harus paling sedikit sama dengan tekanan cairan yang masuk. Untuk keamanan tekanan roboh dan ledak dua kali tekanan cairan yang masuk.

Modul membran hollow fiber dapat dioperasikan dengan dua aliran umpan. Aliran pertama, dikenal sebagai aliran longitudinal dimana umpan dialirkan secara pararel terhadap fiber. Sedangkan yang kedua, umpan dialirkan tegak lurus fiber dan disebut dengan aliran transversal. Kebanyakan modul membran didesain untuk aliran longitudinal karena lebih sederhana. Namun modul longitudinal ini mempunyai kekurangan karena masalah *channeling* terutama untuk diameter fiber yang sangat kecil. Selain itu karena sifat aliran longitudinal, koefisien perpindahan massa yang tinggi susah untuk diperoleh. Knops [24] telah mengadakan penelitian dua jenis modul (aliran) untuk sistem mikrofiltrasi dari polistirena globular. Dari penelitian tersebut diperoleh hasil bahwa modul transversal lebih baik daripada modul longitudinal. Di samping itu. Aliran transversal menghasilkan kenaikan *pressure drop*. Persamaan berikut ini dapat digunakan untuk memprediksi *pressure drop* dalam aliran transversal:

$$\Delta P_{mod} = \left( N/2 \right) \xi \left( \pi^3 Re^2 / 16 \right) \left( \rho v^2 / d^2 \right) \left( l / (s_t/d - \pi/4)^3 \right) \quad (17)$$

$$Re = \rho d v / \mu$$

dan dalam aliran longitudinal, *pressure drop* dihitung dengan persamaan :

$$\Delta P_{mod} = \xi L \rho v^2 / 2 d_i \quad (18)$$

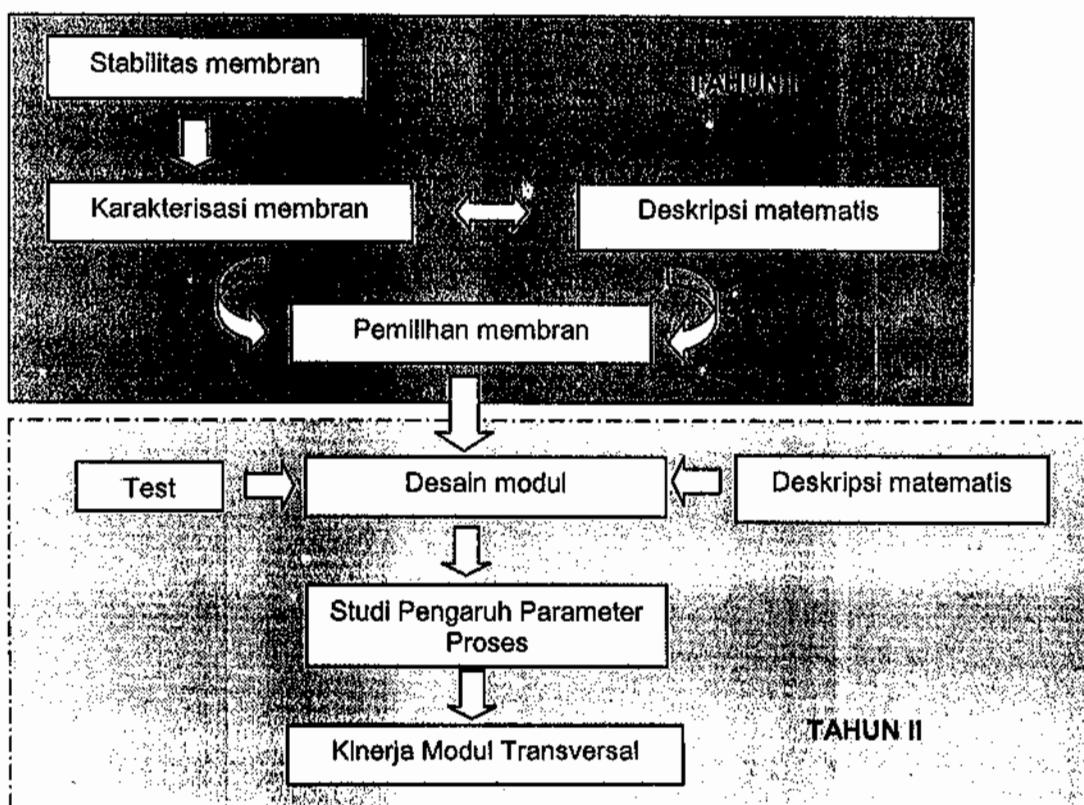
dimana N, Re,  $\mu$ ,  $\rho$ ,  $\xi$ ,  $S_t$ ,  $d$ ,  $v$ , dan  $\nu$  adalah jumlah fiber, bilangan Reynolds, densiti fluida, viskositas fluida, faktor friksi (fungsi Re, dimana  $\xi = Re / 16$ ), jarak *pitch*, diameter luar fiber, viskositas kinematik dan kecepatan linier.

#### IV. METODE PENELITIAN

Pengembangan kontaktor membran hollow fiber untuk pengendalian emisi gas buang akan dilakukan baik secara eksperimen maupun pemodelan. Penelitian akan dilakukan selama dua tahun. Rangkaian penelitian akan dilaksanakan secara bertahap meliputi:

1. Studi karakterisasi membran
2. Studi stabilitas membran
3. Pemodelan peristiwa perpindahan kontaktor membran
4. Perancangan dan pabrikasi modul membran transversal
5. Studi pengaruh parameter proses terhadap laju transfer massa dan hilang tekan

Skematik metodologi penelitian yang akan dilakukan disajikan pada Gambar 4.1.



Gambar 4.1 Skematic Metodologi Penelitian

Penelitian direncanakan dilakukan dalam waktu dua tahun dengan tempat penelitian di institusi TPP dan TPM. Pada tahun pertama beberapa tahapan akan dilakukan di institusi TPM dengan menggunakan peralatan yang telah ada. Secara garis besar jadwal kerja penelitian untuk tahun pertama akan dilakukan sebagai berikut :

## Tahun I

Pada bulan pertama dilakukan set up dan pengecekan alat karakterisasi membran yang terdapat di institusi TPM. Selanjutnya pada bulan kedua dan ketiga dilakukan karakterisasi membran yang meliputi pengukuran porositas, ukuran pori, ketebalan pori dan geometri pori. Studi terhadap stabilitas membran yang meliputi pengujian stabilitas kimia dan stabilitas panas dilakukan pada bulan keempat sampai keenam. Pengujian dilakukan dengan perlakuan membran pada berbagai temperatur dan ketahanan terhadap bahan kimia. Tahapan penelitian selanjutnya yang dilakukan pada bulan keenam sampai ke delapan adalah penentuan koefisien perpindahan massa yang dilakukan bersamaan dengan penyusunan model dan penyelesaian persamaan model. Dari studi ini diharapkan dapat disusun suatu program komputer yang digunakan untuk simulasi numerik. Pada akhir bulan kesembilan semua tahapan penelitian pada tahun pertama telah selesai.

Keterlibatan TPP dan TPM dalam penelitian ini dicapai melalui forum pembimbingan, pengarahan dan konsultasi. Dalam pelaksanaan penelitian ini TPP berperan sebagai eksekutor penelitian sedangkan TPM lebih berperan sebagai pengarah dan pemantau peleksanaan penelitian.

Untuk mendapatkan hasil penelitian yang optimal dan komprehensif akan dilakukan diskusi TPM dan TPP terjadwal secara rutin satu minggu sekali selama TPP berada di institusi TPM. Jika penelitian dilakukan di institusi TPP diskusi akan dilakukan satu bulan satu kali. Selain itu diskusi juga dilakukan sewaktu-waktu baik secara langsung, menggunakan telepon, fax atau pun e-mail.

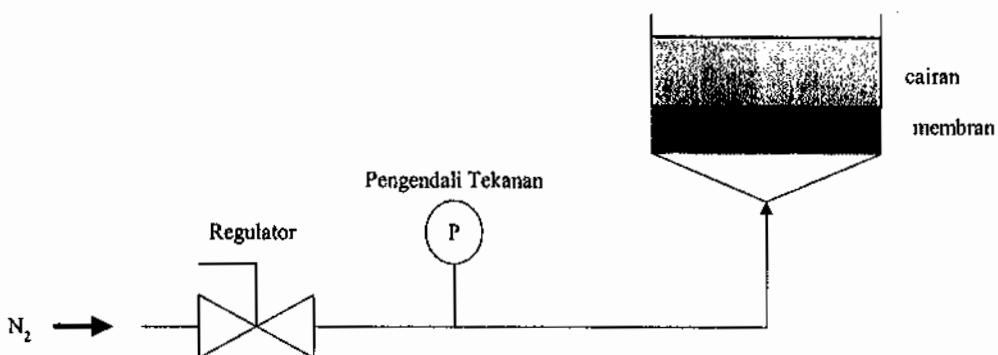
### 4.1. Studi karakterisasi membran

Studi ini dilakukan pertama kali karena pemilihan membran merupakan hal yang penting dalam proses berbasis membran. Studi ini dilakukan dengan memvariasikan beberapa jenis membran komersial. Karakterisasi membran yang dilakukan meliputi porositas, ukuran pori, ketebalan dan geometri pori. Untuk mengetahui geometri pori, digunakan foto SEM (*Scanning Electron Microscopy*). Sedangkan untuk menentukan ukuran pori rata-rata digunakan metode *bubble point*. Mekanisme difusi SO<sub>2</sub> (gas mengisi pori) perlu untuk diamati untuk identifikasi struktur membran yang tepat untuk kontaktor membran. Dengan data koefisien perpindahan massa dapat diambil suatu korelasi dengan sifat-sifat fisik membran sehingga batasan fluks juga dapat diprediksi.

Karakterisasi membran dilakukan pada jenis membran komersial Polipropilen (PP) dan Polietersulfon (PES). Karakterisasi yang dilakukan meliputi ukuran pori, distribusi pori dan geometri pori. Untuk mengetahui ukuran pori digunakan metode *bubble point* sedangkan untuk mengetahui distribusi ukuran pori digunakan kombinasi metode *bubble point* dan

metode permeabilitas. Sementara untuk mengetahui geometri pori digunakan Scanning Electron Microscopy (SEM).

*Bubble-point method* ini digunakan untuk menentukan ukuran pori maksimum suatu membran. Gambar skematik peralatan diperlihatkan pada Gambar 4.2. Metoda ini dilakukan dengan mengukur tekanan yang diperlukan untuk mengalirkan udara melalui membran yang terisi oleh cairan. Bagian atas membran diletakkan bersentuhan dengan cairan yang akan mengisi pori membran saat membran terbasahi. Bagian bawah membran dikontakkan dengan udara dan diberi tekanan. Tekanan dinaikkan secara perlahan-lahan hingga terjadi pembentukan gelembung udara yang pertama kali pada tekanan tertentu.



Gambar 4.2. Prinsip Metode Bubble Point

Distribusi ukuran pori dapat ditentukan dengan memvariasikan tekanan, misalnya melalui kombinasi metoda *buble point* dan metoda permeabilitas. Fluks air diukur sebagai fungsi tekanan operasi. Pada tekanan minimum, pori terbesar bersifat permeabel sedangkan pori terkecil masih bersifat impermeabel. Tekanan minimum tergantung pada jenis material membran (sudut kontak), jenis permeat (tegangan permukaan) dan ukuran pori.

Ukuran pori membran dapat ditentukan dengan cara mengukur fluks permeat pada tekanan konstan menggunakan persamaan Hagen-Poiseuille.

$$J = \frac{\varepsilon * r^2}{8\eta\tau} \frac{\Delta P}{\Delta X} \quad (1)$$

J adalah fluks (air) yang melalui membran pada *driving force*  $\Delta P/\Delta X$ . P, beda tekanan ( $N/m^2$ ) dan  $\Delta X$  tebal membran (m). Faktor proporsional mengandung jari-jari pori  $r$  (m), viskositas cairan  $\eta$ (Pa.S), porositas permukaan membran  $\varepsilon$  ( $= n\pi r^2/luas permukaan$ ) dan faktor *tortuosity*  $\tau$ .

Dalam penelitian ini digunakan membran polipropilen dan dua cairan yang tidak saling larut (immiscible) dengan tegangan permukaan ( $\gamma$ ) yang berbeda, yaitu 1,7 dyne/cm (air-isobutanol) dan 0,8 dyne/cm (isobutanol-metanol-air) (5 : 1 : 4 v/v). Hal ini dimaksudkan

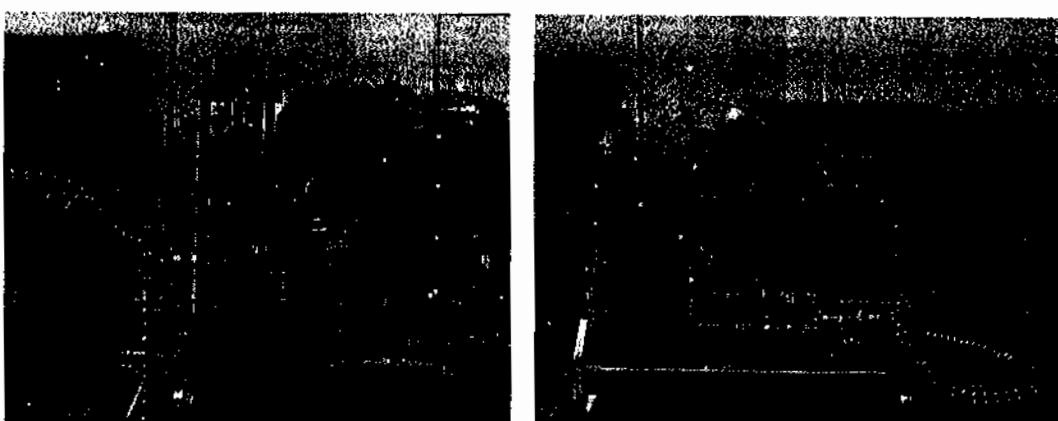
agar nilai radius yang kecil sekali ( $2-5$  nm) serta jumlah pori lebih besar (di atas  $10^{11}/\text{cm}^2$ ) dapat diukur. Disamping itu semua pori dianggap berbentuk silinder, sehingga dalam perhitungan dapat digunakan persamaan Hagen-poiseuille (persamaan 1). Data-data untuk perhitungan yang digunakan sebagai variabel tetap adalah :

Tebal membran ( $\Delta x$ ) :  $10 \mu\text{m}$

Viskositas cairan :  $\gamma = 1,7 \text{ dyne/cm}$ ,  $\mu = 2,16 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m.s}$

$\gamma = 0,8 \text{ dyne/cm}$ ,  $\mu = 2,37 \cdot 10^{-3} \text{ kg/m.s}$

Sedangkan variabel yang berubah adalah fluks dan tekanan. Dengan data tekanan dan fluks (data permeabilitas) diperoleh distribusi pori. Alat karakterisasi hasil pengembangan yang telah dilakukan dapat dilihat pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Alat Karakterisasi Hasil Pengembangan

Sementara untuk mengetahui geometri pori dilakukan pengamatan menggunakan foto SEM. Pengamatan dilakukan dengan perbesaran masing-masing  $1000 \times$  dan  $3500 \times$ .

#### 4.2. Studi stabilitas membran

Membran dapat bersifat hidrofobik maupun hidrofilik. Suatu membran mikroporous hidrofobik akan mencegah cairan masuk dalam pori sehingga pori akan terisi oleh gas. Sebaliknya, dalam membran hidrofilik, cairan akan masuk dalam pori membran. Sifat hidrofobik dan hidrofilik dari membran ditentukan oleh *breakthrough pressure difference* pada membran. Beda tekanan ini dipengaruhi oleh ukuran pori maksimum, geometri pori dan interaksi cairan dengan material membran. Dalam sistem gas mengisi pori, *breakthrough pressure difference* akan menentukan tekanan operasi maksimum yang diperbolehkan pada sisi cairan dan merupakan parameter yang penting dalam penentuan kondisi operasi. Umumnya, angka keamanan tekanan air masuk membran sebesar 1 bar. Dalam studi stabilitas membran digunakan polimer seperti teflon (PTFE) dan polipropilen (PP). Penelitian yang akan dilakukan meliputi stabilitas kimia dari membran termasuk sifat kebasahan (*wettability*) dan kestabilan membran terhadap panas karena temperatur gas buang berkisar antara  $100 - 150^\circ\text{C}$ .

Pengujian stabilitas terhadap membran dilakukan untuk mengetahui stabilitas membran terhadap bahan kimia, stabilitas terhadap pH, stabilitas terhadap gaya mekanik, dan stabilitas terhadap temperatur.

Stabilitas terhadap bahan kimia

Stabilitas membran sangat dipengaruhi oleh pelarut-pelarut organik seperti aceton, metanol, etanol, dimetil asetamida, tetra hidrofuran, dioksan, dsb. Fraksi-fraksi minyak bumi juga sangat membahayakan stabilitas membran. Senyawa-senyawa tersebut umumnya adalah pelarut dari membran. Pengujian ketahanan dilakukan dengan merendam membran dalam larutan Natrium bisulfit.

Stabilitas terhadap pH

Stabilitas membran juga sangat dipengaruhi oleh konsentrasi asam atau basa yang ekstrim. Pengujian ketahanan terhadap pH dilakukan dengan merendam membran yang digunakan pada larutan Natrium bisulfit pada rentang pH tertentu.

Stabilitas terhadap gaya mekanik

Berbagai modul membran yang ada dipasaran saat ini sudah dirancang sedemikian sehingga mempunyai ketahanan mekanik yang memadai, dengan catatan bahwa kondisi operasi yang digunakan masih pada batas-batas yang wajar. Pengaruh mekanik yang dimaksudkan di sini adalah beda tekanan antara dua sisi membran.

Stabilitas terhadap temperatur

Pengujian stabilitas terhadap temperatur dilakukan dengan mengoperasikan kontaktor membran pada berbagai rentang temperatur.

#### 4.3. Pemodelan Kontaktor Membran

Untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada membran, diperlukan profil fluks dan konsentrasi sepanjang membran dan konsentrasi pada lapisan batas. Karena ukuran membran yang sangat kecil, untuk memperoleh data tersebut diperlukan alat ukur yang sangat rumit. Masalah tersebut dapat diatasi dengan melakukan pemodelan terhadap kontaktor membran. Pemodelan kontaktor membran dilakukan dengan menyusun persamaan dua dimensi yang meliputi persamaan neraca massa, neraca momentum dan neraca panas. Persamaan tersebut diselelaikan secara numerik dengan metode volume hingga. Model yang disusun harus dapat menjelaskan fenomene yang terjadi dalam kontaktor membran. Dalam pemodelan kontaktor membran diperlukan berbagai pemodelan membran yang terdapat dalam literatur dan kemungkinan penerapannya dalam kontaktor membran. Pendekatan perpindahan massa dipilih dalam pemodelan ini untuk mempermudah penjelasan berbagai pola aliran dengan korelasi empirik. Perpindahan massa dalam membran dijelaskan dengan kombinasi model difusi molekular biasa dan model difusi Knudsen

### a. Penyusunan Model

Pemodelan kontaktor membran akan dilakukan untuk mengembangkan model untuk mengetahui distribusi konsentrasi arah aksial ( $z$ ) dan arah radial ( $r$ ). Model tersebut dikembangkan dari persamaan konservasi massa, sehingga distribusi konsentrasi dapat ditentukan dengan menyelesaikan persamaan konservasi massa tersebut. Penyelesaian persamaan konservasi massa membutuhkan besaran distribusi aliran sepanjang membran. Hasil pemodelan yang telah dilakukan adalah penyusunan persamaan pengendali aliran untuk aliran laminer, 2 dimensi, dan kondisi tunak terdiri dari persamaan kontinuitas, persamaan momentum  $u$ , dan persamaan momentum  $v$ .

Persamaan kontinuitas:

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial z} (\rho u) + \frac{1}{\varepsilon r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho v r) = 0 \quad (2)$$

Persamaan momentum  $u$ :

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial z} (\rho uu) + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial r} (\rho vu) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \frac{1}{\varepsilon r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \rho g_z + S_i \quad (3)$$

Persamaan momentum  $v$ :

$$\frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial z} (\rho uv) + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial r} (\rho vv) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial r} \left( \frac{\mu}{r} \frac{\partial v}{\partial r} (rv) \right) + \rho g_r + S_i \quad (4)$$

Sedangkan persamaan konservasi massa yang akan diselesaikan adalah:

$$V \frac{\partial C_A}{\partial r} + U \frac{\partial C_A}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial C_A}{\partial z} \right) + S \quad (5)$$

Persamaan konveksi difusi di atas akan dikembangkan lebih lanjut menjadi model yang spesifik. Suku  $S$  dalam persamaan di atas disebut suku sumber yang terjadi karena perubahan konsentrasi pada bagian lumen dan porous. Untuk mempermudah prediksi profil konsentrasi, kedua model suku sumber yang dikembangkan hanya berlaku pada bagian porous dan lumen saja.

Karakteristik perpindahan massa pada kontaktor membran pada bagian lumen mengikuti mekanisme difusi molekular biasa, sedangkan bagian porous mengikuti mekanisme difusi Knudsen. Model pada bagian porous mengikuti aturan Porous Medium Model, dan dijelaskan dengan teori Darcy dan Brinkman-Darcy. Berdasarkan model di atas, maka model yang dikembangkan pada kontaktor membran untuk penentuan distribusi konsentrasi arah aksial dan radial dapat dinyatakan sebagai berikut:

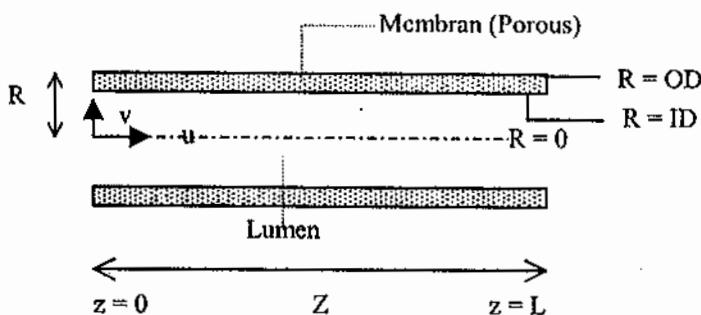
Persamaan pada bagian lumen:

$$V \frac{\partial C_A}{\partial r} + U \frac{\partial C_A}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial C_A}{\partial z} \right) + (k_g C_A R T) \quad (6)$$

Persamaan pada bagian porous:

$$\frac{1}{\varepsilon} \left( V \frac{\partial C_A}{\partial r} + U \frac{\partial C_A}{\partial z} \right) = \frac{1}{\varepsilon r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r D \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) + \frac{1}{\varepsilon} \frac{\partial}{\partial z} \left( D \frac{\partial C_A}{\partial z} \right) + (k_m C_A R T) \quad (7)$$

Skematik pembagian daerah komputasi untuk satu *fiber* dapat dilihat pada gambar 4.4.



Gambar 4.4. Skema Pembagian daerah komputasi pada satu *fiber*

Untuk mempermudah pemodelan, satu *fiber* dibagi menjadi dua bagian yaitu bagian lumen dan bagian membran. Pemodelan bagian lumen sama seperti model aliran untuk pada koordinat silinder sedangkan model untuk bagian membran menggunakan *Porous Medium Model*, dimana membran dianggap sebagai media berpori. Dalam penelitian ini digunakan dua persamaan untuk mendekati karakteristik media berpori, yaitu persamaan Darcy dan Brickman-Darcy.

## 2. Penyelesaian Persamaan Model Dua Dimensi

Tahap awal dalam penyelesaian model dua dimensi ini adalah penyelesaian persamaan medan aliran dua dimensi arah  $r$  dan  $z$ . Selanjutnya dengan data yang diperoleh dari penyelesaian persamaan medan aliran tersebut, maka penyelesaian konservasi massa dapat diselesaikan dan diperoleh profil distribusi konsentrasi arah  $r$  dan  $z$ .

Perkiraan besaran dalam persamaan perpindahan dapat diselesaikan dengan metode volume hingga (Patankar, 1980). Besaran-besaran perpindahan yang akan diperkirakan adalah komponen kecepatan  $u$  dan  $v$ . Persamaan perpindahan untuk peubah  $\Phi$  dapat dituliskan dalam bentuk umum:

$$(U \cdot \nabla) \Phi = \nabla \cdot \nabla \Gamma_\Phi \Phi + S_\Phi \quad (8)$$

Persamaan ini diselesaikan dengan mengubah persamaan diferensial parsial ke dalam bentuk persamaan aljabar linier dengan melakukan diskritisasi pada volume

hingga. Pada masing-masing volume hingga berlaku persamaan momentum. Metoda ini dikenal dengan metoda volume hingga.

Metoda volume hingga dimulai dengan membagi bidang komputasi ke dalam sejumlah volume hingga sesuai dengan bentuk geometrinya. Tahap pembagian bidang komputasi ke dalam volume hingga disebut tahap pembentukan *grid*.

Persamaan (8) diintegrasikan pada masing-masing volume hingga. Proses diskritisasi ini menghasilkan persamaan aljabar linier untuk masing-masing peubah  $\Phi$  yang merupakan korelasi besaran peubah pada titik (i,j) dengan besaran pada titik-titik pusat volume hingga tetangga. Bentuk persamaan aljabar untuk masing-masing volume hingga:

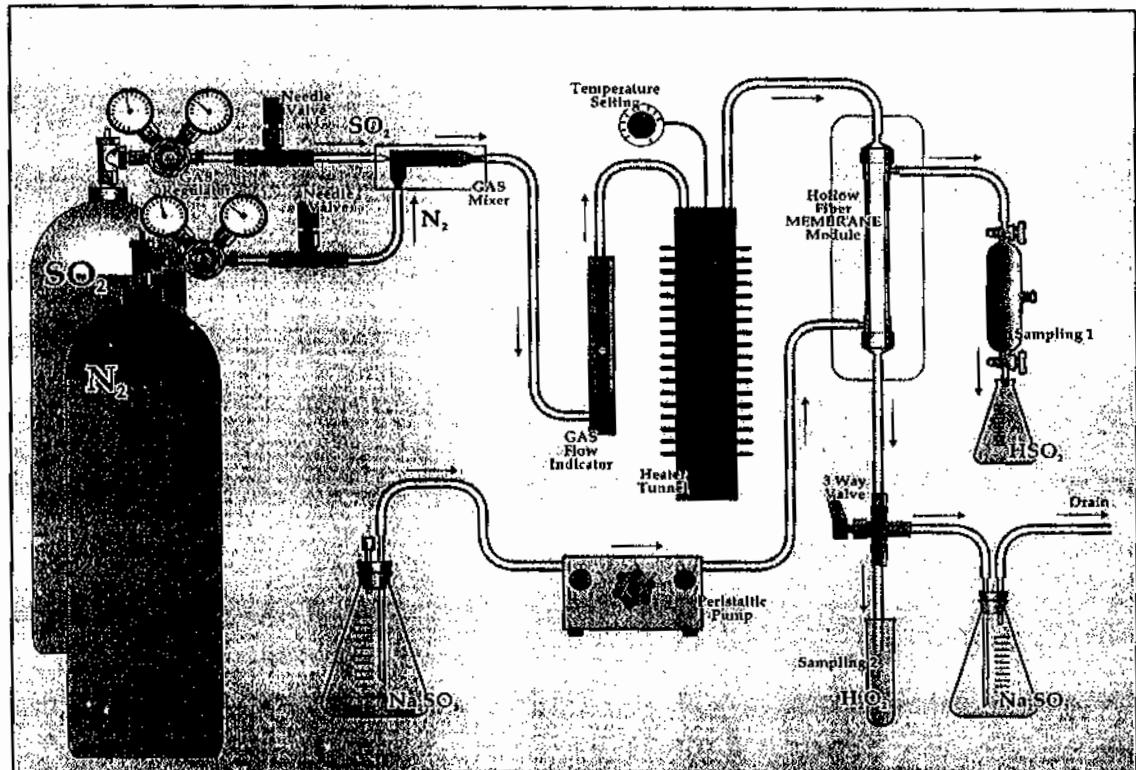
$$a_p \Phi_p = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S \quad (9)$$

dimana  $a_i$  merupakan koefisien persamaan aljabar hasil diskritisasi yang merupakan fungsi ukuran volume hingga, sifat fisik, dan fluks pada antar muka volume hingga.

Persamaan diskritisasi momentum mempunyai suku tambahan yaitu perbedaan tekanan. Untuk menyelesaikan permasalahan perbedaan tekanan, perlu dilakukan tebakan awal medan tekanan dan penyelesaian persamaan diskritisasi akan menghasilkan tebakan awal kecepatan. Dengan menggunakan dua nilai tebakan ini, akan didapatkan persamaan diskritisasi untuk koreksi tekanan dan koreksi kecepatan. Persamaan diskritisasi tekanan diselesaikan untuk mendapatkan nilai koreksi kecepatan. Kemudian nilai tekanan dan kecepatan yang sebenarnya dihitung kembali. Perhitungan akan selesai apabila kriteria konvergensi telah terpenuhi, biasanya diambil angka yang sangat kecil misalnya di bawah  $10^{-5}$ . Algoritma seperti ini dikenal dengan SIMPLE (*Semi Implicit Method for Pressure Limit Equation*). Penyelesaian model dengan metode numerik ini akan menghasilkan program komputer yang dapat digunakan untuk mengetahui profil distribusi aliran arah radial dan aksial, profil konsentrasi arah radial dan aksial, dan menghitung panjang fiber efektif untuk kontaktor membran.

#### 4.4. Pembuatan Prototipe Kontaktor Membran untuk Pengendalian Emisi Gas Buang

Rancangan prototipe kontaktor membran hollow fiber untuk pengendalian emisi gas buang akan disesuaikan dengan gambar 4.5. berikut ini :



Gambar 4.5. Rancangan Prototipe Kontaktor Membran untuk Pengendalian Emisi Gas Buang

## V. HASIL DAN PEMBAHASAN

### 5.1. Studi Karakterisasi Membran

Studi karakterisasi membran dilakukan untuk 2 (dua) jenis membran komersial Polipropilen (PP) dan Polietersulfon (PES). Karakterisasi yang dilakukan meliputi ukuran pori, distribusi pori dan geometri pori.

Ukuran pori membran yang diukur adalah ukuran pori nominal, ukuran pori rata-rata dan ukuran pori maksimum. Selain itu juga dilakukan perhitungan porositas membran. Perhitungan porositas dilakukan menggunakan isobutanol-air. Porositas membran didefinisikan sebagai fraksi volume pori terhadap volume total membran. Porositas sangat berpengaruh dalam penentuan kinerja membrane kontaktor yang dinyatakan oleh fluks. Hasil pengukuran pori dan porositas dapat dilihat pada tabel berikut ini :

Tabel 5.1 Karakteristik Membran

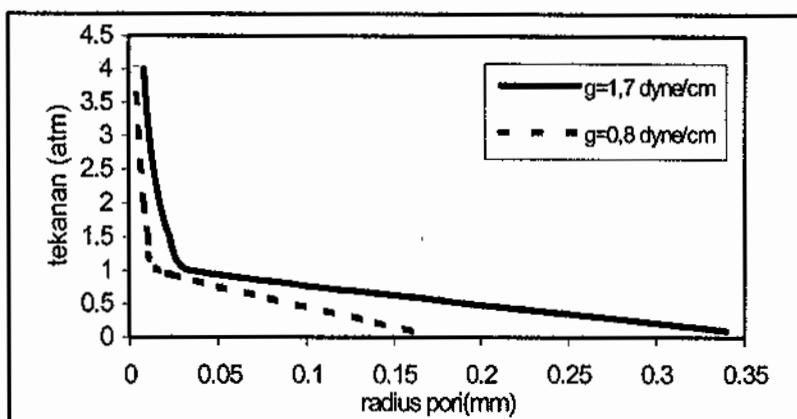
|                                                    | PP   | PES  |
|----------------------------------------------------|------|------|
| Ukuran pori nominal, $r_p$ ( $\mu\text{m}$ )       | 0,15 | 0,17 |
| Ukuran pori rata-rata, $r_{avg}$ ( $\mu\text{m}$ ) | 0,14 | 0,16 |
| Ukuran pori maksium, $r_{max}$ ( $\mu\text{m}$ )   | 0,43 | 0,35 |
| $r_p$ ( $\mu\text{m}$ ) dari data manufaktur       | 0,2  | 0,2  |
| Porositas membran, %                               | 84,8 | 80   |

Dari tabel tersebut dapat dilihat bahwa ukuran pori nominal untuk kedua jenis membran menggunakan pengembangan metode bubble point sesuai dengan data manufaktur. Sehingga dapat dikatakan bahwa metode tersebut sangat akurat dan cukup realistik untuk memprediksi ukuran pori sehingga tepat dipakai sebagai alat karakterisasi membran.

Dari hasil karakterisasi dapat dilihat bahwa kedua jenis membran ini termasuk membran mikroporous karena ukuran porinya terletak pada rentang 0,01-1  $\mu\text{m}$ . Begitu pula untuk porositas dan tebal membran masih dalam rentang yang disarankan untuk membran mikroporous yaitu 0,3-0,85 untuk porositas dan 25-500  $\mu\text{m}$  untuk ketebalan membran. Porositas kedua membran yang dipakai dalam penelitian ini termasuk tinggi sehingga baik digunakan untuk kontaktor membran. Porositas yang semakin besar akan meningkatkan luas permukaan kontak antara gas dan sorben sehingga meningkatkan laju absorbsi.

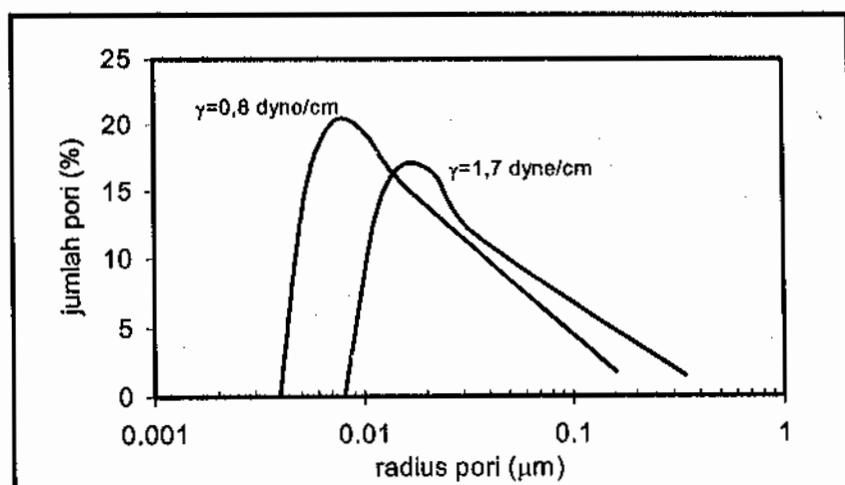
### 5.1.1. Penentuan Distribusi Ukuran Pori

Gambar 5.1 memperlihatkan hubungan tekanan terhadap radius pori. Secara umum terlihat jika radius pori semakin kecil, tekanan yang dibutuhkan cairan untuk menembus pori membran akan semakin besar. Dalam hal ini ukuran pori yang dapat terdeteksi tergantung pada tegangan permukaan cairan yang digunakan. Untuk mendeteksi ukuran pori yang kecil harus digunakan cairan dengan tegangan permukaan yang kecil. Akan tetapi ukuran pori yang sangat kecil tidak dapat terdeteksi.



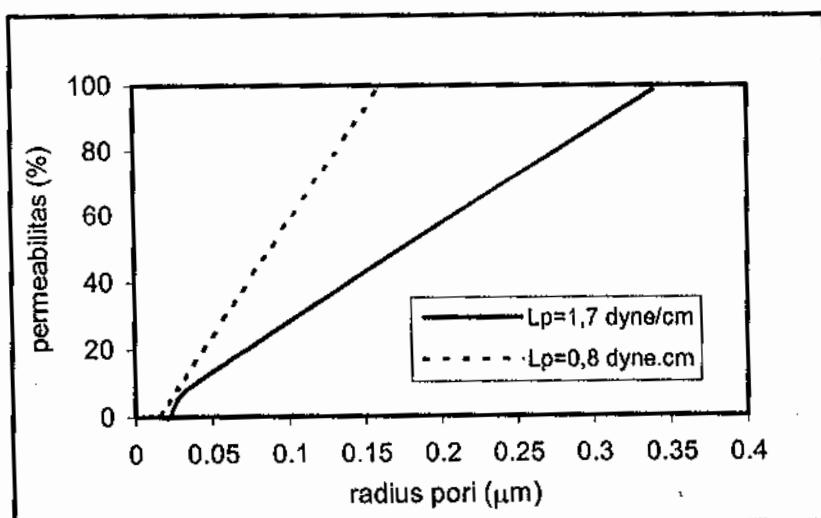
Gambar 5.1. Hubungan tekanan terhadap radius pori

Distribusi ukuran pori akan diperoleh dengan mengalurkan grafik jumlah pori terhadap radius pori yang diperoleh dari hasil perhitungan, seperti disajikan pada Gambar 5.2. Hal ini akan menghasilkan ukuran pori rata-rata yang berbeda, dimana semakin besar tegangan permukaan cairan yang digunakan maka ukuran pori rata-rata yang diperoleh semakin besar. Dalam hal ini distribusi porinya mendekati kurva gaussian, dimana radius pori yang diperoleh tidak jauh berbeda dari pori nominalnya.

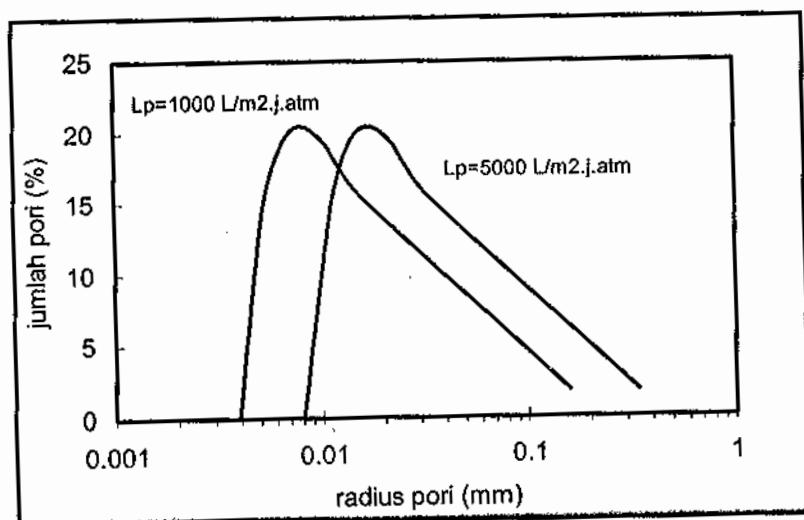


Gambar 5.2 Pengaruh Tekanan Terhadap Radius Pori dengan Tegangan Permukaan yang Berbeda

Gambar 5.3. memperlihatkan hubungan permeabilitas terhadap radius pori untuk dua cairan dengan tegangan permukaan yang berbeda. Cairan dengan tegangan permukaan yang lebih kecil akan memberikan permeabilitas yang lebih besar. Berdasarkan hubungan permeabilitas terhadap ukuran pori tersebut dapat digambarkan kurva distribusi ukuran pori seperti ditunjukkan pada Gambar 5.4. Kurva distribusi pori yang diperoleh berdasarkan data permeabilitas serupa dengan kurva distribusi teoritik. Hal ini berarti bahwa penentuan distribusi pori berdasarkan data permeabilitas cukup memadai dan dapat digunakan untuk mengetahui kinerja membran.

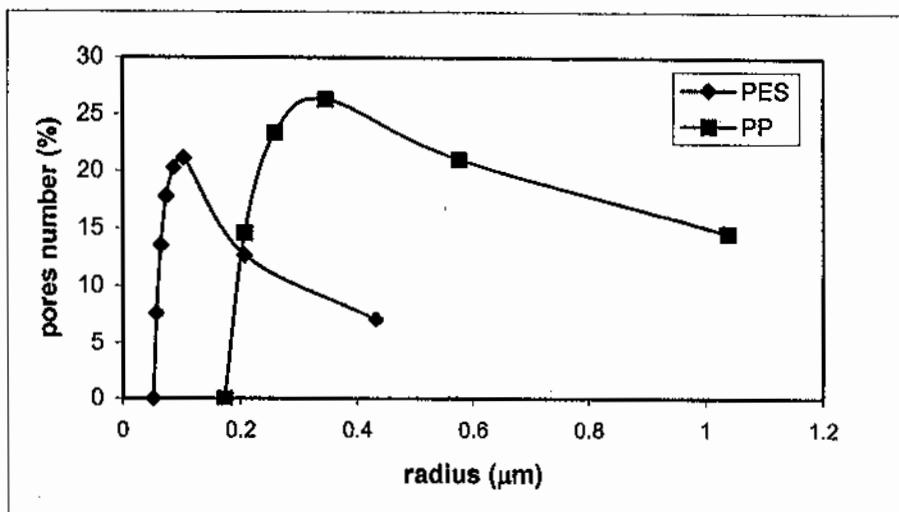


Gambar 5.3. Hubungan permeabilitas terhadap radius pori untuk tegangan permukaan yang berbeda.



Gambar 5.4. Distribusi pori terhadap radius pori untuk permeabilitas yang berbeda

Distribusi ukuran pori untuk kedua jenis membran, Polipropilen (PP) dan Polietersulfon (PES) diperoleh dengan mengalurkan grafik jumlah pori terhadap radius pori yang diperoleh dari hasil perhitungan, seperti disajikan pada Gambar 5.5.

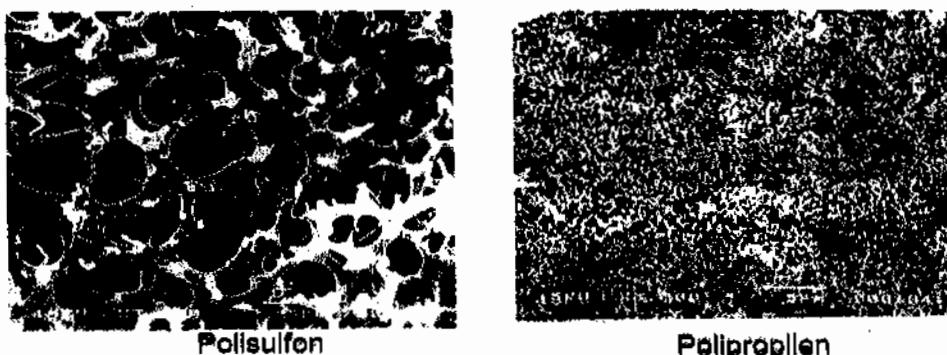


Gambar 5.5 Distribusi Jumlah pori Terhadap Radius Pori

Dari Gambar 5.5 dapat dijelaskan bahwa ukuran pori rata-rata yang dihasilkan untuk kedua jenis membran berbeda. Namun demikian, kedua distribusi ukuran pori telah mendekati lurva gaussian dimana radius pori yang diperoleh tidak jauh berbeda dari pori nominalnya. Demikian pula juga terlihat bahwa kecenderungan distribusi kedua pori adalah sama.

#### 5.1.2. Penentuan Geometri Pori

Untuk mengetahui geometri pori dari membran Polipropilen (PP) dan Polietersulfon (PES) digunakan SEM (Scanning Electron Microscopy). Hasil karakterisasi menggunakan SEM dapat dilihat pada Gambar 5.6 berikut ini.



Gambar 5.6 Hasil SEM dengan Perbesaran 3500 x

Hasil SEM pada gambar 5.6 menunjukkan bahwa geometri pori untuk membran PP dan PES berbeda. Membran Polietersulfon (PES) mempunyai geometri pori dengan jenis *Loose Packed Sphere*, sedangkan membran Polipropilen (PP) mempunyai geometri pori dengan jenis *Interstices Between Loose Packed Sphere*. Geometri pori dengan jenis *Loose Packed Sphere* berarti bahwa geometri pori dapat dianggap sebagai silinder, sedangkan *Interstices between loose packed sphere* berarti bahwa pori dapat dianggap sebagai celah diantara bola terjejal rapat.

Perbedaan kedua geometri pori ini disebabkan karena perbedaan pada proses pembuatan. Geometri pori pada gambar (a) menunjukkan bahwa membran dibuat dengan cara sintering, sedangkan geometri pori pada gambar (b) menunjukkan bahwa membran dibuat dengan cara streching. Pembuatan membran dengan cara streching maupun sintering mempunyai porositas yang menengah – tinggi sehingga baik digunakan untuk kontaktor membran (Iversen, 1997). Jika dilihat dari geometri porinya, membran Polipropilen (PP) akan mempunyai luas permukaan kontak yang lebih besar dibandingkan dengan membran Polietersulfon (PES) sehingga akan lebih baik jika digunakan sebagai kontaktor membran.

## 5.2. Studi Stabilitas Membran

Salah satu kunci dalam pemilihan jenis membran adalah kestabilan membran terhadap bahan kimia, panas, mikroba, dan sifat mekanik. Secara umum, membran dapat digolongkan menjadi hidrofobik dan hidrofilik. Pada membran hidrofilik dapat terjadi penetrasi cairan ke dalam pori, sedangkan pada membran hidrofobik tidak terjadi. Stabilitas yang akan dikaji meliputi ketahanan terhadap bahan kimia, ketahanan terhadap pH, ketahanan terhadap temperatur dan ketahanan terhadap gaya mekanik.

### Stabilitas terhadap bahan kimia

Stabilitas membran sangat dipengaruhi oleh pelarut-pelarut organik seperti aceton, metanol, etanol, dimetil asetamida, tetra hidrofuran, dioksan, dsb. Fraksi-fraksi minyak bumi juga sangat membahayakan stabilitas membran. Senyawa-senyawa tersebut umumnya adalah pelarut dari membran. Hasil pengujian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa larutan sorben natrium bisulfit tidak mendeformasi struktur pori membran.

### Stabilitas terhadap pH

Stabilitas membran juga sangat dipengaruhi oleh konsentrasi asam atau basa yang ekstrim. Dari hasil pengujian yang dilakukan diketahui bahwa membran masih stabil untuk

kisaran pH 1 – 11 untuk rentang waktu pengujian. Hasil pengujian beberapa pengaruh pH terhadap membran Polipropilen dapat dilihat pada Tabel 5.2 berikut ini:

Tabel 5.2 Kestabilan Membran Polipropilen

| Waktu (d) | Diameter pori (μm) |
|-----------|--------------------|
| Awal      | 0,20               |
| 1         | 0,10               |
| 3         | 0,20               |
| 10        | 0,20               |

Pada Tabel 5.2 terlihat bahwa diameter pori tidak mengalami banyak perubahan baik sebelum perendaman maupun setelah proses perendaman. Pada kondisi asam yang ekstrim, membran dapat mengalami proses shrinking dimana ukuran pori membran mengecil. Namun pengaruh tersebut tidak begitu signifikan. Secara umum, shrinking tidak begitu berbahaya dibandingkan proses swelling yang umumnya dapat memperbesar ukuran pori puluhan kali lipat. Kondisi asam yang ekstrim tidak akan mengubah karakteristik membran melainkan hanya melepuhkan permukaan membran dan tidak memperbesar ukuran porinya.

Stabilitas terhadap temperatur

Bahan material membran dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu: bahan organik, bahan inorganik (keramik), dan bahan logam. Membran yang terbuat dari material inorganik dan bahan logam mempunyai daya tahan terhadap temperatur yang tinggi. Membran yang terbuat dari material organik akan mengalami *swelling* jika temperatur operasi tinggi. Keuntungan dari membran jenis ini adalah harga jauh lebih murah dan memberikan selektivitas yang tinggi. Temperatur operasi maksimum yang disarankan untuk membran jenis ini disajikan pada tabel 5.3.

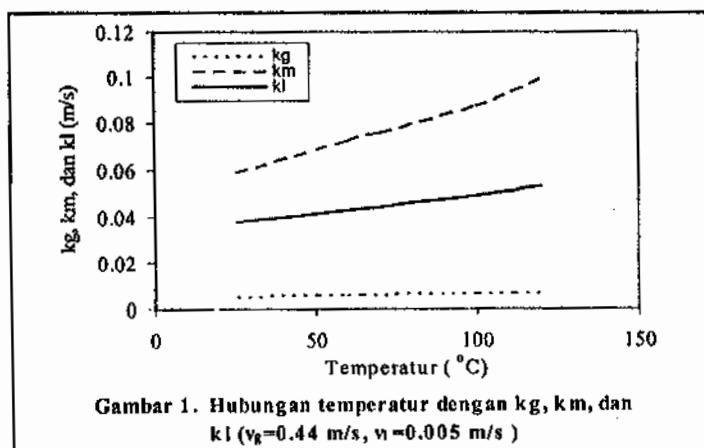
Tabel 5.3. Hasil pengujian stabilitas membran terhadap temperatur

| Membran               | Temperatur Maks (°C) |
|-----------------------|----------------------|
| Polyethersulfon (PES) | 70                   |
| Polypropylene (PP)    | 180                  |

Pengaruh temperatur pada membran bukan hanya pada stabilitasnya saja tetapi juga pada ukuran pori membran yang diakibatkan oleh fenomena *swelling*, yang pada hakikatnya dapat mempengaruhi diameter pori membran. Perubahan ukuran pori

berpengaruh terhadap difusi Knudsen dan proses permeasi gas SO<sub>2</sub>. Bila jari-jari pori lebih besar dari *mean free path*, maka difusi Knudsen diabaikan sehingga mempengaruhi proses permeasi gas.

Dari Gambar 5.7 dapat diketahui pengaruh temperatur terhadap koefisien perpindahan massa ( $k_g$ ,  $k_m$ , dan  $k_l$ ) yang semuanya meningkat dengan naiknya temperatur karena kenaikan temperatur meningkatkan difusivitas. Hal ini menyebabkan perpindahan massa di fasa gas, fasa membran, dan fasa cair juga meningkat. Kenaikan koefisien perpindahan massa pada membran ( $k_m$ ) cukup tajam dibandingkan dengan koefisien perpindahan massa pada fasa gas ( $k_g$ ) dan koefisien perpindahan massa pada fasa cair ( $k_l$ ). Hal ini disebabkan oleh pengaruh difusi molekular dan difusi Knudsen pada membran semakin dominan dengan naiknya temperatur. Koefisien perpindahan massa pada fasa gas ( $k_g$ ) hanya sedikit mengalami kenaikan, hal ini disebabkan viskositas gas juga semakin meningkat akibat dari kenaikan temperatur sehingga tahanan perpindahannya semakin besar.



Gambar 5.7 Hubungan Antara  $k_g$ ,  $k_m$  dan  $k_l$  pada berbagai variasi temperatur

#### Stabilitas terhadap gaya mekanik

Berbagai modul membran yang ada dipasaran saat ini sudah dirancang sedemikian sehingga mempunyai ketahanan mekanik yang memadai, dengan catatan bahwa kondisi operasi yang digunakan masih pada batas-batas yang wajar. Pengaruh mekanik yang dimaksudkan di sini adalah beda tekanan antara dua sisi membran.

Tabel 5.4. Hasil Pengujian Stabilitas Membran Terhadap Tekanan

| Membran              | Tekanan<br>Maksimum (bar) |
|----------------------|---------------------------|
| Polietersulfon (PES) | 3                         |
| Polypropylene (PP)   | 3                         |

### 5.3. Pemodelan Kontaktor Membran

Hollow fiber dapat dinyatakan sebagai suatu silinder dengan dinding berpori dan aliran gas di dalam lumen.  $\text{SO}_2$  fase gas mendifusi dalam dinding pori karena beda konsentrasi. Aliran gas dalam pori dimodelkan dengan model aliran Darcy dan Brinkman-Darcy. Aliran dalam lumen diasumsikan sama dengan aliran pada silinder.

Perpindahan massa  $\text{SO}_2$  dinyatakan dengan persamaan Konveksi-Difusi dari sisi lumen melalui membran berpori. Sulfur dioksida bereaksi dengan sorben secara instantaneous pada lapisan batas luar dinding porous.

Parameter yang digunakan dalam pemodelan dapat dilihat pada tabel 5.5. Difusivitas  $\text{SO}_2$  pada fase gas diperkirakan dengan persamaan Chapman-Enskog. Faktor tortuosity diperkirakan dengan persamaan Mackie-Miers. Koefisien perpindahan massa dihitung dengan kombinasi bilangan Reynold-Sherwood-Schmidt. Mekanisme difusi yang digunakan adalah mekanisme difusi Knudsen-Ordinary Diffusion. Mekanisme difusi ini digunakan untuk memperkirakan koefisien perpindahan massa dalam membran.

Tabel 5.5 Parameter yang Digunakan dalam Pemodelan

|                                 |                        |
|---------------------------------|------------------------|
| Difusi $\text{SO}_2-\text{N}_2$ | $8.593 \cdot 10^{-6}$  |
| Panjang fiber                   | 0.25 m                 |
| Jari-jari shell                 | 0.01 m                 |
| Ketebalan                       | 150 $\mu\text{m}$      |
| Diameter luar fiber             | $2.5 \cdot 10^{-4}$ m  |
| Jumlah fiber                    | 100                    |
| Viskositas                      | $1.38 \cdot 10^{-5}$   |
| Density                         | 2.28 kg/m <sup>3</sup> |
| Tortuosity                      | 3.42                   |

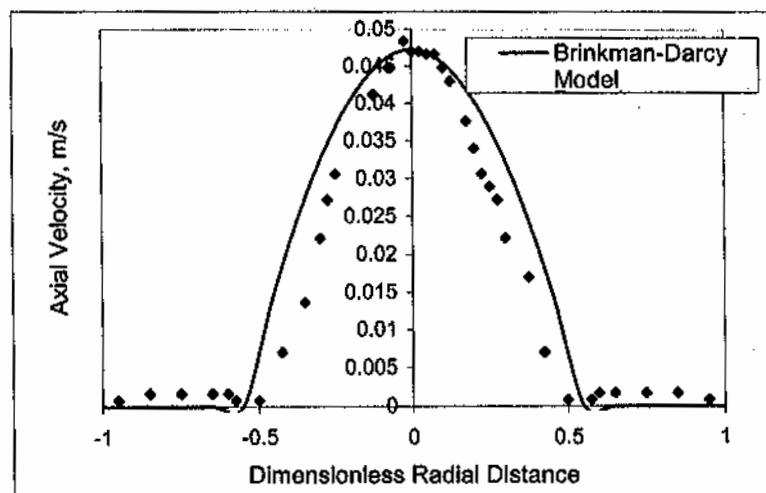
#### Profil Aliran

Untuk mengetahui kebenaran dari model, dilakukan validasi antara Model dengan Eksperimen. Data profil aliran diperoleh dari eksperimen yang dilakukan oleh Pangrle, dkk. Eksperimen dilakukan dengan membran keramik, terbuat dari  $\alpha$ -alumina ( $D_p \approx 30 \mu\text{m}$ ) yang diproduksi oleh CERAVER. Fluida yang digunakan adalah air. Spesifikasi membran yang digunakan dalam eksperimen dapat dilihat pada tabel 5.6 berikut ini.

Table 5.6. Spesifikasi membran yang digunakan oleh Pangrle, dkk.

|                |                        |
|----------------|------------------------|
| Porositas      | 45%                    |
| Ukuran Pori    | $10^{-15} \mu\text{m}$ |
| Panjang tube   | 0.25 m                 |
| Diameter dalam | 0.07 m                 |
| Diameter luar  | 0.1 m                  |

Kecepatan aliran pada arah aksial diukur dengan Magnetic resonance imaging (MRI), untuk fluida incompressible, aliran laminar dalam tube dan shell. Bilangan Reynold sebesar 100. Berdasarkan data dari ALCOA, harga permeabilitas Darcy sebesar  $2.2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ . Viscositas air sebesar  $0.001 \text{ kg / m s}$  dan density air pada  $20^\circ\text{C}$  sebesar dan  $1000 \text{ kg / m}^3$ . Perbandingan antara model dan eksperimen ditampilkan pada Gambar 5.8.

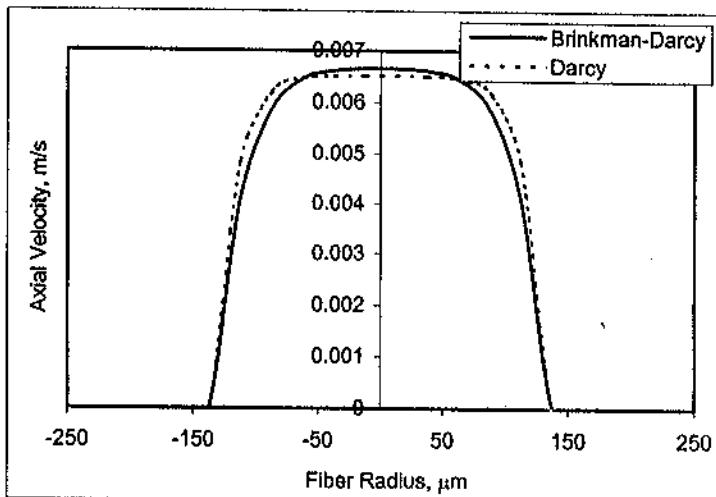


Gambar 5.8 Perbandingan antara Data eksperimen dan Model Menggunakan Pendekatan Persamaan Brinkman-Darcy

Pada gambar 5.8 terlihat kesesuaian antara data dengan model baik pada sisi pori maupun lumen. Kedua data baik eksperimen maupun model menunjukkan karakteristik hidrodinamika fluida yang sama, dimana kecepatan alir aksial pada sisi lumen sebesar  $0,048 \text{ m/s}$ .

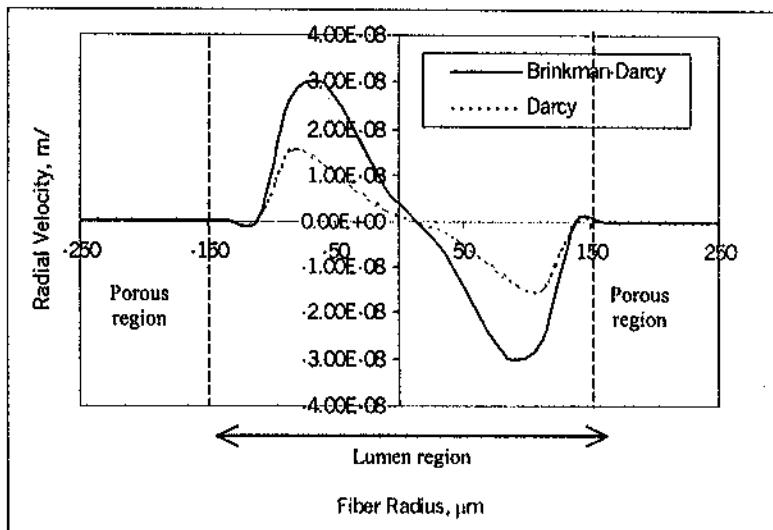
Gambar 5.9 menjelaskan kecepatan aliran arah aksial untuk Model aliran Darcy and Brinkman-Darcy. Gambar tersebut menjelaskan bahwa kecepatan alir menurun seiring dengan kenaikan panjang fiber. Penurunan kecepatan aliran arah aksial disebabkan karena penurunan jumlah komponen gas sepanjang fiber. Prediksi menggunakan model aliran Darcy dan Brinkman darcy tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Kecepatan aliran arah aksial pada daerah berpori menggunakan model Brinkman-Darcy sebesar  $10^{-9} \text{ m/s}$ , sedangkan dengan menggunakan model aliran Darcy sebesar  $10^{-7} \text{ m/s}$ . Pada sisi porous, faktor difusi

memegang peranan utama dalam perpindahan momentum. Sebaliknya, pada bagian lumen kecepatan aliran tidak dipengaruhi oleh difusi melainkan oleh faktor konveksi.



Gambar 5.9 Prediksi profil aliran arah aksial dengan model aliran Darcy dan Brinkman-Darcy pada  $z = 0.25 \text{ m}$ ,  $U_0 = 0.008 \text{ m/s}$

Profil aliran pada arah radial untuk model aliran Darcy dan Brinkman-Darcy sangat berbeda, seperti terlihat pada Gambar 5.10.

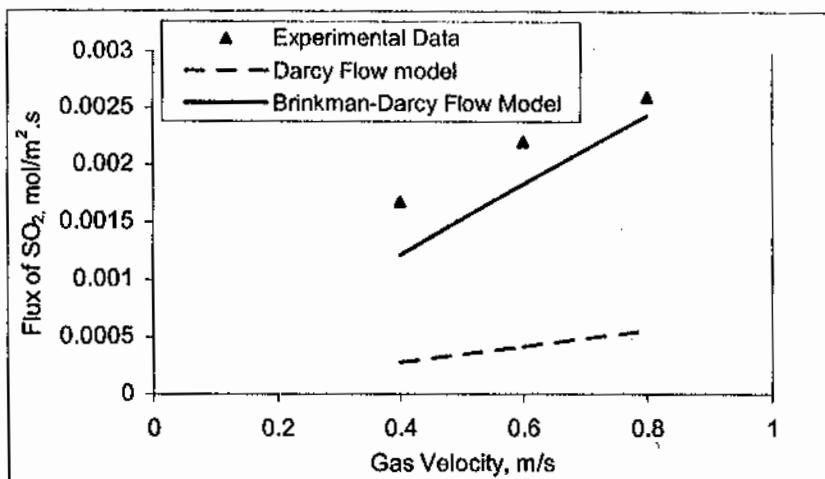


Gambar 5.10 Prediksi kecepatan aliran arah radial menggunakan model Brinkman-Darcy and Darcy pada  $z = 0.25 \text{ m}$ ,  $U_0 = 0.008 \text{ m/s}$

#### Profil Konsentrasi

Distribusi konsentrasi pada kontaktor membran dinyatakan dengan fluks. Untuk mengetahui kebenaran dari model profil konsentrasi, dilakukan validasi dengan data percobaan menggunakan prototipe kontaktor membran yang telah dibuat. Spesifikasi kontaktor membran yang digunakan dapat dilihat pada tabel 5.5. Gas yang digunakan

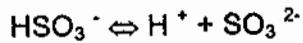
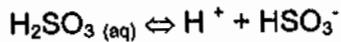
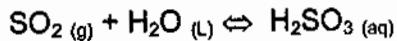
adalah campuran SO<sub>2</sub> dan N<sub>2</sub>, sedangkan sorben yang digunakan adalah Natrium Sulfit. Perbandingan antara data eksperimen dan model ditampilkan pada Gambar 5.11.



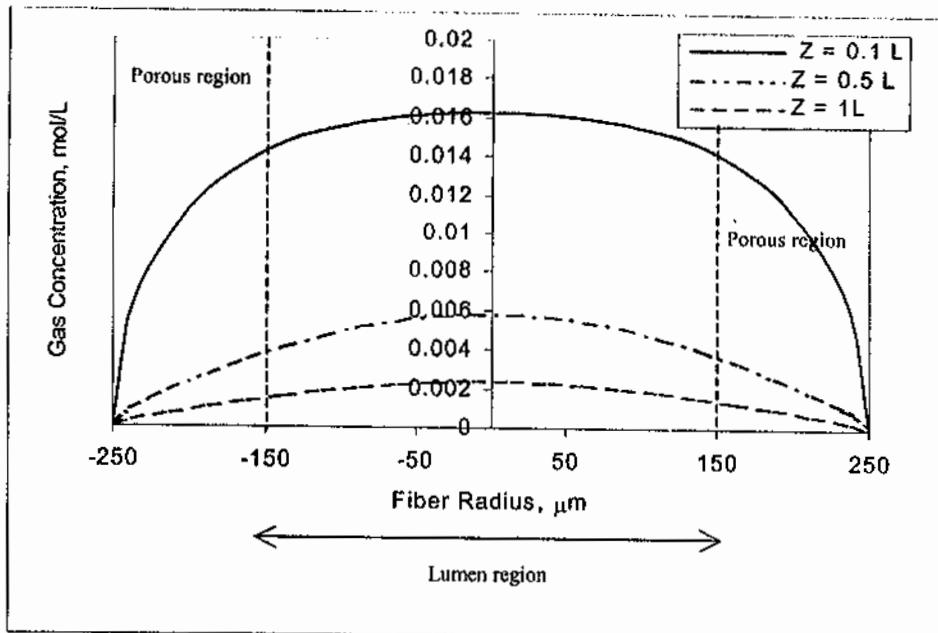
Gambar 5.11. Perbandingan antara model dan eksperimen untuk berbagai variasi gas pada bagian lumen, z = 0.25 m dengan konsentrasi sorben 0.256 mol/L

Sebagaimana dilihat pada Gambar 5.11, prediksi menggunakan model aliran Brinkman-Darcy menunjukkan kesesuaian dengan data eksperimen. Difusi pada sisi pori mendominasi perpindahan massa, sementara model aliran Darcy menghasilkan fluks yang lebih rendah. Sehingga dapat disimpulkan bahwa model aliran Brinkman-Darcy lebih sesuai dibandingkan dengan model aliran Darcy.

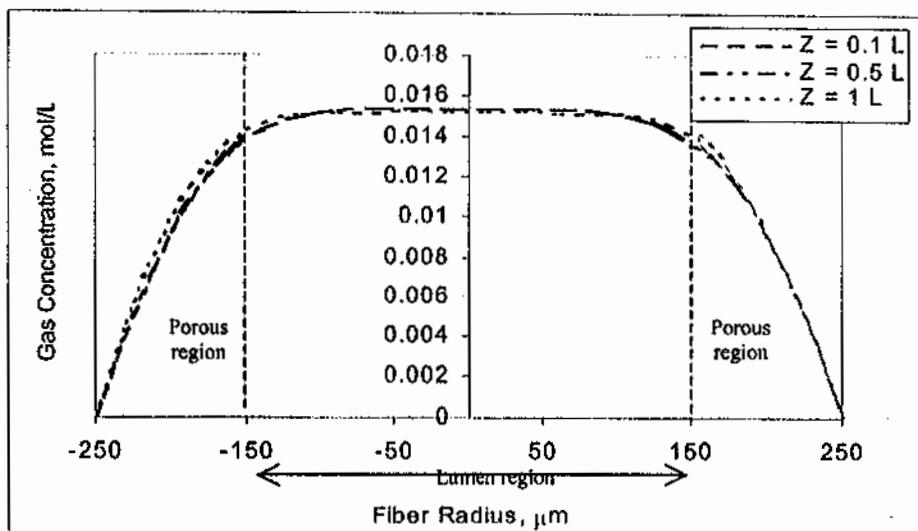
Semua model yang dikembangkan berdasarkan pada perhitungan tahanan perpindahan massa yang mengabaikan tahanan pada fase cair. Berdasarkan eksperimen dari Hikita, dkk konstanta kecepatan reaksi untuk SO<sub>2</sub> dan Natrium sulfat sangat besar. Dengan demikian, asumsi terjadi reaksi instantaneus pada lapisan batas gas dan cairan cukup valid. Perhitungan fluks berdasarkan pada perhitungan koefisien perpindahan massa pada fasa gas dan fasa membran. Sedangkan reaksi yang terjadi pada lapisan batas gas-cairan merupakan reaksi keseimbangan :



Profil konsentrasi pada arah radial memang belum pernah disampaikan oleh penelitian-penelitian sebelumnya. Model yang telah disusun dapat menampilkan prediksi konsentrasi arah aksial dan radial. Profil konsentrasi arah radial dapat dilihat pada Gambar 5.12 dan 5.13.



Gambar 5.12 Prediksi Profil Konsentrasi pada arah radial menggunakan model aliran Darcy dengan  $U_0 = 0.8 \text{ m/s}$

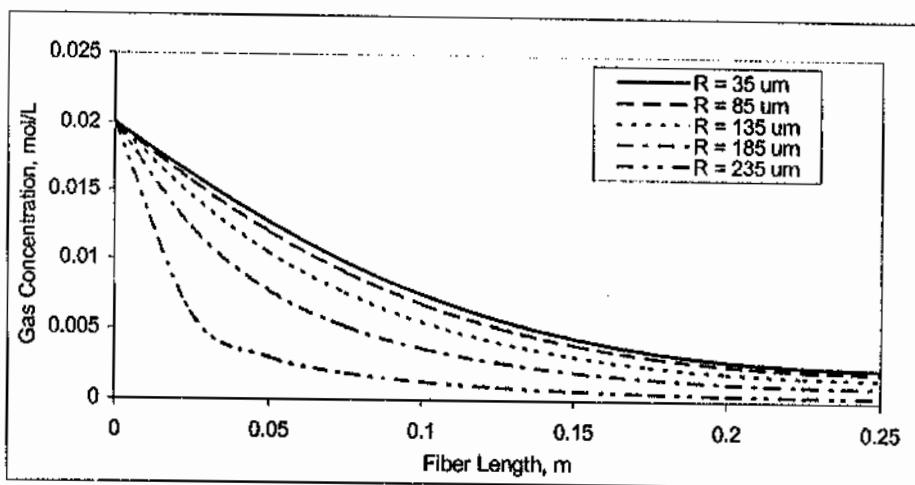


Gambar 5.13 Prediksi Profil Konsentrasi pada arah radial menggunakan model aliran Brinkman-Darcy dengan  $U_0 = 0.8 \text{ m/s}$

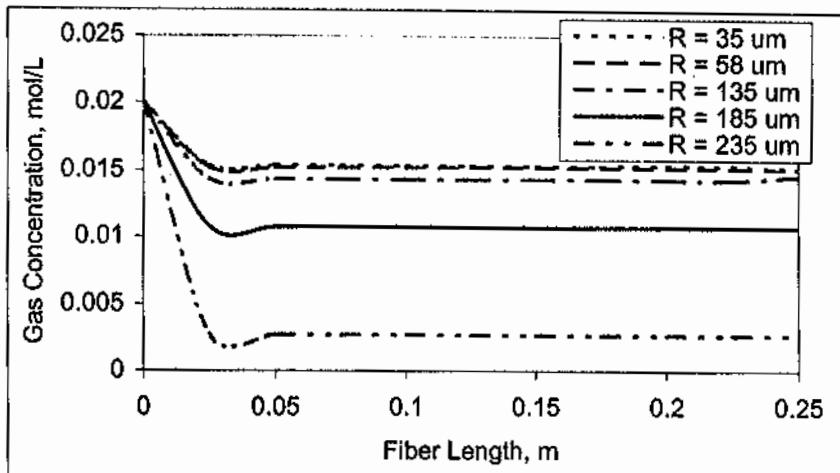
Profil konsentrasi pada arah radial menunjukkan kenaikan pada pusat sisi lumen. Hal ini berarti bahwa distribusi konsentrasi didominasi oleh konveksi di dalam lumen. Konsentrasi gas turun dengan bertambahnya panjang fiber karena lebih banyak  $\text{SO}_2$  yang mendifusi pada lapisan dalam fiber sepanjang membran. Penurunan konsentrasi yang tajam pada sisi porous disebabkan karena adanya tahanan tambahan dalam penentuan koefisien perpindahan

massa. Perhitungan profil konsentrasi memerlukan nilai koefisien perpindahan massa pada fasa gas dan membran. Pada mekanisme gas mengisi pori, koefisien perpindahan massa pada membran tergantung dari regim difusi. Tahanan berasal dari gas yang tejebak dalam pori dan struktur membran.

Profil konsentrasi arah aksial dengan pendekatan model aliran Darcy dan Brinkman-Darcy dapat dilihat pada gambar 5.14 dan 5.15.



Gambar 5.14 Prediksi Profil Konsentrasi pada arah aksial menggunakan Model aliran Darcy pada  $U_0 \approx 0.8 \text{ m/s}$



Gambar 5.15 Prediksi Profil Konsentrasi pada arah aksial menggunakan Model aliran Brinkman-Darcy pada  $U_0 = 0.8 \text{ m/s}$

Kedua grafik menunjukkan kecenderungan penurunan yang tajam sepanjang fiber. Hal ini disebabkan proses penyerapan  $\text{SO}_2$  dengan larutan Natrium Sulfit.  $\text{SO}_2$  selalu dikonsumsi oleh reaksi pada permukaan luar dari sisi poros. Dalam kasus gas mengisi pori, tidak terjadi reaksi kimia di dalam membran karena reaksi hanya terjadi pada lapisan batas gas-cairan. Pada model aliran Darcy, perbedaan konsentrasi pada sisi poros dan lumen tidak signifikan karena karakteristik model aliran Darcy yang mengabaikan regim difusi. Sebaliknya, untuk model aliran Brinkman-Darcy, terjadi perbedaan yang signifikan untuk konsentrasi aliran pada

lumen dan bagian porous. Hal ini juga behubungan dengan profil aliran untuk model Brinkman-Darcy yang juga terjadi penurunan yang sangat tajam pada bagian porous. Penurunan ini disebabkan oleh pengaruh difusi yang mendominasi proses perpindahan massa pada sisi porous, difusi molekular biasa dan difusi Knudsen.

#### 5.4. Perbandingan antara Kontaktor Membran dengan Scrubber Konvensional

Secara umum, kontaktor membran tidak meningkatkan koefisien perpindahan massa tapi memperbesar luas permukaan kontak. Meskipun demikian ada kemungkinan bahwa kontaktor membran juga meningkatkan koefisien perpindahan massa. Rangwala [12], telah melakukan penelitian menggunakan kontaktor membran hollow fiber untuk penyerapan  $\text{CO}_2$  dari udara dengan sorben DEA. Perbandingan koefisien perpindahan massa untuk kontaktor membran hollow fiber dan packed kolom  $\frac{3}{4}$ " rashig ring menunjukkan bahwa koefisien perpindahan massa kontaktor membran 9 kali lebih besar daripada packed kolom. Selain itu kolom dengan bentuk packed dan tray mempunyai luas permukaan  $30 - 300 \text{ m}^2/\text{m}^3$  dan luas permukaan kontak untuk kontaktor membran dapat mencapai  $1600 - 6600 \text{ m}^2/\text{m}^3$  [ ]. Hal-hal tersebut di atas membuat kontaktor membran lebih menguntungkan daripada kontaktor konvensional.

Pada beberapa kasus, absorpsi sangat tergantung pada luas permukaan yang tinggi antara fasa gas dan fasa cair untuk mencapai kecepatan perpindahan gas yang tinggi. Peralatan komersial yang banyak tersedia di pasaran umumnya berdasarkan pada packed column, plate column, spray column, venturi scrubber, dll. Peralatan-peralatan tersebut mempunyai keterbatasan dalam hal pengaturan aliran fluida. Penggunaan membran memberikan luas permukaan kontak tanpa dipengaruhi oleh laju alir gas dan sorben. Packing density membran hollow fiber yang sangat tinggi dapat memberikan luas permukaan yang sangat besar dibandingkan dengan scrubber konvensional. Modul hollow fiber komersial yang digunakan sebagai alat filtrasi dapat dimanfaatkan sebagai absorber dimana sorben dialirkkan dalam fiber.

Tabel 5.7. Perbandingan Kontaktor Hollow Fiber dan Packed Column

| Unit                                            | Kontaktor Membran | Packed Column |
|-------------------------------------------------|-------------------|---------------|
| Luas permukaan/ volume, $\text{m}^2/\text{m}^3$ | > 6000            | 30-300        |
| Efisiensi ruang                                 | sangat baik       | cukup         |
| Biaya peralatan                                 | baik              | baik          |
| Biaya instalasi                                 | baik              | cukup         |
| Biaya instrumentasi                             | baik              | cukup         |
| Pengendalian aliran gas dan cairan              | sangat baik       | jelek         |
| Beban uap per luas kontak untuk operasi         | tinggi            | rendah        |

|                                       |             |        |
|---------------------------------------|-------------|--------|
| vakum                                 |             |        |
| Predksi scale up                      | sangat baik | cukup  |
| Material konstruksi                   | baik        | baik   |
| Rasio stripping gas/cairan            | tinggi      | rendah |
| Pengembangan untuk kenaikan efisiensi | sangat baik | jelek  |
| Kemampuan proses turn-down            | sangat baik | jelek  |

Tabel 5.7 menjelaskan tentang perbandingan antara kontaktor membran dan scrubber konvensional. Pada tabel tersebut terlihat bahwa untuk semua kondisi, kontaktor membran memberikan nilai yang lebih baik dibandingkan dengan scrubber konvensional. Bahkan beberapa kondisi memberikan perbedaan yang sangat signifikan yaitu dalam hal luas permukaan/volume, pengendalian aliran gas dan sorben, rasio *stripping*, pengembangan kenaikan kapasitas proses dan efisiensi, dan kemampuan proses *turn down*.

Untuk lebih memperjelas keuntungan kontaktor membran dibandingkan scrubber konvensional, kinerja kedua kontaktor tersebut dibandingkan secara kuantitatif. Untuk scrubber konvensional yang banyak dipakai sekarang adalah *packed column*, dimana untuk laju pemisahan SO<sub>2</sub> sebesar 0,5 kg/dt diperlukan kolom dengan diameter 3,105 m dan tinggi 19,9 m. Sedangkan membran yang digunakan dalam eksperimen ini adalah *hollow fiber* dengan diameter 0,5 mm dan porositas 70%. Modul dengan panjang 30 cm dan diameter 1,5 cm dapat menampung 100 *hollow fiber*. Perbandingan dilakukan untuk kapasitas yang sama yaitu sebesar 0,5 kg/detik. Hasil perbandingan kedua kontaktor dinyatakan dengan analisis dimensi seperti ditabelkan pada tabel 5.8.

Tabel 5.8. Analisis dimensi kontaktor untuk scrubber konvensional dan Kontaktor Membran

|                  | Scrubber Konvensional      | Kontaktor Hollow Fiber    |
|------------------|----------------------------|---------------------------|
| Kapasitas        | 0,5 kg/dt                  | 0,5 kg/dt                 |
| Fluks            | 250 mol/jam.m <sup>2</sup> | 10 mol/jam.m <sup>2</sup> |
| Volume kontaktor | 151 m <sup>3</sup>         | 5,6 m <sup>3</sup>        |

Pada tabel 5.8 terlihat bahwa fluks yang diperoleh scrubber konvensional memang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan kontaktor *hollow fiber*. Meskipun demikian untuk kapasitas yang sama volume kontaktor *hollow fiber* ternyata jauh lebih kecil dibandingkan dengan scrubber konvensional (volume kontaktor membran 27 kali lebih kecil dibandingkan dengan kontaktor konvensional). Untuk prospek yang lebih baik peningkatan fluks kontaktor *hollow fiber* dapat dilakukan melalui optimasi terhadap pemilihan material membran, ketebalan membran serta rancangan modul yang digunakan.

## VI. KESIMPULAN dan SARAN

### 6.1. Kesimpulan

Dalam penelitian tahun pertama ini telah dilakukan tahapan-tahapan penelitian: karakterisasi membran, studi stabilitas membran, pemodelan kontaktor membran dan pembuatan prototipe kontaktor membran modul longitudinal untuk pengendalian emisi gas buang.

Hasil yang diperoleh untuk karakterisasi membran menunjukkan bahwa ukuran pori, distribusi pori, maupun geometri pori untuk Polietersulfon (PES) dan Polipropilen (PP) memenuhi kriteria untuk digunakan sebagai kontaktor membran. Pengujian stabilitas terhadap kedua jenis membran menunjukkan bahwa kedua jenis membran menunjukkan ketahanan yang baik terhadap bahan kimia dan pH. Kedua jenis membran juga mempunyai tekanan maksimum yang diperbolehkan sebesar 3 bar. Sedangkan pengujian ketahanan terhadap temperatur menunjukkan bahwa membran Polipropilen mempunyai ketahanan temperatur yang lebih tinggi dibandingkan dengan Polietersulfon.

Pemodelan kontaktor membran hollow fiber juga telah dilakukan dengan asumsi membran dianggap sebagai silinder porous dengan pendekatan media berpori mengikuti model Darcy dan Brikman-Darcy. Model disusun dari persamaan neraca momentum dan neraca massa. Penyelesaian model dilakukan secara numerik menggunakan Metode Volume Hingga. Hasil yang diperoleh adalah profil distribusi aliran dan profil distribusi konsentrasi. Dari validasi yang dilakukan diperoleh hasil bahwa model Brinkman-Darcy lebih sesuai untuk pendekatan kontaktor membran *hollow fiber*.

Dari hasil perbandingan antara kontaktor membran dengan scrubber konvensional, dapat diketahui bahwa kontaktor membran lebih efektif dalam pengurangan volume scrubber konvensional. Penggunaan kontaktor membran akan mengurangi volume alat sampai 27 kali lebih kecil.

### 6.2. Saran

Untuk lebih mempermudah dan diperoleh hasil yang lebih akurat, analisis konsentrasi gas yang keluar dari kontaktor membran sebaiknya dilakukan menggunakan Gas Chromatography.

## VII. RENCANA / PENELITIAN TAHAP SELANJUTNYA

### A. TUJUAN KHUSUS

Secara umum tujuan penelitian ini adalah meningkatkan kinerja kontaktor membran untuk pengendalian emisi gas buang melalui disain dan pabrikasi modul membran hollow fiber transversal. Secara khusus, tujuan penelitian ini adalah:

1. Perancangan dan pabrikasi modul membran transversal
2. Studi pengaruh parameter proses terhadap laju transfer massa dan hilang tekan

### B. METODE

#### 1. Perancangan dan pabrikasi modul transversal

Membran disusun dalam sebuah unit yang disebut modul. Kriteria desain untuk kontaktor membran berbeda dengan desain membran filtrasi lainnya seperti reverse osmosis, ultrafiltrasi dan pemisahan gas. Perbedaan yang pertama adalah adanya dua umpan dan dua keluaran karena adanya dua fluida yang digunakan. Sedangkan yang kedua adalah pentingnya hidrodinamika dan distribusi fluida di sekitar *fiber*. Oleh karena itu, diperlukan suatu desain modul membran yang lebih baik dapat mengatasi permasalahan dalam pemilihan modul pada kontaktor membran. Dalam studi desain modul ini, ditentukan kriteria pemilihan modul membran dan evaluasi kemungkinan pola aliran yang berhubungan dengan luas permukaan membran dan fluks SO<sub>2</sub> tiap masukan energi. Modul *hollow fiber* dipilih dalam studi ini karena mempunyai *packing density* yang paling tinggi dibandingkan dengan jenis modul yang lain, sehingga semua studi dalam penelitian ini menggunakan modul *hollow fiber*. Modul membran *hollow fiber* dapat dioperasikan dengan dua aliran umpan. Aliran pertama, dikenal sebagai aliran longitudinal dimana umpan dialirkan secara pararel terhadap fiber. Sedangkan yang kedua, umpan dialirkan tegak lurus fiber dan disebut dengan aliran transversal. Kebanyakan modul membran didesain untuk aliran longitudinal karena lebih sederhana. Namun, modul longitudinal ini mempunyai kekurangan karena masalah *channeling* terutama untuk diameter fiber yang sangat kecil. Selain itu karena sifat aliran longitudinal, koefisien perpindahan massa yang tinggi susah untuk diperoleh. Untuk mengatasi kendala modul longitudinal, dilakukan desain modul transversal yang dapat meningkatkan pressure drop.

2. Studi pengaruh parameter proses terhadap laju transfer massa dan hilang tekan  
Studi pengaruh parameter proses terhadap laju transfer massa dan hilang tekan dilakukan untuk mengetahui kinerja kontaktor membran modul transversal. Parameter proses yang akan digunakan meliputi :

- Laju alir umpan
- Konsentrasi umpan
- Temperatur umpan
- Konsentrasi sorben

Laju transfer massa dihitung dengan memperhatikan konsentrasi SO<sub>2</sub> pada sorben dan konsentrasi SO<sub>2</sub> pada umpan setelah melewati kontaktor membran. Analisis konsentrasi SO<sub>2</sub> dilakukan dengan metode Iodimetri dengan larutan penitran I<sub>2</sub> dan Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Hilang tekan pada modul diukur dengan menggunakan manometer.

### C. JADWAL KERJA

Pada tahun ke dua kegiatan penelitian yang akan dilakukan meliputi perancangan dan pabrikasi modul transversal dan studi pengaruh parameter proses terhadap laju transfer massa dan hilang tekan. Perancangan dan pabrikasi modul transversal dilakukan pada bulan kesatu sampai ketiga. Pada bulan keempat dimulai run kontaktor membran dengan modul transversal sekaligus dilakukan studi pengaruh parameter proses terhadap laju transfer massa dan hilang tekan. Studi ini dilakukan sampai bulan kedelapan. Parameter proses yang akan diuji untuk mengetahui kinerja kontaktor membran adalah:

- Laju alir umpan
- Konsentrasi umpan
- Temperatur umpan
- Konsentrasi sorben

Selain secara eksperimental, juga dilakukan simulasi numerik pada berbagai parameter proses. Hasil simulasi selanjutnya divalidasi dengan hasil eksperimen. Pada bulan ke sepuluh diharapkan rangkaian penelitian pada tahun kedua selesai dilakukan.

Pembuatan laporan kemajuan I dan publikasi ketiga akan dilakukan pada bulan ke lima. Publikasi akan dilakukan pada Seminar Nasional Rekayasa Kimia dan Proses 2004 Jurusan Teknik Kimia UNDIP bulan Juli 2003. Selain itu akan dibuat artikel untuk dipublikasikan di Jurnal Reaktor Teknik Kimia UNDIP edisi Juni, volume I tahun 2004 (terakreditasi) sebagai publikasi ke empat. Pada bulan ke sembilan akan dibuat draf paten biasa mengenai peralatan dan proses dari penelitian yang telah dilakukan. Seluruh rangkaian penelitian di tahun II dijadwalkan telah selesai pada bulan ke sepuluh

sehingga pada bulan ini kegiatan yang akan dilakukan hanya pembuatan laporan dan publikasi ke lima. Publikasi akan dilakukan di Seminar Nasional Fundamental dan Aplikasi Teknik Kimia 2004 Jurusan Teknik Kimia ITS pada akhir November 2004.

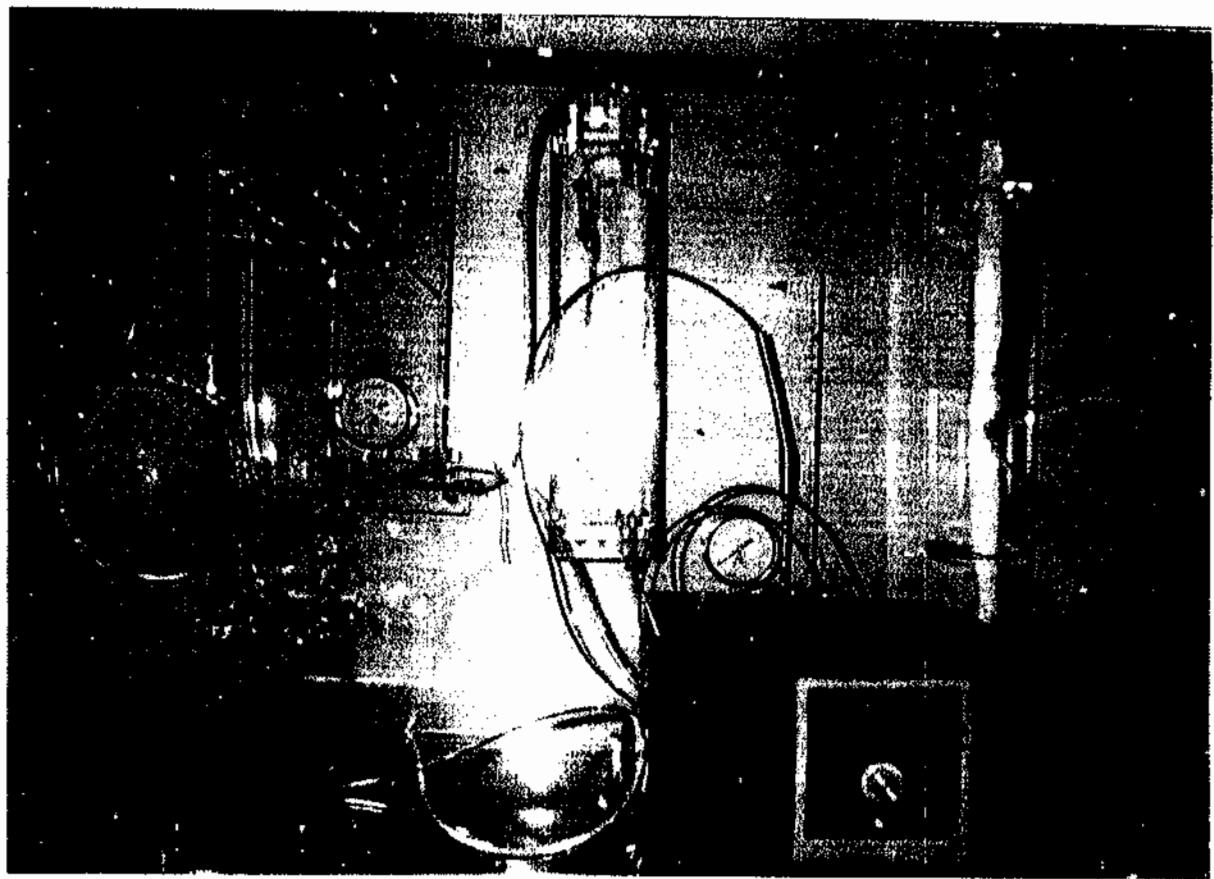
Tabel 7.1 Jadwal Kerja Tahun Kedua

## D. DAFTAR PUSTAKA

1. Ho., W.S. and K.K. Sirkar, (1992), "Membrane Handbook", Van Nostrand Reinhold, New York, 885-899.
2. Mulder, M, (1996), " Basic Principles of Membrane Technology ", 2<sup>nd</sup> ed., Kluwer Academic Pub., Netherlands.
3. Zhang, Q. and E.L. Cussler, (1985), " Hollow Fiber Gas Membrane ", AIChE J., **31**(9), 1548-1553.
4. Iversen, S.B., V.K. Bhatia, K. Dam-Johansen, and G. Jonsson, (1997), " Characterization of Microporous Membranes for Use in Membrane Contactors", *J. Membrane Sci.*, **130**, p. 205-217.
5. Yang, M.C., and E.L. Cussler, (1986), "Designing Hollow Fiber Contactors ", AIChE J., **32**(11), 1910-1916.
6. Roberts, D.L., and S.K. Friendlander, (1980), " Sulfur Dioxide Transport Through Aqueous Solutions: Part I Theory ", AIChE J., **26**(4), 594-602.
7. Roberts, D.L., and S.K. Friendlander, (1980), " Sulfur Dioxide Transport Through Aqueous Solutions: Part II Experimental Results and Comparison with Theory ", AIChE J., **26**(4), 602-610.
8. Zhang, Q., and E.L. Cussler, (1985), "Microporous Hollow Fiber for Gas Separation I-Mass Transfer in The liquid", *J. Membrane Sci.*, **23**, 321-333.
9. Zhang, Q., and E.L. Cussler, (1985), "Microporous Hollow Fiber for Gas Separation II-Mass Transfer Across the Membrane", *J. Membrane Sci.*, **23**, 321-333.
10. Kreulan, H., C.A. Smolders, G.F. Versteeg, and W.P.M. van Swaaij, "Microporous Hollow Fiber Membranes as Gas-Liquid Contactor : Part.1 Physical Mass Transfer Processes", *J. Membrane. Sci.*, **78**, p. 197-216.
11. Kreulan, H., C.A. Smolders, G.F. Versteeg and W.P.M. Van Swaaij, (1993), " Microporous Hollow Fiber Membrane Module as Gas-Liquid Contactors: Part.2 Mass Transfer with Chemical Reaction", *J. Membrane. Sci.*, **78**, p. 217-238.
12. Rangwala, H.A., (1996), "Absorption of CO<sub>2</sub> into Aqueous Solution using hollow Fiber Membrane Contactors", *J. Membrane. Sci.*, **112**, p.229-240.
13. Rogers, J.D., and R.L. Long, (1997), "Modeling Hollow Fiber Membrane Contactor Using Film Theory, Voronoi Tessellation and Facilitation Factors for Systems with Interface Reactions", *J. Membrane. Sci.*, **134**, p. 1-17.
14. Viegas, R.M.C., M. Rodriguez, S. Luque, J.R. Alvarez, I.M. Coelhoso, and J.P.S.G. Crespo, (1998), " Mass Transfer Correlation in Membrane Extraction: Analysis of Wilson-plot Methodology", *J. Membrane. Sci.*, **143**, p.129-142.

15. Coker, D.T., B.D. Freeman, and G.K. Fleming, (1998), "Modeling Multicomponent Gas Separation Using Hollow Fiber Membrane Contactors", *AIChE J.*, **44**(6), p.1289-1302.
16. Jansen, A.E., H. Paul, and H.M. Feron, "Method for Gas Across The Membrane", US Patent 5,749,941, May 12, 1998.
17. Shih-Yao B., Hu and J.M. Wiencek, (1998), "Emulsion Liquid Membrane Extraction of Copper Using a Hollow Fiber Contactor", *AIChE J.*, **44**, pp. 571-581.
18. Poddar, T.K., S. Majumdar, and K.K. Sirkar, (1996), "Removal of VOCs from Air by Membrane Based Absorption and Stripping", *J. Membrane Sci.*, **120**, p. 221-237.
19. Bird, R.R., W.E., Steward, and E.N. Lightfoot (1960), "Transport Phenomena", John Wiley and Sons, New York.
20. Brodkey, R.S., and H.C. Hershey, (1988), "Transport Phenomena: A Unified Approach", Mc. Graw Hill Book Company
21. Hikita, H., S. Asai, and T. Tsuji, (1977), "Absorption of Sulfur Dioxide into Aqueous Sodium Hydroxide and Sodium Sulfite Solutions", *AIChE J.*, **26**(4), 594-544.
22. Rautenbatch, R., and R. Albrecht, (1989), "Membrane Process", John Willey and Sons Ltd, England.
23. Cabasso, I., et.al, (1980), "Hollow Fiber Membranes, Kirk-Otmer, Ency. Of Chem. Tech.", vol 12, 3<sup>rd</sup> ed., 492-517.
24. Knops, F.N.M., Futselaar, H., dan Racz, I.G., (1992), "The Transversal Flow Microfiltration Module", *J. Membrane Sci.*, **73**, 153-161.

**PROTOTIPE KONTAKTOR MEMBRAN HOLLOW  
FIBER LONGITUDINAL YANG TELAH DIBUAT DI  
LABORATORIUM TIM PENELITI PENGUSUL**



**PROGRAM KOMPUTER MENGGUNAKAN BAHASA  
PENROGRAMAN FORTRAN**

PROGRAM MAINPROGRAM

C FIBER LENGTH =25 CM=0.25M  
C OUTSIDE DIAMETER=0.5 MM=0.5.10-3M

CINI KALO GRAVITASINYA DI U positif  
IMPLICIT NONE  
REAL\*8 PR,PZ,POR  
INTEGER NR,NZ,IMAX,JMAX,I,J,IC,ITER,NF  
PARAMETER (PR=0.5D-3,PZ=25D-2)  
PARAMETER (NR=20,NZ=20,IMAX=NZ+2,JMAX=NR+2)

C U MOMENTUM

REAL\*8 Aee(IMAX,JMAX),Aw(IMAX,JMAX),Aen(IMAX,JMAX)  
REAL\*8 Aes(IMAX,JMAX),Ae(IMAX,JMAX),RR(JMAX)  
REAL\*8 U(IMAX,JMAX),SCU(IMAX,JMAX),RS(JMAX),RPV(JMAX)

C V MOMENTUM

REAL\*8 Ass(IMAX,JMAX),Asw(IMAX,JMAX),Ase(IMAX,JMAX)  
REAL\*8 An(IMAX,JMAX),As(IMAX,JMAX),V(IMAX,JMAX),RRTV(JMAX)  
REAL\*8 SCV(IMAX,JMAX),REN(JMAX),RRTU(JMAX),RES(JMAX)

C PRESSURE: P

REAL\*8 AWP(IMAX,JMAX),AEP(IMAX,JMAX),APS(IMAX,JMAX)  
REAL\*8 APN(IMAX,JMAX),APP(IMAX,JMAX),RRTP(JMAX)  
REAL\*8 BP(IMAX,JMAX),P(IMAX,JMAX),PP(IMAX,JMAX)  
REAL\*8 DR(JMAX),DZ(IMAX),PH(IMAX,JMAX),RNP(JMAX),RSP(JMAX)

REAL\*8 DIFSUM,TFLOW,EPS,DENS,VISK,Uo,PREF,G,ALFAM,ALFAP,RCONV,YR  
REAL\*8 TOR,PS,DPR,KD,DIV,DK,KMKD  
REAL\*8 KMOMD,KM,GAMMA,SC,DOMD,Eo,CAGi,R,T

C

C CONCENTRATION

REAL\*8 Aec(IMAX,JMAX),Awc(IMAX,JMAX),Anc(IMAX,JMAX),Asc(IMAX,JMAX)  
REAL\*8 DEC(IMAX,JMAX),DWC(IMAX,JMAX),DNC(IMAX,JMAX),DSC(IMAX,JMAX)  
REAL\*8 FEC(IMAX,JMAX),FWC(IMAX,JMAX),FNC(IMAX,JMAX),FSC(IMAX,JMAX)  
REAL\*8 APCEC(IMAX,JMAX),APCNC(IMAX,JMAX)  
REAL\*8 APCSC(IMAX,JMAX),SCC(IMAX,JMAX),CONS(IMAX,JMAX)  
REAL\*8 ApC(IMAX,JMAX),APCW(C(IMAX,JMAX)  
REAL\*8 RE(IMAX,JMAX),SH(IMAX,JMAX),KG(IMAX,JMAX),KOV(IMAX,JMAX)

OPEN(1,FILE='DTCONS2.DAT')  
OPEN(2,FILE='FERICK.HSL')  
OPEN(3,FILE='RBRICK.HSL')  
OPEN(4,FILE='TBRICK.HSL')

READ(1,\*)DENS,VISK,DIV  
READ(1,\*)Uo,PREF,G,R,T  
READ(1,\*)ALFAM,ALFAP,GAMMA  
READ(1,\*)POR,NF,DK,DOMD  
READ(1,\*)PS,DPR,Eo

CALL TORKD(POR,NF,DPR,PS,TOR,KD)

CALL GRID(DR,DZ)

C

WRITE(3,400)

RR(1)=PR/2.  
RR(22)=PR/2.  
RR(2)=PR/2.- (0.5\*2.5D-5)  
RR(21)=PR/2-(0.5\*2.5D-5)

DO J=2,10  
RR(J+1)=RR(J)-2.5D-5  
ENDDO

RR(12)=RR(11)

```

DO J=12,19
  RR(J+1)=RR(J)+2. SD-S
ENDDO

C CALCULATION OF R LENGTH AT EACH GRID POINTS
DO J=1,JMAX
  RES(J)=(RR(J)+RR(J+1))/2
  REN(J)=(RR(J)+RR(J-1))/2
  RRTU(J)=0.5*(RES(J)+REN(J))
  RS(J)=(RR(J)+RR(J+1))/2
  RPV(J)=(RR(J)+RR(J-1))/2
  RRTV(J)=0.5*(RS(J)+RPV(J))
  RNP(J)=(RR(J)+RR(J-1))/2
  RSP(J)=(RR(J)+RR(J+1))/2
  RRTP(J)=0.5*(RNP(J)+RSP(J))
ENDDO

C BOUNDARY CONDITIONS FOR U AND V AT INLET FLOW
DO J=1,6
  U(1,J)=0
ENDDO
DO J=17,JMAX
  U(1,J)=0
ENDDO
DO J=7,16
  U(1,J)=Uo
ENDDO

DO J=2,JMAX-1
  V(1,J)=0.
ENDDO

C BOUNDARY CONDITIONS FOR U AND V AT SOLID WALL (OUTSIDE DIAMETER OF FIBER)
DO I=1,IMAX
  U(I,JMAX)=0.
  U(I,1)=0.
ENDDO

C
C INITIAL GUESS FOR P
DO I=1,IMAX
  DO J=1,JMAX
    P(I,J)=0.
  ENDDO
ENDDO

C INITIAL GUESS FOR U,V, AND CONS
DO I=2,IMAX
  DO J=1,JMAX
    U(I,J)=0.
    V(I,J)=0.
    CONS(I,J)=1.0
  ENDDO
ENDDO

C
C GRID VECTOR U AND V

DO J=1,JMAX
  RNP(J)=(RR(J)+RR(J+1))/2
  RSP(J)=(RR(J)+RR(J-1))/2
  RRTP(J)=0.5*(RNP(J)+RSP(J))
ENDDO

DIFSUM=3.
EPS=1.E-6
ITER=0

C START ITERATION
DO 1500 WHILE(DIFSUM .GE. EPS)
  ITER=ITER+1

```

```

C U MOMENTUM COEFFICIENT
20      FORMAT(1X,I2,102F11.10)
C
C ZLINES
C     GENERATION OF U MOMENTUM COEFFICIENT
CALL KOEFUZ(VISK,DR,DZ,DENS,SCU,P,U,V,RR,KD,POR,
$Aen,Aes,Aee,Aw,Ae)

C     SOLUTION OF U MOMENTUM EQUATION
CALL UZLINES(Aen,Aes,Aee,Ae,Aw,SCU,U,ALFAM)
C
C       WRITE(*,*)' U-ZLINES'
C       DO J=1,JMAX
C           WRITE(*,20)J,(U(I,J),I=1,IMAX-1)
C       ENDDO
C       PAUSE' U-ZLINES'

C V MOMENTUM COEFFICIENT
C RLINKS
C     GENERATION OF V MOMENTUM COEFFICIENT
CALL KOEFVR(VISK,DR,DZ,DENS,SCV,P,U,V,RR,KD,POR,
$Ase,Asw,Ass,An,As)

C SOLUTION OF V-ZLINES MOMENTUM EQUATION
CALL VRLLINES(Ase,Asw,An,As,Ass,SCV,V,ALFAM)
C
C       WRITE(*,*)' V-RLINES'
C       DO J=1,JMAX
C           WRITE(*,35)J,(V(I,J),I=1,IMAX)
C       ENDDO
35      FORMAT(1X,I2,102F11.8)
C
C -----
C     CALCULATION OF PRESSURE CORRECTION
C -----

C GUESS OF P CORRECTION
DO I=1,IMAX
    DO J=1,JMAX
        PP(I,J)=0.
    ENDDO
ENDDO
C
IC=0
C P ITERATION 6 TIMES
DO 70 WHILE(IC.LE.6)
    IC=IC+1
C PRESSURE CORRECTION COEFFICIENT
C RLINKS
C     CALL KOEPPCR(DENS,DZ,DR,U,V,BP,RR,POR,
C     $Ae,As,AEP,AWP,APS,APP)

    DO 50 J=2,JMAX-1
        IF((J.GE.2.AND.J.LE.6).OR.(J.GE.17.AND.J.LE.JMAX-1))THEN
            DO I=2,IMAX
                IF(I.EQ.IMAX)THEN
                    AWP(I,J)=(1/POR)*(DENS*DR(J)*DR(J)/Ae(I-1,J))
                    AEP(I,J)=0.
                ELSEIF(I.EQ.2)THEN
                    AWP(I,J)=0.
                    AEP(I,J)=(1/POR)*(DENS*DR(J)*DR(J)/Ae(I,J))
                ELSE
                    AWP(I,J)=(1/POR)*(DENS*DR(J)*DR(J)/Ae(I-1,J))
                    AEP(I,J)=(1/POR)*(DENS*DR(J)*DR(J)/Ae(I,J))
                ENDIF
            ENDDO
        ELSE
            DO I=2,IMAX
                IF(I.EQ.IMAX)THEN
                    AWP(I,J)=(DENS*DR(J)*DR(J))/Ae(I-1,J)
                    AEP(I,J)=0.
                ENDIF
            ENDDO
        ENDIF
    END

```

```

ELSEIF(I.EQ.2)THEN
    AWP(I,J)=0.
    AEP(I,J)=(DENS*DR(J)*DR(J))/Ae(I,J)
ELSE
    AWP(I,J)=(DENS*DR(J)*DR(J))/Ae(I-1,J)
    AEP(I,J)=(DENS*DR(J)*DR(J))/Ae(I,J)
ENDIF
ENDDO
ENDIF
50    CONTINUE

DO 55 I=2,IMAX-1
    DO J=2,JMAX-1
        IF(J.EQ.JMAX-1)THEN
            APS(I,J)=0.
            APN(I,J)=(1/POR)*(1/RRTP(J))*((RNP(J)*
$                DENS*DZ(I)*DZ(I))/As(I,J-1))
        ELSEIF(J.EQ.2)THEN
            APS(I,J)=(1/POR)*(1/RRTP(J))*((RSP(J)*
$                DENS*DZ(I)*DZ(I))/As(I,J))
            APN(I,J)=0.
        ELSEIF(J.GE.3.AND.J.LE.6)THEN
            APS(I,J)=(1/POR)*(1/RRTP(J))*((RSP(J)*DENS*DZ(I)
$                *DZ(I))/As(I,J))
            APN(I,J)=(1/POR)*(1/RRTP(J))*((RNP(J)*DENS*DZ(I)
$                *DZ(I))/As(I,J-1))
        ELSEIF(J.GE.17.AND.J.LE.JMAX-2)THEN
            APS(I,J)=(1/POR)*(1/RRTP(J))*((RSP(J)*DENS*DZ(I)
$                *DZ(I))/As(I,J))
            APN(I,J)=(1/POR)*(1/RRTP(J))*((RNP(J)*DENS*DZ(I)
$                *DZ(I))/As(I,J-1))
        ELSE
            APS(I,J)=(1/RRTP(J))*((RSP(J)*DENS*DZ(I)
$                *DZ(I))/As(I,J))
            APN(I,J)=(1/RRTP(J))*((RNP(J)*DENS*DZ(I)
$                *DZ(I))/As(I,J-1))
        ENDIF
        APP(I,J)=AWP(I,J)+AEP(I,J)+APS(I,J)+APN(I,J)

        IF(J.GE.2.AND.J.LE.6)THEN
            BP(I,J)=(1/POR)*((DENS*(U(I-1,J)-U(I,J)))*DR(J))
            +((1/RRTP(J))*((DENS*((RNP(J)*V(I,J-1))-(RSP(J)*
$                V(I,J))))*DZ(I)))
        ELSEIF(J.GE.17.AND.J.LE.JMAX-1)THEN
            BP(I,J)=(1/POR)*((DENS*(U(I-1,J)-U(I,J)))*DR(J))
            +((1/RRTP(J))*((DENS*((RNP(J)*V(I,J-1))-(RSP(J)*
$                V(I,J))))*DZ(I)))
        ELSE
            BP(I,J)=((DENS*(U(I-1,J)-U(I,J)))*DR(J))
            +((1/RRTP(J))*((DENS*((RNP(J)*V(I,J-1))-(RSP(J)*
$                V(I,J))))*DZ(I)))
        ENDIF
    ENDDO
55    CONTINUE

CALL PRLINES(AWP,AEP,APN,APP,APS,BP,PP)

C      WRITE(*,*)' PP-RLINES'
C      DO J=2,JMAX-1
C          WRITE(*,45)J,(PP(I,J),I=2,IMAX)
C      ENDDO

45      FORMAT(1X,I2,22F9.4)
C
70    CONTINUE

C PRESSURE CORRECTION CALCULATION
    DO I=1,IMAX
        DO J=1,JMAX
            P(I,J)=P(I,J)+ALFAP*PP(I,J)

```

```

        ENDDO
    ENDDO

    DO I=1,IMAX
        DO J=1,JMAX
            PH(I,J)=P(I,J)+PREF
        ENDDO
    ENDDO

C           WRITE(*,*)' P TERKOREksi'
C           DO J=1,JMAX
C               WRITE(*,60)J,(P(I,J),I=1,IMAX)
C           ENDDO
C           PAUSE' P TERKOREksi'
60       FORMAT(1X,I3,24F10.2)

C U CORRECTED CALCULATION
    DO I=2,IMAX-1
        DO J=2,JMAX-1
            U(I,J)=U(I,J)+(DR(J)/Ae(I,J))*(PP(I,J)-PP(I+1,J))
        ENDDO
    ENDDO

C V CORRECTED CALCULATION
    DO J=2,JMAX-2
        DO I=2,IMAX
            V(I,J)=V(I,J)+(DZ(I)/Ae(I,J))*(PP(I,J)-PP(I,J+1))
        ENDDO
    ENDDO

    do i=2,imax
        v(i,jmax-1)=v(i,jmax-2)
        v(i,1)=v(i,2)
    enddo

C           WRITE(*,*)' U-TERKOREksi '
C           DO J=1,JMAX
C               WRITE(*,24)J,(U(I,J),I=1,IMAX-1)
C           ENDDO
C           PAUSE'U KOREksi'

C           WRITE(*,*)' V-TERKOREksi '
C           DO J=1,JMAX-1
C               WRITE(*,23)J,(V(I,J),I=1,IMAX-1)
C           ENDDO
24       FORMAT(1X,I3,102D12.6)
23       FORMAT(1X,I3,102D11.4)

C ----- DEVELOPMENT OF PROGRAM TO CALCULATE CONCENTRATION ---
C
C     CALCULATION OF MEMBRANE RESISTANCE
    CALL KMEM(DOMD,POR,TOR,PR,DK,KMMD,KMKD,KM)

C     CALCULATION OF MASS TRANSFER COEFFICIENT ON GAS PHASE
    CALL KGAS(VISK,DIV,DENS,U,SC,RE,SH,KG)

C     CALCULATION OF OVERALL MASS TRANSFER COEFFICIENT
    CALL KOVERALL(KG,KM,KOV)

C BOUNDARY CONDITIONS FOR CONS AT INLET FLOW
    DO J=1,JMAX
        CONS(1,J)=0.7
    ENDDO

C BOUNDARY CONDITIONS FOR CONS AT FIBER WALL
    DO I=1,IMAX-1
        DO J=1,JMAX
            CONS(I,JMAX)=KM*CONS(I,J)
            CONS(I,1)=0
        ENDDO
    ENDDO

```

```

C      concentration interface
CAGi=(1.9216*Eo)+0.006

DO 101 J=1,JMAX
  if(j.eq.1)then
    anc(i,j)=div/(0.5*2.5d-5)
    apc(i,j)=anc(i,j)+km
    aec=0.0
    awc=0.0
    asc=0.0
  C      scc=km*CAGi

  elseif(j.eq.jmax)then
    asc(i,j)=div/(0.5*2.5d-5)
    apc(i,j)=asc(i,j)+km
    aec=0.0
    awc=0.0
    anc=0.0
  C      scc=km*CAGi

  elseIF(J.GE.2.AND.J.LE.6)THEN
    DO I=2,IMAX-1
      if(i.eq.imax-1)then
        Aec(i,j)=0.0
        DWC(I,J)=(1/POR)*DIV*DR(J)/DZ(I)
        FWC(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I-1,J)+U(I,J))/2)*DR(J)
        Awc(I,J)=DWC(I,J)*APcWC(I,J)+DMAX1(FWC(I,J),0.)
      ELSE
        DEC(I,J)=(1/POR)*DIV*DR(J)/DZ(I+1)
        DWC(I,J)=(1/POR)*DIV*DR(J)/DZ(I)
        FEC(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I,J)+U(I+1,J))/2)*DR(J)
        FWC(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I-1,J)+U(I,J))/2)*DR(J)
        APcEC(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FEC(I,J)/
          DEC(I,J))))**5
        APcWC(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FWC(I,J)/
          DWC(I,J))))**5
        Aec(I,J)=DEC(I,J)*APcEC(I,J)+DMAX1(-FEC(I,J),0.)
        Awc(I,J)=DWC(I,J)*APcWC(I,J)+DMAX1(FWC(I,J),0.)
      ENDIF

      if(i.eq.imax-1)then
        Anc(i,j)=0.0
        Asc(i,j)=0.0
        Apc(i,j)=div/(0.5*0.0125)
      else
        DNC(I,J)=(1/POR)*((REN(J)*DIV*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)/
          (RRTU(J)*(DR(J-1)+DR(J))/2))
        DSC(I,J)=(1/POR)*((RES(J)*DIV*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)/
          (RRTU(J)*(DR(J)+DR(J+1))/2))
        FNC(I,J)=(1/POR)*(1/RRTU(J))*((REN(J)*DENS*
          ((V(I,J-1)+V(I+1,J-1))/2)*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)
        FSC(I,J)=(1/POR)*(1/RRTU(J))*((RES(J)*DENS*
          ((V(I,J)+V(I+1,J))/2)*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)
        APcNC(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FNC(I,J)/
          DNC(I,J))))**5
        APcSC(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FSC(I,J)/
          DSC(I,J))))**5
        Anc(I,J)=DNC(I,J)*APcNC(I,J)+DMAX1(FNC(I,J),0.)
        Asc(I,J)=DSC(I,J)*APcSC(I,J)+DMAX1(-FSC(I,J),0.)
        Apc(I,J)=Aec(I,J)+Awc(I,J)+Anc(I,J)+Asc(I,J)-
          (kov(i,j)*R*T)
      endif
      SOURCE TERM
      SCC(I,J)=0.0
    ENDDO
  elseIF(J.GE.17.AND.J.LE.JMAX-1)THEN
    DO I=2,IMAX-1
      if(i.eq.imax-1)then
        Aec(i,j)=0.0
        Awc(i,j)=div/(0.5*0.0125)

```



```

DWC(I,J)=(1/POR)*DIV*DR(J)/DZ(I)
FWC(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I-1,J)+U(I,J))/2)*DR(J)
APcWC(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FWC(I,J)/
      DWC(I,J))))**5)
Awc(I,J)=DWC(I,J)*APcWC(I,J)+DMAX1(FWC(I,J),0.)

$ ELSE
DEC(I,J)=(1/POR)*DIV*DR(J)/DZ(I+1)
DWC(I,J)=(1/POR)*DIV*DR(J)/DZ(I)
FEC(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I,J)+U(I+1,J))/2)*DR(J)
FWC(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I-1,J)+U(I,J))/2)*DR(J)
APcEC(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FEC(I,J)/
      DEC(I,J))))**5)
APcWC(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FWC(I,J)/
      DWC(I,J))))**5)
Aec(I,J)=DEC(I,J)*APcEC(I,J)+DMAX1(-FEC(I,J),0.)
Awc(I,J)=DWC(I,J)*APcWC(I,J)+DMAX1(FWC(I,J),0.)
ENDIF

C   if(i.eq.imax-1)then
C     Anc(i,j)=0.0
C     Asc(i,j)=0.0
C     Apc(i,j)=div/(0.5*0.0125)
C   else
C     DNC(I,J)=(1/POR)*(REN(J)*VISK*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)/
C               (RRTU(J)*(DR(J-1)+DR(J))/2))
C     DSC(I,J)=(1/POR)*((RES(J)*VISK*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)/
C               (RRTU(J)*(DR(J)+DR(J+1))/2))
C     FNC(I,J)=(1/POR)*(1/RRTU(J))*(REN(J)*DENS*
C               ((V(I,J-1)+V(I+1,J-1))/2)*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)
C     FSC(I,J)=(1/POR)*(1/RRTU(J))*(RES(J)*DENS*
C               ((V(I,J)+V(I+1,J))/2)*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)
C     APcNC(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FNC(I,J)/
C               DNC(I,J))))**5)
C     APcSC(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FSC(I,J)/
C               DSC(I,J))))**5)
C     Anc(I,J)=DNC(I,J)*APcNC(I,J)+DMAX1(FNC(I,J),0.)
C     Asc(I,J)=DSC(I,J)*APcSC(I,J)+DMAX1(-FSC(I,J),0.)
C     Apc(I,J)=Aec(I,J)+Awc(I,J)+Anc(I,J)+Asc(I,J)-
C               (kOV(i,j)*R*T)
C   endif
C   SOURCE TERM
C   SCC(I,J)=0.0
ENDDO
else
  DO I=2,IMAX-1
    if(i.eq.imax-1)then
      Aec(i,j)=0.0
      Awc(i,j)=div/(0.5*0.0125)
      DWC(I,J)=DIV*DR(J)/DZ(I)
      FWC(I,J)=DENS*((U(I-1,J)+U(I,J))/2)*DR(J)
      APcWC(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FWC(I,J)/
          DWC(I,J))))**5)
      Awc(I,J)=DWC(I,J)*APcWC(I,J)+DMAX1(FWC(I,J),0.)
    ELSE
      DEC(I,J)=DIV*DR(J)/DZ(I+1)
      DWC(I,J)=DIV*DR(J)/DZ(I)
      FEC(I,J)=DENS*((U(I,J)+U(I+1,J))/2)*DR(J)
      FWC(I,J)=DENS*((U(I-1,J)+U(I,J))/2)*DR(J)
      APcEC(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FEC(I,J)/
          DNC(I,J))))**5)
      APcWC(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FWC(I,J)/
          DWC(I,J))))**5)
      Aec(I,J)=DEC(I,J)*APcEC(I,J)+DMAX1(-FEC(I,J),0.)
      Awc(I,J)=DWC(I,J)*APcWC(I,J)+DMAX1(FWC(I,J),0.)
    ENDIF
    if(i.eq.imax-1)then
      Anc(i,j)=0.0
      Asc(i,j)=0.0

```

```

C           Apc(i,j)=div/(0.5*0.0125)
C
C           else
$             DNC(I,J)=((REN(J)*DIV*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)/
$                           (RRTU(J)*(DR(J-1)+DR(J))/2))
$             DSC(I,J)=((RES(J)*DIV*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)/
$                           (RRTU(J)*(DR(J)+DR(J+1))/2))
$             FNC(I,J)=(1/RRTU(J))*(REN(J)*DENS*
$                           ((V(I,J-1)+V(I+1,J-1))/2)*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)
$             FSC(I,J)=(1/RRTU(J))*(RES(J)*DENS*
$                           ((V(I,J)+V(I+1,J))/2)*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)
$             APCNC(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FNC(I,J)/
$                           DNC(I,J)))**5)
$             APCSC(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FSC(I,J)/
$                           DSC(I,J)))**5)
$             ANC(I,J)=DNC(I,J)*APCNC(I,J)+DMAX1(FNC(I,J),0.)
$             ASC(I,J)=DSC(I,J)*APCSC(I,J)+DMAX1(-FSC(I,J),0.)
$             APC(I,J)=AEC(I,J)+AWC(I,J)+ANC(I,J)+ASC(I,J)-
$                           (KG(I,J)*R*T)
C
C           endif
C
C           SOURCE TERM
C           SCC(I,J)=0.0
C           enddo
C           endif
101      CONTINUE
C
C           SOLUTION OF CONCENTRATION EQUATION
CALL CRLINES(AEC,AWC,ANC,ASC,APC,SCC,GAMMA,CONS)
C
C           WRITE(*,*)' CRLINES'
C           DO J=1,JMAX
C             WRITE(*,*)J,(CONS(I,J),I=1,IMAX-1)
C           ENDDO
C           PAUSE'CRLINES'
C
C           CONVERGENCE CRITERIA
C           TOTAL INLET MASS FLOW
TFLOW=0
DO J=2,JMAX-1
  TFLOW=TFLOW+DABS(U(1,J)*DENS*DR(J))
ENDDO
DIFSUM=0.
DO I=2,IMAX-1
  DO J=2,JMAX-1
    DIFSUM=DIFSUM+DABS(BP(I,J))
  ENDDO
ENDDO
RCONV=DIFSUM/TFLOW
WRITE(*,*)'ITERASI = ',ITER,'     DIFSUM = ',DIFSUM
WRITE(3,410)ITER,RCONV
400  FORMAT(1X,'ITERASI ',5X,'NORMALIZED RESIDUAL TO INLET FLOW')
410  FORMAT(3X,I5,10X,E10.4)
C ===== OUTPUT PRINT FILE =====
IF(DIFSUM.LE.EPS)THEN
  WRITE(4,800)
  FORMAT(/1X,'RESULT OF U AND V VELOCITY')
800  FORMAT(4,810)PZ
  FORMAT(//1X,'FIBER LENGTH = ',F4.2,' M')
810  FORMAT(4,820)PR
  FORMAT(1X,'FIBER INSIDE DIAMETER = ',F8.6,' M')
820  FORMAT(4,825)POR
  FORMAT(1X,'MEMBRANE POROSITY=',F4.2)
825  FORMAT(4,830)VISK
  FORMAT(1X,'FLUID VISCOSITY = ',E8.3,' KG/MS')
830  FORMAT(4,840)DENS
  FORMAT(1X,'FLUID DENSITY = ',F4.2,' KG/M3')
840  FORMAT(4,850)UO
  FORMAT(1X,'INITIAL VELOCITY OF U = ',F6.4,' M/S')
850

```

```

      WRITE(4,880)PREF
880  FORMAT(1X,'REFERENCE PRESSURE = ',E8.3,' KG N/M2')
      WRITE(4,860)NR
860  FORMAT(1X,'NUMBER OF R GRID =',I3,)
      WRITE(4,870)NZ
870  FORMAT(1X,'NUMBER OF Z GRID =',I3,)
      WRITE(4,210)
210  FORMAT(/40X,'FLOW FIELD OF U AND V')

C      DISPLAY RESULT OF PRESSURE DISTRIBUTION

      WRITE(4,411)
      WRITE(4,320)
      WRITE(4,401)
      WRITE(4,320)
401  FORMAT('      R-Z    |  0.000   0.01875   0.04375   0.06875   0.09
$375   0.11875   0.14375   0.16875   0.19375   0.21875   0.24375')
411  FORMAT(/50X,'PRESSURE DISTRIBUTION' /)

      YR=5.E-4
      DO J=JMAX,1,-1
        IF(J.EQ.JMAX)THEN
          WRITE(4,701)YR,(PH(I,J),I=1,IMAX,2)
        ELSEIF(J.EQ.2)THEN
          YR=YR-(0.5*DR(J))           !UNTUK J=2
          WRITE(4,701)YR,(PH(I,J),I=1,IMAX,2)
        ELSEIF(J.EQ.1)THEN
          YR=0.0
          WRITE(4,701)YR,(PH(I,J),I=1,IMAX,2)
        ELSE
          YR=YR-DR(J)
          WRITE(4,701)YR,(PH(I,J),I=1,IMAX,2)
        ENDIF
      ENDDO
      WRITE(4,320)

C      DISPLAY RESULT OF U VELOCITY DISTRIBUTION
      WRITE(4,310)
      WRITE(4,320)
      WRITE(4,300)
      WRITE(4,320)

300  FORMAT('      R-Z    |  0.000   0.0250   0.050   0.075   0.1
$00   0.125   0.150   0.175   0.200   0.225   0.250')
310  FORMAT(/40X,'U VELOCITY DISTRIBUTION' /)
320  FORMAT(3X,'-----')
      $-----
      $'
      YR=5.E-4
      DO J=JMAX,1,-1
        IF(J.EQ.JMAX)THEN
          WRITE(4,700)YR,(U(I,J),I=1,IMAX-1,2)
        ELSEIF(J.EQ.2)THEN
          YR=YR-(0.5*DR(J))           !UNTUK J=2
          WRITE(4,700)YR,(U(I,J),I=1,IMAX-1,2)
        ELSEIF(J.EQ.1)THEN
          YR=YR-(0.5*DR(J-1))
          WRITE(4,700)YR,(U(I,J),I=1,IMAX-1,2)
        ELSE
          YR=YR-DR(J)
          WRITE(4,700)YR,(U(I,J),I=1,IMAX-1,2)
        ENDIF
      ENDDO
      WRITE(4,320)

700  FORMAT(1X,E10.4,'|'22E10.4)
701  FORMAT(1X,E10.4,'|'22F10.2)
C      DO J=1,JMAX
C        WRITE(4,*)J,(U(I,J),I=1,IMAX-1,5)
C        WRITE(4,24)J,(U(I,J),I=1,IMAX-1)
C      ENDDO

```

```

        WRITE(4,*)

C      DISPLAY RESULT OF V VELOCITY DISTRIBUTION
        WRITE(4,510)
        WRITE(4,320)
        WRITE(4,500)
        WRITE(4,320)

500 FORMAT('      R-Z | 0.000   0.01875   0.04375   0.06875   0.09
$375   0.11875   0.14375   0.16875   0.19375   0.21875   0.24375')
510 FORMAT('//40X,'V VELOCITY DISTRIBUTION')

YR=5.E-4
DO J=JMAX-1,1,-1
  IF(J.EQ.JMAX-1)THEN
    WRITE(4,700)YR,(V(I,J),I=1,IMAX-1,2)
  ELSEIF(J.EQ.2)THEN
    YR=YR-(0.5*DR(J)) !UNTUK J=2
    WRITE(4,700)YR,(V(I,J),I=1,IMAX-1,2)
  ELSEIF(J.EQ.1)THEN
    YR=0.0
    WRITE(4,700)YR,(V(I,J),I=1,IMAX-1,2)
  ELSE
    YR=YR-DR(J)
    WRITE(4,700)YR,(V(I,J),I=1,IMAX-1,2)
  ENDIF
ENDDO
WRITE(4,320)

C      DISPLAY RESULT OF CONCENTRATION DISTRIBUTION
        WRITE(4,315)
        WRITE(4,320)
        WRITE(4,300)
        WRITE(4,320)

C 300 FORMAT('      R-Z | 0.000   0.0250   0.050   0.075   0.1
C $00   0.125   0.150   0.175   0.200   0.225   0.250')
315 FORMAT('//40X,'CONCENTRATION DISTRIBUTION')

YR=5.E-4
DO J=JMAX,1,-1
  IF(J.EQ.JMAX)THEN
    WRITE(4,700)YR,(CONS(I,J),I=1,IMAX,2)
  ELSEIF(J.EQ.2)THEN
    YR=YR-(0.5*DR(J)) !UNTUK J=2
    WRITE(4,700)YR,(CONS(I,J),I=1,IMAX,2)
  ELSEIF(J.EQ.1)THEN
    YR=0.0
    WRITE(4,700)YR,(CONS(I,J),I=1,IMAX,2)
  ELSE
    YR=YR-DR(J)
    WRITE(4,700)YR,(CONS(I,J),I=1,IMAX,2)
  ENDIF
ENDDO
WRITE(4,320)

        WRITE(4,110)ITER
ENDIF
110      FORMAT('//1X,'ITERATION NUMBER = ',15)

C
C SET ZERO COEFFICIENT
  DO I=1,IMAX-1
    DO J=1,JMAX-1
      Aee(I,J)=0.
      Aw(I,J)=0.
      Aen(I,J)=0.
      Aes(I,J)=0.
      Ae(I,J)=0.
      Ass(I,J)=0.
      An(I,J)=0.

```

```

Ase(I,J)=0.
Asw(I,J)=0.
As(I,J)=0.
AWP(I,J)=0.
AEP(I,J)=0.
APS(I,J)=0.
APN(I,J)=0.
APP(I,J)=0.
SCU(I,J)=0.
SCV(I,J)=0.
Aec(I,J)=0.
Awc(I,J)=0.
Anc(I,J)=0.
Asc(I,J)=0.
SCC(I,J)=0.
BP(I,J)=0.

ENDDO
ENDDO
1500    CONTINUE
C
CLOSE(1)
CLOSE(2)
CLOSE(3)
CLOSE(4)

END

C ===== END OF MAINPROGRAM =====
C **** SUBROUTINE -3 KOEFUZ ****
C **** SUBROUTINE KOEFUZ(VISK,DR,DZ,DENS,SCU,P,U,V,RR,KD,POR,
$Aen,Aes,Aee,Aw,Ae)

IMPLICIT NONE
REAL*8 PZ,PR
INTEGER NZ,NR,IMX,JMX,I,J
PARAMETER (PR=0.5D-3,PZ=25D-2)
PARAMETER (NR=20,NZ=20)
PARAMETER (IMX=NZ+2,JMX=NR+2)
REAL*8 Aee(IMX,JMX),Aw(IMX,JMX),Aen(IMX,JMX)
REAL*8 Aes(IMX,JMX),Ae(IMX,JMX)
REAL*8 DE(IMX,JMX),DPU(IMX,JMX),DEN(IMX,JMX)
REAL*8 DES(IMX,JMX),FE(IMX,JMX),FPU(IMX,JMX)
REAL*8 FEN(IMX,JMX),FES(IMX,JMX),U(IMX,JMX),V(IMX,JMX)
REAL*8 APcE(IMX,JMX),APcCPU(IMX,JMX),APcEN(IMX,JMX)
REAL*8 APcES(IMX,JMX),SCU(IMX,JMX),P(IMX,JMX),RR(JMX)
REAL*8 DZ(IMX),DR(JMX),REN(JMX),RRTU(JMX),RES(JMX)
REAL*8 DENS,VISK,KD,POR

DO J=1,JMX
    RES(J)=(RR(J)+RR(J+1))/2
    REN(J)=(RR(J)+RR(J-1))/2
    RRTU(J)=0.5*(RES(J)+REN(J))
ENDDO

DO 100 J=2,JMX-1
    IF((J.GE.2.AND.J.LE.6).OR.(J.GE.17.AND.J.LE.JMX-1))THEN
        DO I=2,IMX-1
            IF(I.EQ.IMX-1)THEN
                DPU(I,J)=(1/POR)*VISK*DR(J)/DZ(I)
                FPU(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I-1,J)+U(I,J))/2)*DR(J)
                APcCPU(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FPU(I,J)/
                    DPU(I,J)))**5)
                DEN(I,J)=(1/POR)*((REN(J)*VISK*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)/
                    (RRTU(J)*(DR(J-1)+DR(J))/2))
                DES(I,J)=(1/POR)*((RES(J)*VISK*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)/
                    (RRTU(J)*(DR(J)+DR(J+1))/2))
                FEN(I,J)=(1/POR)*(1/RRTU(J))*(REN(J)*DENS*
                    ((V(I,J-1)+V(I+1,J-1))/2)*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)
            ENDIF
        ENDDO
    ENDIF
100   CONTINUE

```

```

FES(I,J)=(1/POR)*(1/RRTU(J))* (RES(J)*DENS*
$ ((V(I,J)+V(I+1,J))/2)*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)
APcEN(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FEN(I,J)/
$ DEN(I,J)))**5)
APcES(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FES(I,J)/
$ DES(I,J)))**5)
Aee(I,J)=0.0
Aw(I,J)=DPU(I,J)*APcPU(I,J)+DMAX1(FPU(I,J),0.)
Aen(I,J)=0.0
Aes(I,J)=0.0
C Aen(I,J)=DEN(I,J)*APcEN(I,J)+DMAX1(FEN(I,J),0.)
C Aes(I,J)=DES(I,J)*APcES(I,J)+DMAX1(-FES(I,J),0.)
Ae(I,J)=Aee(I,J)+Aw(I,J)+Aen(I,J)+Aes(I,J)-(VISK/KD)
SCU(I,J)=0.0
ELSE
DE(I,J)=(1/POR)*VISK*DR(J)/DZ(I+1)
DPU(I,J)=(1/POR)*VISK*DR(J)/DZ(I)
FE(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I,J)+U(I+1,J))/2)*DR(J)
FPU(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I-1,J)+U(I,J))/2)*DR(J)
DEN(I,J)=(1/POR)*((REN(J)*VISK*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)/
$ (RRTU(J)*(DR(J-1)+DR(J))/2))
DES(I,J)=(1/POR)*((RES(J)*VISK*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)/
$ (RRTU(J)*(DR(J)+DR(J+1))/2))
FEN(I,J)=(1/POR)*(1/RRTU(J))* (REN(J)*DENS*
$ ((V(I,J-1)+V(I+1,J-1))/2)*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)
FES(I,J)=(1/POR)*(1/RRTU(J))* (RES(J)*DENS*
$ ((V(I,J)+V(I+1,J))/2)*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)
APcEN(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FEN(I,J)/
$ DEN(I,J)))**5)
APcES(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FES(I,J)/
$ DES(I,J)))**5)
APcE(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FE(I,J)/
$ DE(I,J)))**5)
APcCPU(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FPU(I,J)/
$ DPU(I,J)))**5)
Aee(I,J)=DE(I,J)*APcE(I,J)+DMAX1(-FE(I,J),0.)
Aw(I,J)=DPU(I,J)*APcCPU(I,J)+DMAX1(FPU(I,J),0.)
Aen(I,J)=DEN(I,J)*APcEN(I,J)+DMAX1(FEN(I,J),0.)
Aes(I,J)=DES(I,J)*APcES(I,J)+DMAX1(-FES(I,J),0.)
Ae(I,J)=Aee(I,J)+Aw(I,J)+Aen(I,J)+Aes(I,J)-(VISK/KD)
C SOURCE TERM
C SCU(I,J)=DR(J)*(P(I,J)-P(I+1,J))*(DZ(I)+DZ(I+1))/2
C SCU(I,J)=0.0
C endif
ENDIF
ENDDO

ELSE
DO I=2,IMX-1
IF(I.EQ.IMX-1)THEN
DPU(I,J)=VISK*DR(J)/DZ(I)
FPU(I,J)=DENS*((U(I-1,J)+U(I,J))/2)*DR(J)
APcCPU(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FPU(I,J)/DPU(I,J)))
$ **5)
DEN(I,J)=((REN(J)*VISK*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)/
$ (RRTU(J)*(DR(J-1)+DR(J))/2))
DES(I,J)=((RES(J)*VISK*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)/
$ (RRTU(J)*(DR(J)+DR(J+1))/2))
FEN(I,J)=(1/RRTU(J))* (REN(J)*DENS*
$ ((V(I,J-1)+V(I+1,J-1))/2)*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)
FES(I,J)=(1/RRTU(J))* (RES(J)*DENS*
$ ((V(I,J)+V(I+1,J))/2)*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)
APcEN(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FEN(I,J)/
$ DEN(I,J)))**5)
APcES(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FES(I,J)/
$ DES(I,J)))**5)
Aee(I,J)=0.
Aen(I,J)=0.0
Aes(I,J)=0.0
C Aen(I,J)=DEN(I,J)*APcEN(I,J)+DMAX1(FEN(I,J),0.)
C Aes(I,J)=DES(I,J)*APcES(I,J)+DMAX1(-FES(I,J),0.)

```

```

C           Aw(I,J)=1/(0.5*dz(i-1))
C           Aw(I,J)=DPU(I,J)*APcCPU(I,J)+DMAX1(FPU(I,J),0)
C           Ae(I,J)=Aee(I,J)+Aw(I,J)+Aen(I,J)+Aes(I,J)
C           SCU=0.0
C
C           ELSE
C               DE(I,J)=VISK*DR(J)/DZ(I+1)
C               DPU(I,J)=VISK*DR(J)/DZ(I)
C               FE(I,J)=DENS*((U(I,J)+U(I+1,J))/2)*DR(J)
C               FPU(I,J)=DENS*((U(I-1,J)+U(I,J))/2)*DR(J)
C               APcE(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FE(I,J)/
C                   DE(I,J))))**5)
C               APcCPU(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FPU(I,J)/
C                   DPU(I,J))))**5)
C               DEN(I,J)=((REN(J)*VISK*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)/
C                   (RRTU(J)*(DR(J-1)+DR(J))/2))
C               DES(I,J)=((RES(J)*VISK*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)/
C                   (RRTU(J)*(DR(J)+DR(J+1))/2))
C               FEN(I,J)=(1/RRTU(J))*(REN(J)*DENS*
C                   ((V(I,J-1)+V(I+1,J-1))/2)*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)
C               FES(I,J)=(1/RRTU(J))*(RES(J)*DENS*
C                   ((V(I,J)+V(I+1,J))/2)*(DZ(I)+DZ(I+1))/2)
C               APcEN(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FEN(I,J)/
C                   DEN(I,J))))**5)
C               APcES(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FES(I,J)/
C                   DES(I,J))))**5)
C               Aen(I,J)=DEN(I,J)*APcEN(I,J)+DMAX1(FEN(I,J),0.)
C               Aes(I,J)=DES(I,J)*APcES(I,J)+DMAX1(-FES(I,J),0.)
C               Ae(I,J)=Aee(I,J)+Aw(I,J)+Aen(I,J)+Aes(I,J)
C               Aee(I,J)=DE(I,J)*APcE(I,J)+DMAX1(-FE(I,J),0.)
C               Aw(I,J)=DPU(I,J)*APcCPU(I,J)+DMAX1(FPU(I,J),0.)
C               Ae(I,J)=Aee(I,J)+Aw(I,J)+Aen(I,J)+Aes(I,J)

C           SOURCE TERM
C               SCU(I,J)=DR(J)*(P(I,J)-P(I+1,J))*(DZ(I)+DZ(I+1))/2
C               SCU(I,J)=0.0
C
C           ENDIF
C           ENDDO
C           ENDIF

100      CONTINUE

        END

C **** SUBROUTINE 4-UZLINES
C -----
C     DISCRETIZATION EQUATION :
C     A(I)U(I) = B(I)U(I+1) + C(I)U(I-1) + D(I)
C ****

C SUBROUTINE UZLINES(Aen,Aes,Aee,Ae,Aw,SCU,U,ALFAM)
REAL*8 PR,PZ,ALFAM
INTEGER NR,NZ,IMAX,JMAX,I,J
PARAMETER (PR=0.5D-3,PZ=25D-2)
PARAMETER (NR=20,NZ=20)
PARAMETER (IMAX=NZ+2,JMAX=NR+2)

C U MOMENTUM
REAL*8 Aee(IMAX,JMAX),Aw(IMAX,JMAX),Ae(IMAX,JMAX),Aen(IMAX,JMAX)
REAL*8 SCU(IMAX,JMAX),U(IMAX,JMAX),Aen(IMAX,JMAX)
REAL*8 C(JMAX),A(JMAX),B(JMAX),D(JMAX),US(JMAX)

C UZLINES ALJABAR EQUATION COEFFICIENT
DO J=2,JMAX-1
    DO I=2,IMAX-1
        IF(I.EQ.IMAX-1)THEN
            C(I)=1.
            A(I)=1.
            B(I)=0.
            D(I)=0.
        ELSE
            C(I)=Aw(I,J)
            A(I)=Ae(I,J)

```

```

      B(I)=Aee(I,J)
      D(I)=SCU(I,J)+Aen(I,J)*U(I,J-1)+Aes(I,J)*U(I,J+1)
      ENDIF
    ENDDO
    DO I=2,IMAX-1
      US(I)=U(I,J)
C      RELAXATION FACTOR
      A(I)=A(I)/ALFAM
      D(I)=D(I)+(1-ALFAM)*US(I)*A(I)
    ENDDO
C SOLUTION OF UZLINES ALJABAR EQUATION
    CALL TDMA(2,IMAX-1,C,A,B,D,US)
    DO I=2,IMAX-1
      U(I,J)=US(I)
    ENDDO
    ENDDO
    END

C ****
C          SUBROUTINE-5 KOEVR
C ****

      SUBROUTINE KOEVR(VISK,DR,DZ,DENS,SCV,P,U,V,RR,KD,POR,
$Ase,Asw,Ass,An,As)

      IMPLICIT NONE
      REAL*8 PZ,PR
      INTEGER NZ,NR,IMX,JMX,I,J
      PARAMETER (PR=0.5D-3,PZ=25D-2)
      PARAMETER (NR=20,NZ=20)
      PARAMETER (IMX=NZ+2,JMX=NR+2)
      REAL*8 Ass(IMX,JMX),Asw(IMX,JMX),Ase(IMX,JMX)
      REAL*8 An(IMX,JMX),As(IMX,JMX)
      REAL*8 DS(IMX,JMX),DPV(IMX,JMX),DSE(IMX,JMX)
      REAL*8 DSW(IMX,JMX),FS(IMX,JMX),FPV(IMX,JMX)
      REAL*8 FSE(IMX,JMX),FSW(IMX,JMX),RS(JMX),RPV(JMX),RRTV(JMX)
      REAL*8 APCS(IMX,JMX),APcPV(IMX,JMX),APcSE(IMX,JMX)
      REAL*8 APcSW(IMX,JMX),SCV(IMX,JMX),P(IMX,JMX),RR(JMX)
      REAL*8 DZ(IMX),DR(JMX),V(IMX,JMX),U(IMX,JMX)
      REAL*8 DENS,VISK,KD,POR

      DO J=1,JMX
        RS(J)=(RR(J)+RR(J+1))/2
        RPV(J)=(RR(J)+RR(J-1))/2
        RRTV(J)=0.5*(RS(J)+RPV(J))
      ENDDO
C      note: this program has been changed with replace j=2,jmax wherein now j=2 is
C      on top
      DO 30 J=2,JMX-2
        IF((J.GE.17.AND.J.LE.jmx-2).OR.(J.GE.2.AND.J.LE.6))THEN
          DO I=2,IMX
            IF(I.EQ.IMX)THEN
              DSW(I,J)=(1/POR)*(VISK*(DR(J)+DR(J+1))/2)/
$                ((DZ(I)+DZ(I-1))/2)
              FSW(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I-1,J)+U(I-1,J+1))/2)*
$                (DR(J)+DR(J+1))/2
              APcSW(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FSW(I,J)/DSW(I,J)))*
$                **5)
              Ase(I,J)=0.0
              Asw(I,J)=DSW(I,J)*APcSW(I,J)+DMAX1(FSW(I,J),0.)
              Asw(I,J)=1/(0.5*dz(i-1))
              Ass(I,J)=0.0
              An(I,J)=0.0
              As(I,J)=Ass(I,J)+Ase(I,J)+Asw(I,J)+An(I,J)-(VISK/KD)
              SCV(I,J)=0.0
            ELSE
              if(j.eq.jmx-2)then
                DPV(I,J)=(1/POR)*(1/RRTV(J))*(RPV(J)*
$                  VISK*DZ(I)/DR(J))
                DSE(I,J)=(1/POR)*(VISK*(DR(J)+DR(J+1))/2)/
$                  ((DZ(I+1)+DZ(I))/2)
              ENDIF
            ENDIF
          ENDDO
        ENDIF
      ENDDO
      END

```

```

DSW(I,J)=(1/POR)*(VISK*(DR(J)+DR(J+1))/2)/
((DZ(I)+DZ(I-1))/2)
FSE(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I,J)+U(I,J+1))/2)*
(DR(J)+DR(J+1))/2
FPV(I,J)=(1/POR)*(1/RRTV(J))*RPV(J)*DENS*
((V(I,J)+V(I,J-1))/2)*DZ(I)
FSW(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I-1,J)+U(I-1,J+1))/2)*
(DR(J)+DR(J+1))/2
APcSE(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FSE(I,J)/
DSE(I,J)))*5)
APcSW(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FSW(I,J)/
DSW(I,J)))*5)
APcPV(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FPV(I,J)/
DPV(I,J)))*5)
An(i,j)=DPV(I,J)*APcPV(I,J)+DMAX1(FPV(I,J),0.)
Ase(I,J)=DSE(I,J)*APcSE(I,J)+
DMAX1(-FSE(I,J),0.)
Ase(I,J)=0.0
Asw(I,J)=DSW(I,J)*APcSW(I,J)+DMAX1(FSW(I,J),0.)
Asw(I,J)=0.0
Ass(I,J)=0.0
As(I,J)=Ass(I,J)+Ase(I,J)+Asw(I,J)+An(I,J)
-(VISK/KD)
SCV(I,J)=0.0
ELSEIF(j.eq.2)then
DS(I,J)=(1/POR)*(1/RRTV(J))*RS(J)*
VISK*DZ(I)/DR(J+1)
DSW(I,J)=(1/POR)*(VISK*(DR(J)+DR(J+1))/2)/
((DZ(I)+DZ(I-1))/2)
FS(I,J)=(1/POR)*(1/RRTV(J))*RS(J)*DENS*
((V(I,J)+V(I,J+1))/2)*DZ(I)
FSW(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I-1,J)+U(I-1,J+1))/2)*
(DR(J)+DR(J+1))/2
APcS(I,J)=DMAX1(0,(1-0.1*DABS(FS(I,J)/
DS(I,J)))*5)
APcSW(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FSW(I,J)/
DSW(I,J)))*5)
DSE(I,J)=(1/POR)*(VISK*(DR(J)+DR(J+1))/2)/
((DZ(I+1)+DZ(I))/2)
FSE(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I,J)+U(I,J+1))/2)*
(DR(J)+DR(J+1))/2
APcSE(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FSE(I,J)/
DSE(I,J)))*5)
Ase(I,J)=DSE(I,J)*APcSE(I,J)+DMAX1(-FSE(I,J),0.)
Ase(I,J)=0.0
Asw(I,J)=DSW(I,J)*APcSW(I,J)+DMAX1(FSW(I,J),0.)
Asw(I,J)=0.0
An(I,J)=0.0
Ass(i,j)=DS(I,J)*APcS(I,J)+DMAX1
(-FS(I,J),0.)
As(I,J)=Ass(I,J)+Ase(I,J)+Asw(I,J)+An(I,J)
-(VISK/KD)
SCV(I,J)=0.0
ELSE
DS(I,J)=(1/POR)*(1/RRTV(J))*RS(J)*
VISK*DZ(I)/DR(J+1)
DPV(I,J)=(1/POR)*(1/RRTV(J))*RPV(J)*
VISK*DZ(I)/DR(J)
DSE(I,J)=(1/POR)*(VISK*(DR(J)+DR(J+1))/2)/
((DZ(I+1)+DZ(I))/2)
DSW(I,J)=(1/POR)*(VISK*(DR(J)+DR(J+1))/2)/
((DZ(I)+DZ(I-1))/2)
FS(I,J)=(1/POR)*(1/RRTV(J))*RS(J)*DENS*
((V(I,J)+V(I,J+1))/2)*DZ(I)
FPV(I,J)=(1/RRTV(J))*RPV(J)*DENS*
((V(I,J)+V(I,J-1))/2)*DZ(I)
FSE(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I,J)+U(I,J+1))/2)*
(DR(J)+DR(J+1))/2
FSW(I,J)=(1/POR)*DENS*((U(I-1,J)+U(I-1,J+1))/2)*
(DR(J)+DR(J+1))/2
APcS(I,J)=DMAX1(0,(1-0.1*DABS(FS(I,J)/

```

```

$          DS(I,J)))**5)
$          APcPV(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FPV(I,J)/
$          DPV(I,J)))**5)
$          APcSE(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FSE(I,J)/
$          DSE(I,J)))**5)
$          APcSW(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FSW(I,J)/
$          DSW(I,J)))**5)
$          Ase(I,J)=DSE(I,J)*APcSE(I,J)+DMAX1(-FSE(I,J),0.)
$          Asw(I,J)=DSW(I,J)*APcSW(I,J)+DMAX1(FSW(I,J),0.)
$          Ass(I,J)=DS(I,J)*APcS(I,J)+DMAX1(-FS(I,J),0.)
$          An(I,J)=DPV(I,J)*APcPV(I,J)+DMAX1(FPV(I,J),0.)
$          As(I,J)=Ass(I,J)+Ase(I,J)+Asw(I,J)+An(I,J)
$          -(VISK/KD)
C          SCV(I,J)=DZ(I)*(P(I,J)-P(I,J+1))*(
C          (DR(J)+DR(J+1))/2
$          SCV(I,J)=0.0
        ENDIF
      ENDIF
    ENDDO
  ELSE
    DO I=2,IMX
      IF(I.EQ.IMX)THEN
        DSW(I,J)=(VISK*(DR(J)+DR(J+1))/2)/((DZ(I)+DZ(I-1))/2)
        FSW(I,J)=DENS*((U(I-1,J)+U(I-1,J+1))/2)*
$          (DR(J)+DR(J+1))/2
        APcSW(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FSW(I,J)/DSW(I,J)))
$          **5)
        Ase(I,J)=0.
        Asw(I,J)=1/(0.5*dz(i-1))
        Ass(I,J)=DSW(I,J)*APcSW(I,J)+DMAX1(FSW(I,J),0.)
        An(I,J)=0.
        As(I,J)=Ass(I,J)+Ase(I,J)+Asw(I,J)+An(I,J)
        SCV(I,J)=0.0
      ELSE
        DS(I,J)=(1/RRTV(J))*(RS(J)*VISK*DZ(I)/DR(J+1))
        DPV(I,J)=(1/RRTV(J))*(RPV(J)*VISK*DZ(I)/DR(J))
        DSE(I,J)=(VISK*(DR(J)+DR(J+1))/2)/((DZ(I+1)+DZ(I))/2)
        DSW(I,J)=(VISK*(DR(J)+DR(J+1))/2)/((DZ(I)+DZ(I-1))/2)
        FS(I,J)=(1/RRTV(J))*(RS(J)*DENS*
$          ((V(I,J)+V(I,J+1))/2)*DZ(I))
        FPV(I,J)=(1/RRTV(J))*(RPV(J)*DENS*
$          ((V(I,J)+V(I,J-1))/2)*DZ(I))
        FSE(I,J)=DENS*((U(I,J)+U(I,J+1))/2)*(DR(J)+DR(J+1))/2
        FSW(I,J)=DENS*((U(I-1,J)+U(I-1,J+1))/2)*
$          (DR(J)+DR(J+1))/2
        APcS(I,J)=DMAX1(0,(1-0.1*DABS(FS(I,J)/
$          DS(I,J)))**5)
        APcPV(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FPV(I,J)/
$          DPV(I,J)))**5)
        APcSE(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FSE(I,J)/
$          DSE(I,J)))**5)
        APcSW(I,J)=DMAX1(0.,(1-0.1*DABS(FSW(I,J)/
$          DSW(I,J)))**5)
        Ase(I,J)=DSE(I,J)*APcSE(I,J)+DMAX1(-FSE(I,J),0.)
        Asw(I,J)=DSW(I,J)*APcSW(I,J)+DMAX1(FSW(I,J),0.)
        Ass(I,J)=DS(I,J)*APcS(I,J)+DMAX1(-FS(I,J),0.)
        An(I,J)=DPV(I,J)*APcPV(I,J)+DMAX1(FPV(I,J),0.)
        As(I,J)=Ass(I,J)+Ase(I,J)+Asw(I,J)+An(I,J)
        SCV(I,J)=DZ(I)*(P(I,J)-P(I,J+1))*(DR(J)+DR(J+1))/2
        SCV(I,J)=0.0
      ENDIF
    ENDDO
  ENDIF
CONTINUE

```

30 CONTINUE

END

```

C ****
C           SUBROUTINE 7-VRLINES
C -----

```

```

C      DISCRETIZATION EQUATION :
C      A(J)V(J) = B(J)V(J+1) + C(J)V(J-1) + D(J)
C ****
C      SUBROUTINE VRLINES(Ase,Asw,An,As,Ass,SCV,V,ALFAM)
C      REAL*8 PR,PZ,ALFAM
C      INTEGER NR,NZ,IMAX,JMAX,I,J
C      PARAMETER (PR=0.5D-3,PZ=25D-2)
C      PARAMETER (NR=20,NZ=20)
C      PARAMETER (IMAX=NZ+2,JMAX=NR+2)
C
C      V MOMENTUM
C      REAL*8 Ass(IMAX,JMAX),As(IMAX,JMAX),An(IMAX,JMAX),SCV(IMAX,JMAX)
C      REAL*8 V(IMAX,JMAX),Ase(IMAX,JMAX),Asw(IMAX,JMAX)
C      REAL*8 C(JMAX),A(JMAX),B(JMAX),D(JMAX),VS(JMAX)
C
C      VRLINES ALJABAR EQUATION COEFFICIENT
C      DO I=2,IMAX
C          DO J=1,JMAX-1
C              IF(J.EQ.jmax-1)THEN
C                  C(J)=1
C                  A(J)=1.
C                  B(J)=0
C                  D(J)=0
C              ELSEIF(J.EQ.1)THEN
C                  C(J)=0.
C                  A(J)=1.
C                  B(J)=1.
C                  D(J)=0.
C              ELSE
C                  C(J)=An(I,J)
C                  A(J)=As(I,J)
C                  B(J)=Ass(I,J)
C                  D(J)=SCV(I,J)+Ase(I,J)*V(I+1,J)+Asw(I,J)*V(I-1,J)
C              ENDIF
C          ENDDO
C          DO J=2,JMAX-2
C              VS(J)=V(I,J)
C              A(J)=A(J)/ALFAM
C              D(J)=D(J)+(1-ALFAM)*VS(J)*A(J)
C          ENDDO
C      SOLUTION OF VRLINES ALJABAR EQUATION
C      CALL TDMA(1,JMAX-1,C,A,B,D,VS)
C      DO J=1,JMAX-1
C          V(I,J)=VS(J)
C          v(i,1)=vs(2)
C          v(i,jmax-1)=vs(jmax-2)
C      ENDDO
C      ENDDO
C
C      END
C ****
C      SUBROUTINE-9 KOEPCR
C ****
C      SUBROUTINE KOEPCR(DENS,DZ,DR,U,V,BP,RR,POR,
C      $Ae,As,AEP,AWP,APS,APN,APP)
C
C      IMPLICIT NONE
C      REAL*8 PZ,PR,DENS,POR
C      INTEGER NZ,NR,IMX,JMX,I,J
C      PARAMETER (PR=0.5D-3,PZ=25D-2)
C      PARAMETER (NR=20,NZ=20)
C      PARAMETER (IMX=NZ+2,JMX=NR+2)
C      REAL*8 AWP(IMX,JMX),AEP(IMX,JMX),APS(IMX,JMX)
C      REAL*8 APN(IMX,JMX),APP(IMX,JMX),Ae(IMX,JMX)
C      REAL*8 BP(IMX,JMX),As(IMX,JMX),RR(JMX),RNP(JMX),RSP(JMX),RRTP(JMX)
C      REAL*8 DZ(IMX),DR(JMX),U(IMX,JMX),V(IMX,JMX)
C
C      DO J=1,JMX

```

```

RNP(J)=(RR(J)+RR(J-1))/2
RSP(J)=(RR(J)+RR(J+1))/2
RRTP(J)=0.5*(RNP(J)+RSP(J))
ENDDO

DO 50 J=2,JMX-1
    IF(J.GE.2.AND.J.LE.6)THEN
        DO I=2,IMX
            IF(I.EQ.IMX)THEN
                AWP(I,J)=(1/POR)*(DENS*DR(J)*DR(J)/Ae(I-1,J))
                AEP(I,J)=0.0
            ELSEIF(I.EQ.2)THEN
                AWP(I,J)=0.
                AEP(I,J)=(1/POR)*(DENS*DR(J)*DR(J)/Ae(I,J))
            ELSE
                AWP(I,J)=(1/POR)*(DENS*DR(J)*DR(J)/Ae(I-1,J))
                AEP(I,J)=(1/POR)*(DENS*DR(J)*DR(J)/Ae(I,J))
            ENDIF
        C      WRITE(*,*)AWP(I,J),AEP(I,J)
        C      PAUSE
    ENDDO
    ELSEIF(J.GE.17.AND.J.LE.JMX-1)THEN
        DO I=2,IMX
            IF(I.EQ.IMX)THEN
                AWP(I,J)=(1/POR)*(DENS*DR(J)*DR(J)/Ae(I-1,J))
                AEP(I,J)=0.0
            ELSEIF(I.EQ.2)THEN
                AWP(I,J)=0.
                AEP(I,J)=(1/POR)*(DENS*DR(J)*DR(J)/Ae(I,J))
            ELSE
                AWP(I,J)=(1/POR)*(DENS*DR(J)*DR(J)/Ae(I-1,J))
                AEP(I,J)=(1/POR)*(DENS*DR(J)*DR(J)/Ae(I,J))
            ENDIF
        C      WRITE(*,*)Ae(I,J)
        C      PAUSE
    ENDDO
    ELSE
        DO I=2,IMX
            IF(I.EQ.IMX)THEN
                AWP(I,J)=(DENS*DR(J)*DR(J))/Ae(I-1,J)
                AEP(I,J)=0.
            ELSEIF(I.EQ.2)THEN
                AWP(I,J)=0.
                AEP(I,J)=(DENS*DR(J)*DR(J))/Ae(I,J)
            ELSE
                AWP(I,J)=(DENS*DR(J)*DR(J))/Ae(I-1,J)
                AEP(I,J)=(DENS*DR(J)*DR(J))/Ae(I,J)
            ENDIF
        C      WRITE(*,*) AWP(I,J),AEP(I,J)
        ENDDO
    ENDIF
CONTINUE
50    DO 55 I=2,IMX-1
        DO J=2,JMX-1
            IF(J.EQ.JMX-1)THEN
                APS(I,J)=0.
                APN(I,J)=(1/POR)*(1/RRTP(J))*((RNP(J)*
$                  DENS*DZ(I)*DZ(I))/As(I,J-1))
            ELSEIF(J.EQ.2)THEN
                APS(I,J)=(1/POR)*(1/RRTP(J))*((RSP(J)*
$                  DENS*DZ(I)*DZ(I))/As(I,J))
                APN(I,J)=0.
            ELSEIF(J.GE.3.AND.J.LE.6)THEN
                APS(I,J)=(1/POR)*(1/RRTP(J))*((RSP(J)*DENS*DZ(I)*
$                  DZ(I))/As(I,J))
                APN(I,J)=(1/POR)*(1/RRTP(J))*((RNP(J)*DENS*DZ(I)*
$                  DZ(I))/As(I,J-1))
            ELSEIF(J.GE.17.AND.J.LE.JMX-2)THEN
                APS(I,J)=(1/POR)*(1/RRTP(J))*((RSP(J)*DENS*DZ(I)*
$                  DZ(I))/As(I,J))
                APN(I,J)=(1/POR)*(1/RRTP(J))*((RNP(J)*DENS*DZ(I)*
$                  DZ(I))/As(I,J))
            ENDIF
        ENDDO
    ENDIF

```

```

$           *DZ(I))/AS(I,J-1))
$      ELSE
$          APS(I,J)=(1/RRTP(J))*((RSP(J)*DENS*DZ(I)
$          *DZ(I))/AS(I,J))
$          APN(I,J)=(1/RRTP(J))*((RNP(J)*DENS*DZ(I)
$          *DZ(I))/AS(I,J-1))
$      ENDIF
C      WRITE(*,*)APS(I,J),APN(I,J)
APP(I,J)=AWP(I,J)+AEP(I,J)+APS(I,J)+APN(I,J)
C      WRITE(*,*)APP(I,J)
C      PAUSE
IF(J.GE.2.AND.J.LE.6)THEN
    BP(I,J)=(1/POR)*((DENS*(U(I-1,J)-U(I,J)))*DR(J))
    +((1/RRTP(J))*((DENS*((RNP(J)*V(I,J-1))-(RSP(J)*
    V(I,J))))*DZ(I)))
ELSEIF(J.GE.17.AND.J.LE.JMX-1)THEN
    BP(I,J)=(1/POR)*((DENS*(U(I-1,J)-U(I,J)))*DR(J))
    +((1/RRTP(J))*((DENS*((RNP(J)*V(I,J-1))-(RSP(J)*
    V(I,J))))*DZ(I)))
ELSE
    BP(I,J)=((DENS*(U(I-1,J)-U(I,J)))*DR(J))
    +((1/RRTP(J))*((DENS*((RNP(J)*V(I,J-1))-(RSP(J)*
    V(I,J))))*DZ(I)))
C      WRITE(*,*)APP(I,J)
ENDIF
CC      WRITE(*,*)APP(I,J)
ENDDO
55      CONTINUE

```

END

```

C **** SUBROUTINE 10-PRLINES ****
C      SUBROUTINE PRLINES(AWP,AEP,APN,APP,APS,BP,PP)
C
REAL*8 PR,PZ
INTEGER NR,NZ,IMAX,JMAX,I,J
PARAMETER (PR=0.5D-3,PZ=25D-2)
PARAMETER (NR=20,NZ=20)
PARAMETER (IMAX=NZ+2,JMAX=NR+2)
C
C PRESSURE: P
REAL*8 APN(IMAX,JMAX),APS(IMAX,JMAX),APP(IMAX,JMAX)
REAL*8 PP(IMAX,JMAX),BP(IMAX,JMAX),AWP(IMAX,JMAX),AEP(IMAX,JMAX)
REAL*8 C(IMAX),A(IMAX),B(IMAX),D(IMAX),PS(JMAX)
C
C PZLINES ALJABAR EQUATION COEFFICIENT
DO I=2,IMAX-1
    DO J=2,JMAX-1
        IF(J.EQ.2)THEN
            C(J)=0.
            B(J)=APS(I,J)
        ELSEIF(J.EQ.JMAX-1)THEN
            C(J)=APN(I,J)
            B(J)=0.
        ELSE
            C(J)=APN(I,J)
            B(J)=APS(I,J)
        ENDIF
        A(J)=APP(I,J)
        D(J)=BP(I,J)+AWP(I,J)*PP(I-1,J)+AEP(I,J)*PP(I+1,J)
    ENDDO
C SOLUTION OF PRLINES ALJABAR EQUATION
CALL TDMA(2,JMAX-1,C,A,B,D,PS)
DO J=2,JMAX-1
    PP(I,J)=PS(J)
ENDDO
ENDDO

```

```

END

C ****
C      SUBROUTINE 13-GRID
C ****
C
C      SUBROUTINE GRID(DR,DZ)
C      REAL*8 PR,PZ
C      INTEGER NR,NZ,IMAX,JMAX,I,J
C      PARAMETER (PR=0.5D-3,PZ=25D-2)
C      PARAMETER (NR=20,NZ=20)
C      PARAMETER (IMAX=NZ+2,JMAX=NR+2)
C      REAL*8 DR(JMAX),DZ(IMAX)
C
C      DO I=1,IMAX
C          IF(I.EQ.1 .OR. I.EQ.IMAX) THEN
C              DZ(I)=0
C          ELSEIF(I.EQ.2.AND.I.eq.imax-1) THEN
C              DZ(I)=PZ/50
C          ELSE
C              DZ(I)=PZ/nz
C          ENDIF
C      ENDDO
C      DO J=1,JMAX
C          IF(J.EQ.1 .OR. J.EQ.JMAX) THEN
C              DR(J)=0
C          ELSEIF(J.GE.17.AND.J.LE.JMAX-1) THEN
C              DR(J)=PR/100
C          ELSEIF(J.GE.2.AND.J.LE.6) THEN
C              DR(J)=PR/100
C          ELSE
C              DR(J)=PR/NR
C          ENDIF
C      ENDDO
C
C ****
C      SUBROUTINE 14-TDMA
C ****
C
C      SUBROUTINE TDMA(IN,IM,C,A,B,D,T)
C
C      IMPLICIT REAL*8 (A-H,O-Z)
C      PARAMETER (PR=0.5D-3,PZ=25D-2)
C      PARAMETER (NZ=20)
C      PARAMETER (NR=20)
C      PARAMETER (IMX=NZ+2)
C      PARAMETER (JMX=NR+2)
C      DIMENSION C(IMX),A(IMX),B(IMX),D(IMX),T(IMX)
C      DIMENSION P(IMX),Q(IMX)
C
C      P(IN)=B(IN)/A(IN)
C      Q(IN)=D(IN)/A(IN)
C      DO 10 I=IN+1,IM
C          P(I)=B(I)/(A(I)-C(I)*P(I-1))
C          Q(I)=(C(I)*Q(I-1)+D(I))/(A(I)-C(I)*P(I-1))
C 10 CONTINUE
C
C      T(IM)=Q(IM)
C      DO 20 KK=1,IM-IN
C          I=IM-KK
C          T(I)=P(I)*T(I+1)+Q(I)
C 20 CONTINUE
C      RETURN
C
C ****
C      SUBROUTINE - 15 KGAS
C ****
C
C      SUBROUTINE KGAS(VISK,DIV,DENS,U,SC,RE,SH,KG)

```

```

REAL*8 VISK,DIV,DENS,SC
INTPNCNR I,J,NR,NZ,IMX,JMX
PARAMETER (PR=0.5D-3)
PARAMETER (NR=20,NZ=20)
PARAMETER (IMX=NZ+2,JMX=NR+2)
REAL*8 RE(IMX,JMX),SH(IMX,JMX),KG(IMX,JMX),U(IMX,JMX)

C
SC=VISK/(DIV*DENS)
DO I=1,IMX
    DO J=1,JMX
        RE(I,J)=(PR*U(I,J)*DENS)/VISK
        SH(I,J)=0.022*(RE(I,J)**0.60)*(10**0.13)
        KG(I,J)=(SH(I,J)*DIV)/PR
    C
        WRITE(*,*) SC,RE(I,J),SH(I,J),KG(I,J)
    ENDDO
ENDDO
END

C *****
C      SUBROUTINE -16 KOVERALL
C *****
SUBROUTINE KOVERALL(KG,KM,KOV)

REAL*8 KM
INTEGER I,J,NR,NZ,IMX,JMX
PARAMETER (PR=0.5D-3)
PARAMETER (NR=20,NZ=20)
PARAMETER (IMX=NZ+2,JMX=NR+2)
REAL*8 KOV(IMX,JMX),KG(IMX,JMX)

C
DO I=2,IMX-1
    DO J=2,JMX-1
        KOV(I,J)=1/((1/KG(I,J))+(1/KM))
    C
        WRITE(*,*) I,J,KG(I,J),KM,KOV(I,J)
    C
        PAUSE
    ENDDO
ENDDO
END

C *****
C      SUBROUTINE -17 TORKD
C *****
SUBROUTINE TORKD(POR,NF,DPR,PS,TOR,KD)
REAL*8 TOR,PS,DPR,POR,KD
INTEGER NF

TOR=((2-POR)**2)/(POR**2)
KD=(NF*(DPR**4)*(TOR**0.5))/(8*(PS**2))

END

C *****
C      SUBROUTINE - 18 KMEM
C *****
SUBROUTINE KMEM(DOMD,POR,TOR,PR,DK,KMOMD,KMKD,KM)

REAL*8 DOMD,POR,TOR,DK,KMOMD,KMKD,KM,PR

KMOMD=(DOMD*POR)/(TOR*PR)
KMKD=(DK*POR)/(TOR*PR)
KM=1/((1/KMOMD)+(1/KMKD))

END

C *****
C      SUBROUTINE - 19 CRLINES
C -----
C      DISCRETIZATION EQUATION :
C      A(J)CONS(J) = B(J)CONS(J+1) + C(J)CONS(J-1) + D(J)

```

NPT-PUSTAK-UNDEF

```

C ****
      SUBROUTINE CRLINES(Aec,Awc,Anc,Asc,Apc,SCC,GAMMA,CONS)
      REAL*8 PR,PZ,GAMMA
      INTEGER NR,NZ,IMAX,JMAX,I,J
      PARAMETER (PR=0.5D-3,PZ=25D-2)
      PARAMETER (NR=20,NZ=20)
      PARAMETER (IMAX=NZ+2,JMAX=NR+2)

C
C CONCENTRATION
      REAL*8 Anc(IMAX,JMAX),Asc(IMAX,JMAX),Aec(IMAX,JMAX),Awc(IMAX,JMAX)
      REAL*8 SCC(IMAX,JMAX),CONS(IMAX,JMAX),Apc(IMAX,JMAX)
      REAL*8 C(JMAX),A(JMAX),B(JMAX),D(JMAX),CS(JMAX)

C
C CRLINES ALJABAR EQUATION COEFFICIENT
      DO I=2,IMAX-1
        DO J=1,JMAX
          IF (J.EQ.1.OR.J.EQ.JMAX) THEN
            C(J)=0.
            A(J)=1.
            B(J)=0
            D(J)=SCC(I,J)+Aec(I,J)*CONS(I+1,J)+Awc(I,J)*CONS(I-1,J)
          ELSE
            C(J)=Anc(I,J)
            A(J)=Apc(I,J)
            B(J)=Asc(I,J)
            D(J)=SCC(I,J)+Aec(I,J)*CONS(I+1,J)+Awc(I,J)*CONS(I-1,J)
          ENDIF
        WRITE(*,*)A(J),C(J),B(J),D(J)
      ENDDO
      DO J=1,JMAX
        CS(J)=CONS(I,J)
      RELAXATION FACTOR
      WRITE(*,*)J,CS(J),GAMMA
      A(J)=A(J)/GAMMA
      D(J)=D(J)+(1-GAMMA)*CS(J)*A(J)
    ENDDO
    WRITE(*,*)A(J)
C SOLUTION OF URLINES ALJABAR EQUATION
    CALL TDMA(1,JMAX,C,A,B,D,CS)
    DO J=1,JMAX
      CONS(I,J)=CS(J)
      CONS(IMAX,J)=CS(J)
    ENDDO

    ENDDO
  END

```