

## **BAB III**

### **PEMODELAN DENGAN METODE VOLUME HINGGA**

#### **3.1 Teori Dasar Metode Volume Hingga**

*Computational fluid dynamic* atau CFD merupakan ilmu yang mempelajari tentang analisa aliran fluida, perpindahan panas dan fenomena yang berhubungan dengannya seperti reaksi kimia dengan menyelesaikan persamaan matematika dan menggunakan bantuan simulasi komputer. Persamaan-persamaan aliran fluida dapat dideskripsikan dengan persamaan differensial parsial yang tidak dapat dipecahkan secara analitis kecuali dengan kasus yang spesial. Sehingga kita membutuhkan suatu metode pendekatan untuk menentukan suatu hasil.

Perbedaan tingkat akurasi eksperimen dengan CFD adalah jika data eksperimen, tingkat akurasi akan bergantung pada alat yang digunakan. Sedangkan akurasi dari solusi numerik, dalam hal ini adalah CFD bergantung pada kualitas diskretisasi yang digunakan. CFD disusun berdasarkan algoritma numerik yang mampu untuk mengatasi masalah aliran fluida. Komponen-komponen yang dibutuhkan dalam algoritma numerik adalah model matematika dan metode diskretisasi [33].

Langkah awal dalam menyusun algoritma numerik adalah model matematika. Model matematika digunakan untuk mendeskripsikan aliran fluida dengan menentukan persamaan differensial parsial dan kondisi batas dari suatu prediksi aliran fluida. Persamaan umum dari aliran fluida yang merepresentasikan model matematika didapatkan dari tiga prinsip utama, yaitu [34]:

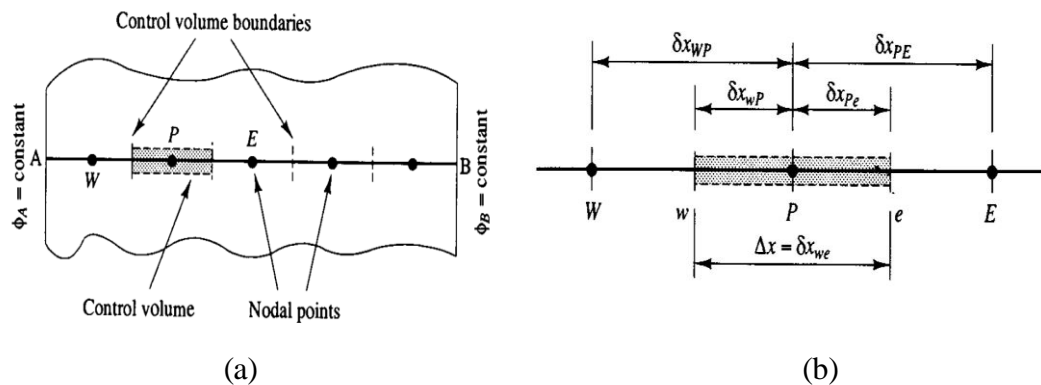
1. Hukum kekekalan massa (persamaan kontinuitas),
2. Hukum II Newton (persamaan momentum),
3. Hukum kekekalan energi (persamaan energi).

Setelah menentukan model matematika, kita harus memilih metode diskretisasi yang cocok dengan kata lain sebuah metode dari pendekatan persamaan differensial dengan

sistem persamaan aljabar. Untuk menentukan sebuah solusi pendekatan numerik, kita harus menggunakan metode diskretisasi persamaan differensial dengan sistem persamaan aljabar yang dapat dipecahkan dengan komputer. Ada beberapa metode pendekatan, yaitu *finite difference method*, *finite element method*, dan *finite volume method*. Salah satu metode yang sering digunakan dalam analisa CFD adalah *finite volume method*.

Metode volume hingga mula-mula dikembangkan dari formulasi *special finite difference*. Metode volume hingga menggunakan bentuk integral dari persamaan umum untuk dilakukan diskretisasi persamaan. Solusi dibagi ke dalam sejumlah *control volume* yang berhingga, dan persamaan umum yang telah didiskretisasi diaplikasikan pada tiap *control volume*. Titik pusat tiap *control volume* merupakan nodal komputasi pada variabel yang dihitung [33].

Untuk kasus satu dimensi dapat digambarkan seperti Gambar 3.1 merepresentasikan pembagian domain ke dalam *control volume* yang berhingga dan notasi yang biasa digunakan. Titik nodal diidentifikasi dengan  $P$ . Dan titik nodal didekatnya di sebelah barat dan timur diidentifikasi dengan  $W$  dan  $E$ . Titik permukaan *control volume* di sisi barat ditunjuk dengan  $w$  dan di sisi timur dengan  $e$ . Jarak antara nodal  $W$  dan  $P$ , dan antara  $P$  dan  $E$  diidentifikasi dengan  $\delta x_{WP}$  dan  $\delta x_{PE}$ . Sedangkan jarak antara titik permukaan *control volume* dengan titik nodal  $P$ , dan antara titik nodal  $P$  dengan titik permukaan *control volume* dinotasikan dengan  $\delta x_{wP}$  dan  $\delta x_{Pe}$ . Panjang *control volume* adalah  $\delta x_{we}$ .



Gambar 3.1. (a) Pembagian *control volume* 1 dimensi, (b) Panjang *control volume* [34]

Sebagai contoh dari diskretisasi persamaan kita ambil kasus difusi aliran *steady*. Persamaan umum didapat dari *general transport equation* dari sifat  $\phi$  memberikan:

$$\text{div } \Gamma \text{grad} \phi + S_{\phi} = 0 \quad (3.1)$$

Integral dari *control volume* merupakan kunci dari metode volume hingga yang membedakannya dari teknik CFD yang lain. Persamaan umum diintegrasikan terhadap *control volume* untuk menghasilkan persamaan diskretisasi titik nodal  $P$ .

$$\int_{CV} \text{div } \Gamma \text{grad} \phi \, dv + \int_{CV} S_{\phi} \, dV = 0 \quad (3.2)$$

$$\int_{\Delta V} \frac{d}{dx} \left( \Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) dV + \int_{\Delta V} S_{\phi} \, dV = \left( \Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_e - \left( \Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_w + \bar{S} \Delta V = 0 \quad (3.3)$$

Disini  $A$  adalah luas bidang normal dari permukaan *control volume*. Sedangkan  $\bar{S}$  adalah rata-rata sumber  $S$  dari *control volume*. Persamaan (3.3) mendeskripsikan bahwa flux difusi dari  $\phi$  yang meninggalkan permukaan *control volume* timur dikurangi flux difusi dari  $\phi$  yang memasuki permukaan *control volume* barat adalah sama dengan pembangkitan dari  $\phi$ , dengan kata lain, ini merupakan persamaan kesetimbangan dari  $\phi$  seluruh *control volume*.

Untuk menghitung gradien  $\phi$  pada permukaan *control volume*, digunakan pendekatan distribusi antara titik nodal yang digunakan. Pendekatan linear merupakan cara yang paling sederhana untuk menghitung nilai pada permukaan *control volume*.

$$\left( \Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_e = \Gamma_e A_e \left( \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_{PE}} \right) \quad (3.4)$$

$$\left( \Gamma A \frac{d\phi}{dx} \right)_w = \Gamma_w A_w \left( \frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_{WP}} \right) \quad (3.5)$$

Dalam situasi praktisnya, sumber  $S$  diberikan fungsi dari variabel yang dicari. Dalam kasus ini, metode volume hingga memperkirakan sumber dengan bentuk linier:

$$\bar{S}\Delta V = S_u + S_P\phi_P \quad (3.6)$$

Sehingga dengan substitusi persamaan (3.4), (3.5), dan (3.6) ke dalam persamaan (3.3) memberikan:

$$\Gamma_e A_e \left( \frac{\phi_E - \phi_P}{\delta x_{PE}} \right) - \Gamma_w A_w \left( \frac{\phi_P - \phi_W}{\delta x_{WP}} \right) + S_u + S_P\phi_P = 0 \quad (3.7)$$

Dan persamaan (3.7) dapat disusun kembali menjadi:

$$\left( \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} A_e + \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} A_w - S_P \right) \phi_P = \left( \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} A_w \right) \phi_W + \left( \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} A_e \right) \phi_E + S_u \quad (3.8)$$

Persamaan (3.8) dapat disusun kembali dengan koefisien-koefisien dari  $\phi_W$  dan  $\phi_E$  adalah  $a_W$  dan  $a_E$ , sehingga persamaan (3.8) di atas menjadi:

$$a_P\phi_P = a_W\phi_W + a_E\phi_E + S_u \quad (3.9)$$

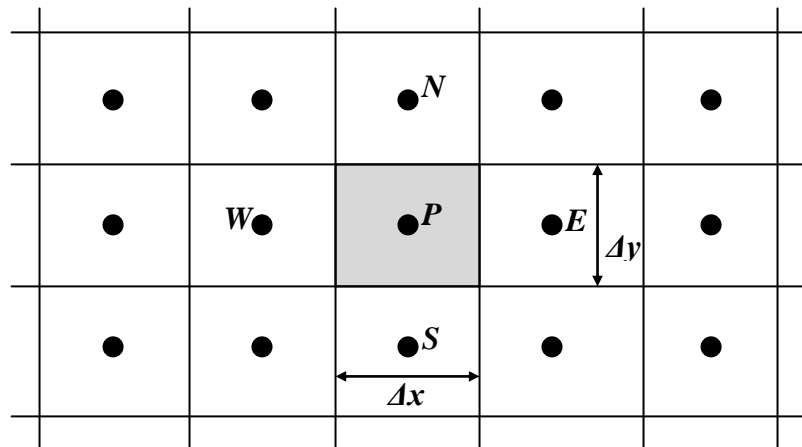
dimana,

$$a_E = \frac{\Gamma_e}{\delta x_{PE}} A_e$$

$$a_W = \frac{\Gamma_w}{\delta x_{WP}} A_w$$

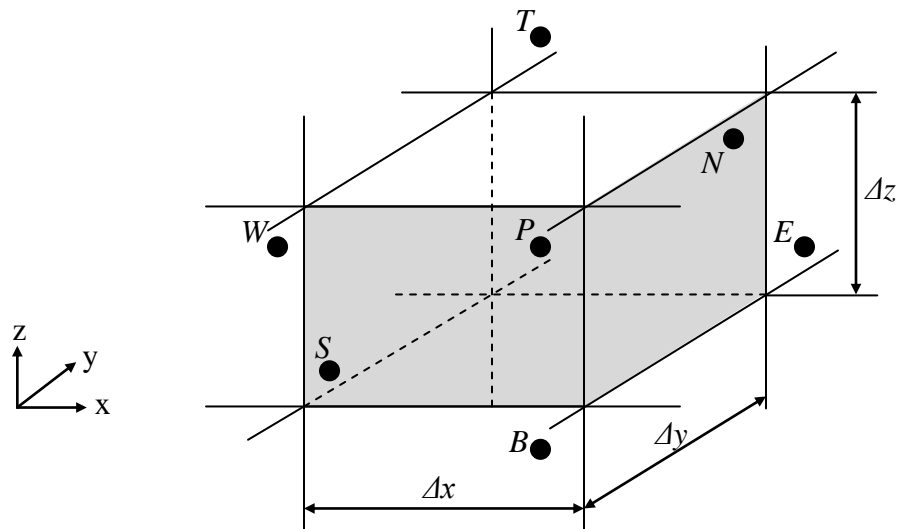
$$a_p = a_w + a_e - S_p \quad (3.10)$$

Persamaan (3.9) tersebut merupakan persamaan diskretisasi yang dapat dipakai pada tiap *control volume* [35]. Penggunaan metode dalam mendapatkan persamaan diskretisasi pada kasus 1 dimensi dapat dengan mudah diperluas ke dalam kasus 2 dimensi. *Control volume* yang digunakan untuk pembagian grid seperti ditunjukkan pada Gambar 3.2. Dalam tambahannya nodal yang bersebelahan dengan titik nodal  $P$  tidak hanya  $E$  dan  $W$ , akan tetapi juga mempunyai utara ( $N$ ) dan selatan ( $S$ ) [34].



Gambar 3.2. Grid 2 Dimensi [35]

Sedangkan untuk kasus 3 dimensi sebuah *cell* dan nodal yang bersebelahan digambarkan pada Gambar 3.3. Sebuah *cell* berisi titik nodal  $P$  yang akan diidentifikasi dan memiliki 6 nodal yang bersebelahan yang diidentifikasi sebagai *west*, *east*, *south*, *north*, *bottom* dan *top* ( $W$ ,  $E$ ,  $S$ ,  $N$ ,  $B$ ,  $T$ ). Seperti sebelumnya notasi  $w$ ,  $e$ ,  $s$ ,  $n$ ,  $b$ , dan  $t$  digunakan untuk mengacu pada permukaan *control volume* sebelah barat, timur, selatan, utara, bawah dan atas [33].



Gambar 3.3. Grid 3 Dimensi [35]

### 3.2 Spesifikasi Masalah

*Finite slider bearing* dimodelkan dalam *inclined pad bearing* yang sederhana seperti pada Gambar 3.4, dimana dua permukaan berbentuk konvergen dengan sudut tertentu. Pada *slider bearing* ini ketebalan film atau ketinggian fluida memisahkan dua permukaan. Ketinggian fluida ini merupakan fungsi linier dari  $x$  (persamaan 3.1), permukaan atas dilabelkan sebagai permukaan 1 yang merupakan permukaan yang diam. Sedangkan permukaan bawah dilabelkan dengan permukaan 2, yaitu permukaan yang bergerak dengan kecepatan  $U_1$ .

$$h(x) = h_1 - \frac{(h_i - h_o)}{L} x \quad (3.11)$$

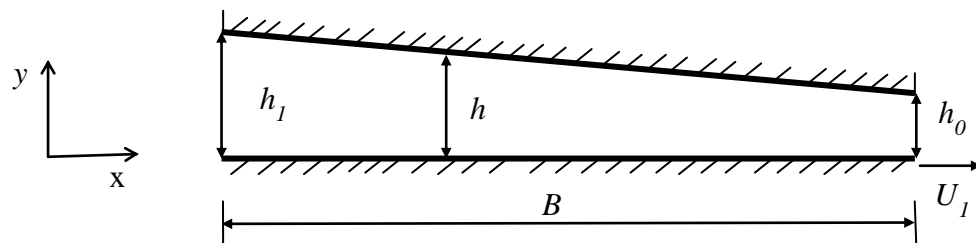
Dalam studi ini telah dibuat beberapa konfigurasi *bearing* seperti yang tersaji dalam Tabel 3.1.

Tabel 3.1 Konfigurasi *bearing* yang digunakan

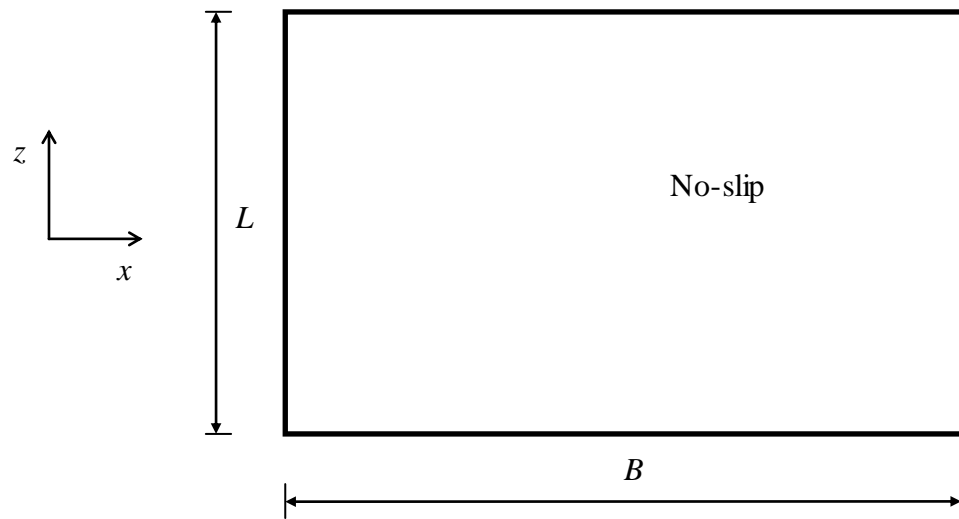
| No | Konfigurasi <i>bearing</i>  |
|----|---|
| 1  | Konvensional (no-slip) <i>bearing</i>   |
| 2  | <i>Bearing</i> dengan heteroslip pola persegi   |
| 3  | <i>Bearing</i> dengan heteroslip pola trapesium                                       |
| 4  | <i>Bearing</i> dengan permukaan bertekstur pola persegi                               |
| 5  | <i>Bearing</i> dengan permukaan bertekstur pola trapesium                             |
| 6  | <i>Bearing</i> dengan kombinasi heteroslip dengan permukaan bertekstur pola persegi   |
| 7  | <i>Bearing</i> dengan kombinasi heteroslip dengan permukaan bertekstur pola trapesium |

### 3.2.1 Konfigurasi I - Permukaan Kondisi No-Slip

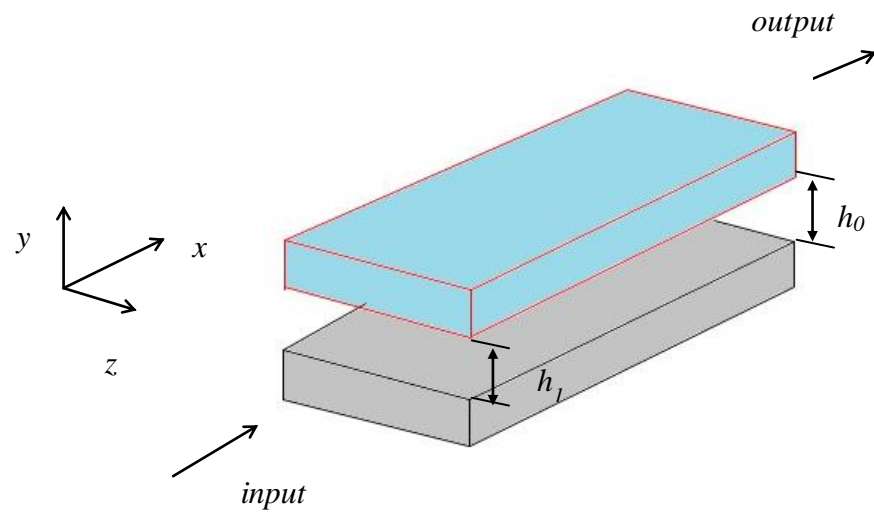
Konfigurasi I merupakan validasi *finite slider bearing* dengan kondisi no-slip (konvensional). Geometri yang digunakan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.4, Gambar 3.5 dan Gambar 3.6.



Gambar 3.4 Geometri *slider bearing* kondisi no-slip tampak samping



Gambar 3.5 Geometri *slider bearing* kondisi no-slip tampak atas



Gambar 3.6 Geometri *slider bearing* kondisi no-slip tampak isometri



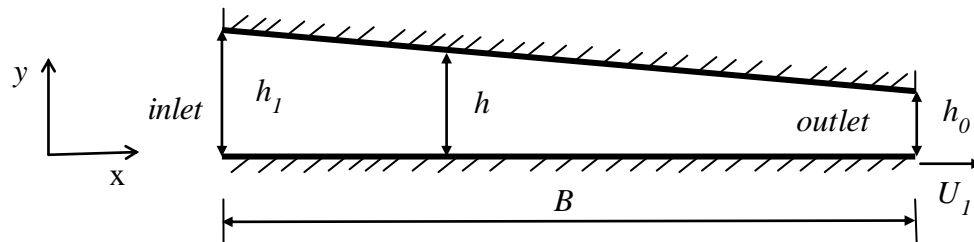
- Geometri

Konfigurasi *slider bearing* ini mengaplikasikan dua permukaan yang memiliki kondisi batas no-slip disepanjang permukaan. Geometri yang digunakan pada kasus ini adalah:

- Panjang *bearing*  $B = 1 \text{ mm}$
- Lebar *bearing*  $L = 1 \text{ mm}$
- Tinggi maksimum  $h_1 = 2.3 \mu\text{m}$
- Tinggi minimum  $h_0 = 1 \mu\text{m}$

- *Boundary Conditions*

Asumsi nilai tekanan pada sisi masuk dan keluar *slider bearing* diatur nol dan gradien kecepatan bernilai nol pada arah normal terhadap *sliding*. Pada permukaan yang bergerak, kondisi batas no-slip diasumsikan untuk persamaan aliran, yaitu kecepatan dinilai konstan, sementara tekanan memiliki kondisi batas gradien nol.



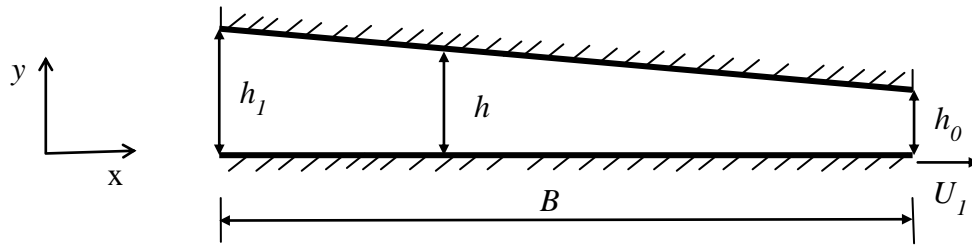
Gambar 3.7 Kondisi batas pada domain komputasi *slider bearing* dengan kondisi no-slip

Kondisi batas yang digunakan pada kasus ini adalah:

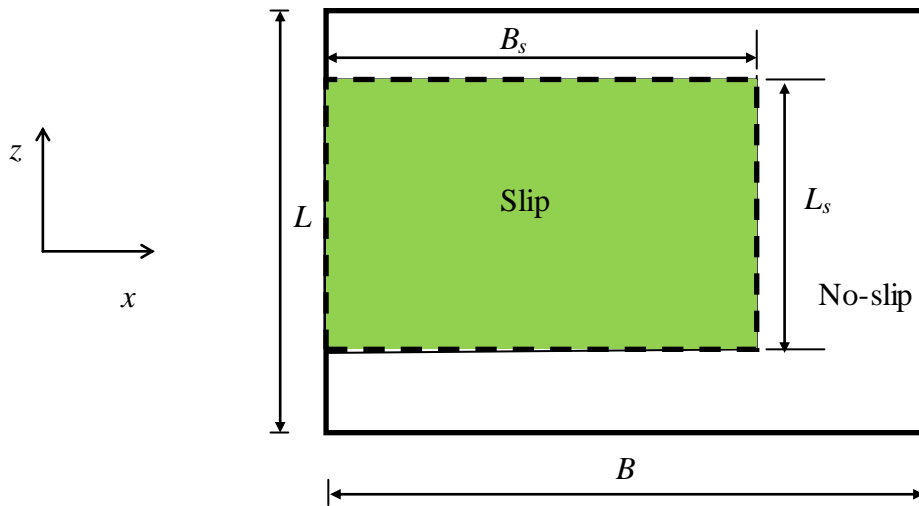
- Kecepatan dinding bawah  $U_1 = 10 \text{ m/s}$
- Bilangan *Reynolds*  $Re = 10$  (aliran laminar)
- Massa jenis pelumas  $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$
- Viskositas dinamis pelumas  $\eta = 10^{-3} \text{ Pas}$

### 3.2.2 Konfigurasi II - Permukaan dengan Kondisi Heteroslip Menggunakan Pola Persegi

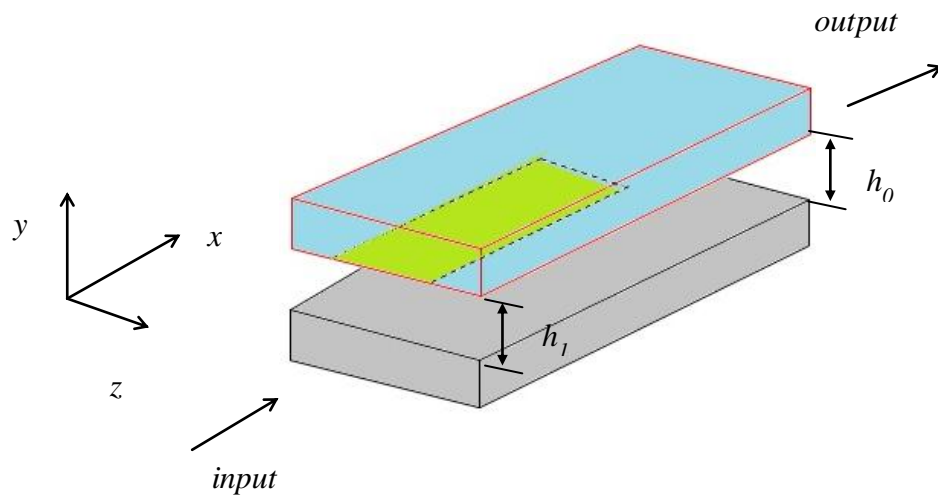
Sama halnya seperti konfigurasi I, konfigurasi II merupakan validasi *finite slider bearing* tetapi dengan heteroslip yang menggunakan pola persegi. Geometri yang digunakan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.8, Gambar 3.9 dan Gambar 3.10.



Gambar 3.8 Geometri *slider bearing* kondisi heteroslip pola persegi tampak samping



Gambar 3.9 Geometri *slider bearing* kondisi heteroslip pola persegi tampak atas



Gambar 3.10 Geometri *slider bearing* kondisi heteroslip pola persegi tampak isometri

Pola slip/no-slip, ditunjukkan dalam Gambar 3.9 dan Gambar 3.10, diterapkan area permukaan persegi dipilih untuk aplikasi slip. Daerah ini, dianggap sebagai daerah slip dan ditempatkan sejajar dengan ujung *inlet* fluida. Dan pada tiga sisi yang tersisa yaitu daerah no-slip. Efek yang diinginkan adalah fluida mengalir pertama melalui daerah slip dan kemudian keluar melalui daerah no-slip.

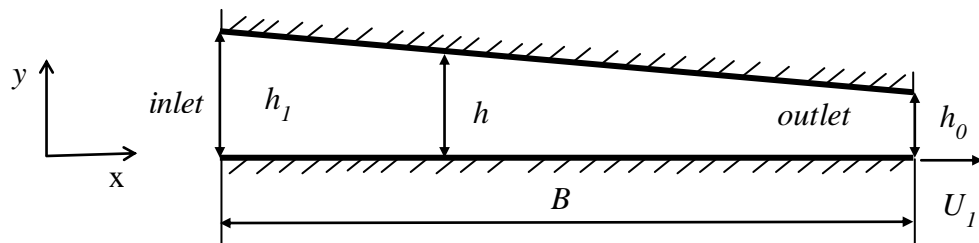
- Geometri

Konfigurasi *finite slider bearing* ini mengaplikasikan dua permukaan yang memiliki kondisi batas heteroslip pola persegi disepanjang permukaan. Geometri yang digunakan pada kasus ini adalah:

- Panjang *bearing*  $B = 1 \text{ mm}$
- Lebar *bearing*  $L = 1 \text{ mm}$
- Tinggi maksimum  $h_1 = 1 \text{ }\mu\text{m}$
- Tinggi minimum  $h_0 = 1 \text{ }\mu\text{m}$
- Panjang permukaan slip  $B_s = 0.65 \text{ mm}$
- Lebar permukaan slip  $L_s = 0.8 \text{ mm}$

- *Boundary Conditions*

Asumsi nilai tekanan pada sisi masuk dan keluar *sliderbearing* diatur nol dan gradien kecepatan bernilai nol pada arah normal terhadap *sliding*. Pada permukaan yang bergerak, kondisi batas heteroslip diasumsikan untuk persamaan aliran, yaitu kecepatan dinilai konstan, sementara tekanan memiliki kondisi batas gradien nol.



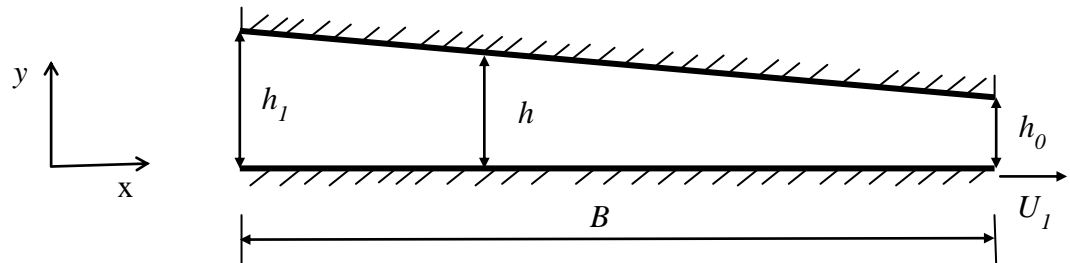
Gambar 3.11 Kondisi batas pada domain komputasi *slider bearing* dengan kondisi heteroslip pola persegi

Kondisi batas yang digunakan pada kasus ini adalah:

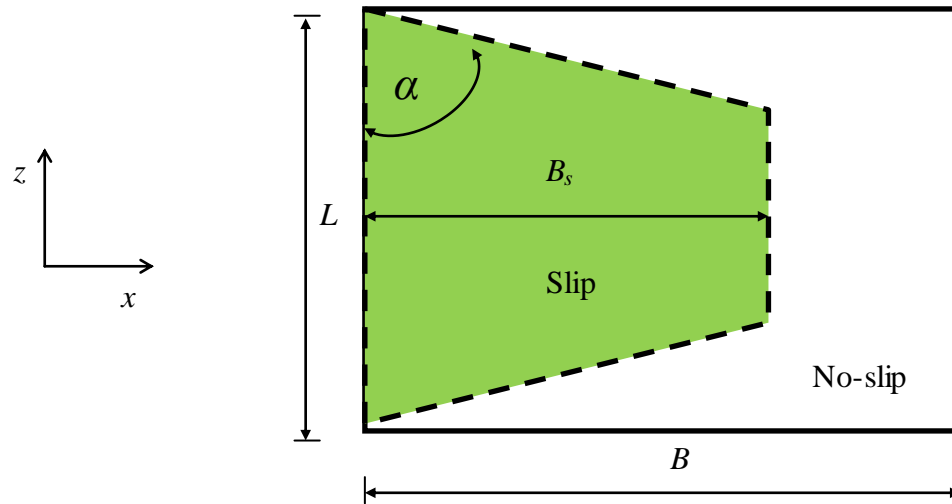
- Kecepatan dinding bawah  $U_1 = 10 \text{ m/s}$
- Bilangan *Reynolds*  $Re = 10$  (aliran laminar)
- Massa jenis pelumas  $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$
- Viskositas dinamis pelumas  $\eta = 10^{-3} \text{ Pas}$

### 3.2.3 Konfigurasi III - Permukaan dengan Kondisi Heteroslip Menggunakan Pola Trapesium

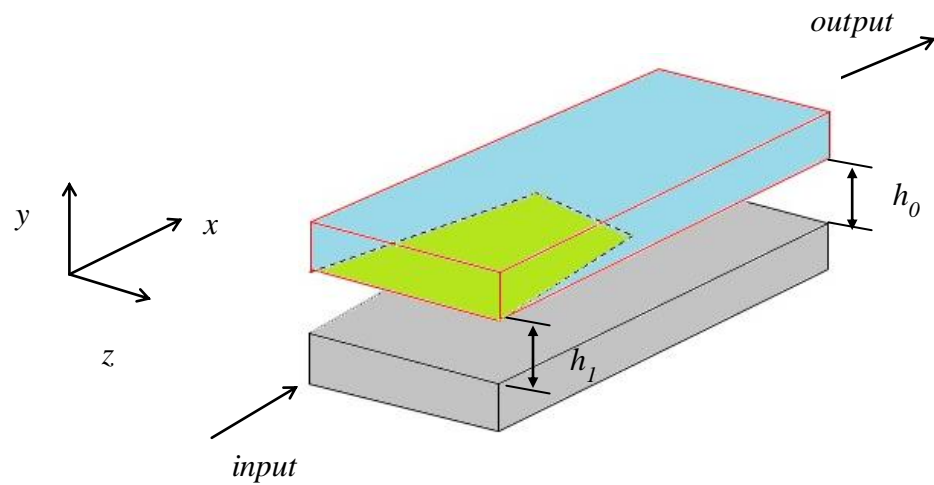
Sama halnya seperti konfigurasi II merupakan validasi *finite slider bearing* tetapi dengan heteroslip yang menggunakan pola trapesium. Geometri yang digunakan seperti yang ditunjukkan oleh Gambar 3.12, Gambar 3.13 dan Gambar 3.14.



Gambar 3.12 Geometri *slider bearing* kondisi heteroslip pola trapesium tampak samping



Gambar 3.13 Geometri *slider bearing* kondisi heteroslip pola trapesium tampak atas



Gambar 3.14 Geometri *slider bearing* kondisi heteroslip pola trapesium tampak isometri

Pola slip/no-slip, ditunjukkan dalam Gambar 3.13 dan Gambar 3.14, diterapkan pada permukaan stasioner<sup>2</sup>. Area trapesium dipilih untuk aplikasi slip. Daerah ini, dianggap sebagai daerah slip dan ditempatkan sejajar dengan ujung *inlet* fluida. Dan pada tiga sisi yang tersisa yaitu daerah no-slip. Efek yang diinginkan adalah fluida mengalir pertama melalui daerah slip dan kemudian keluar melalui daerah no-slip.

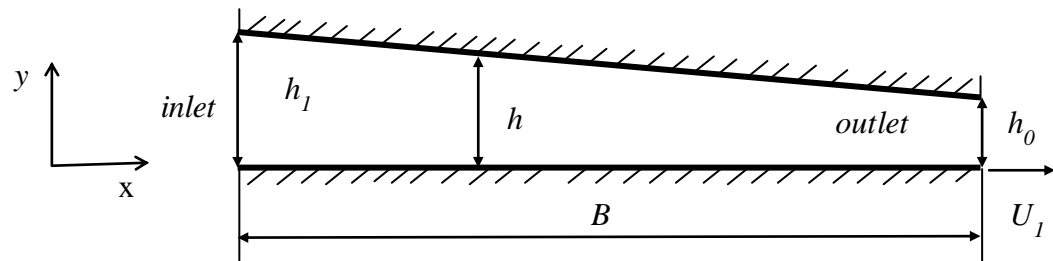
- Geometri

Konfigurasi *finite slider bearing* ini mengaplikasikan dua permukaan yang memiliki kondisi batas heteroslip pola trapesium disepanjang permukaan. Geometri yang digunakan pada kasus ini adalah:

- Panjang *bearing*  $B = 1 \text{ mm}$
- Lebar *bearing*  $L = 1 \text{ mm}$
- Tinggi maksimum  $h_1 = 1 \mu\text{m}$
- Tinggi minimum  $h_0 = 1 \mu\text{m}$
- Panjang permukaan slip  $B_s = 0.7 \text{ mm}$
- Sudut permukaan slip  $\alpha = 70^\circ$

- *Boundary Conditions*

Asumsi nilai tekanan pada sisi masuk dan keluar *sliderbearing* diatur nol dan gradien kecepatan bernilai nol pada arah normal terhadap *sliding*. Pada permukaan yang bergerak, kondisi batas heteroslip diasumsikan untuk persamaan aliran, yaitu kecepatan dinilai konstan, sementara tekanan memiliki kondisi batas gradien nol.



Gambar 3.15 Kondisi bataspada domain komputasi *slider bearing* kondisi heteroslip pola trapesium

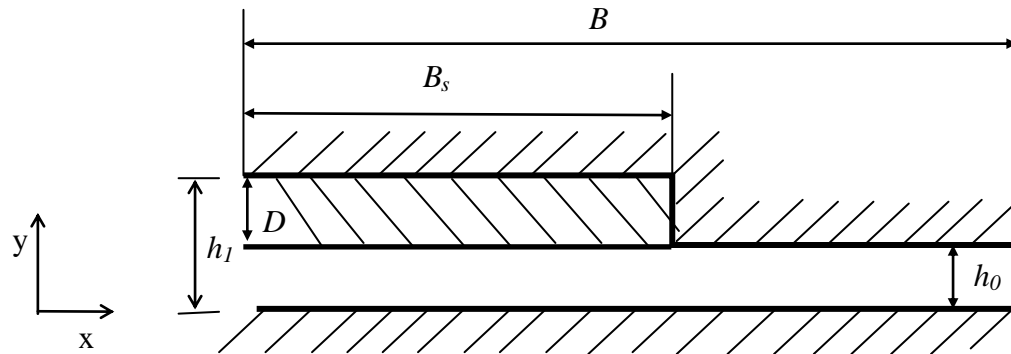
Kondisi batas yang digunakan pada kasus ini adalah:

- Kecepatan dinding bawah  $U_1 = 10 \text{ m/s}$
- Bilangan *Reynolds*  $Re = 10$  (aliran laminar)
- Massa jenis pelumas  $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$
- Viskositas dinamis pelumas  $\eta = 10^{-3} \text{ Pas}$

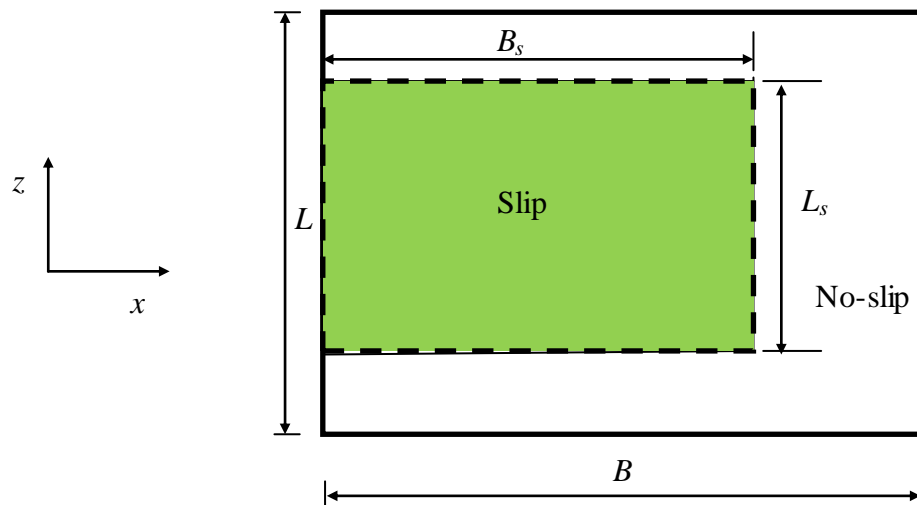
### 3.2.4 Konfigurasi IV – Permukaan dengan Kondisi Heteroslip menggunakan pola Persegi dengan Tambahan Tekstur

Sebenarnya konfigurasi ini hampir sama dengan konfigurasi I, hanya saja kontak *sliding* dimodelkan seperti pada Gambar 3.16, Gambar 3.17 dan Gambar 3.18. Dua permukaan berbentuk paralel dengan salah satu permukaan, yaitu permukaan atas, memiliki satu tekstur (*recess*). Permukaan atas dilabelkan sebagai permukaan 1 yang merupakan

permukaan yang diam. Sedangkan permukaan bawah dilabelkan dengan permukaan 2 adalah permukaan yang bergerak dengan kecepatan  $U_1$ .

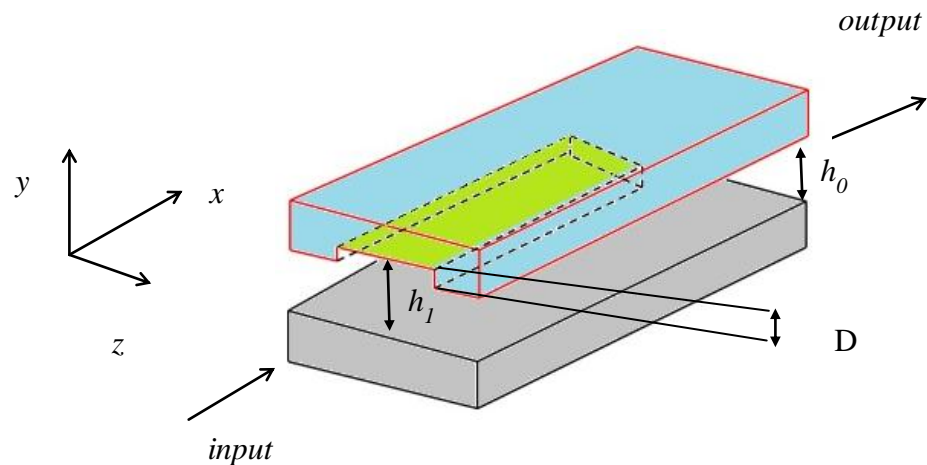


Gambar 3.16 Geometri *slider bearing* kondisi heteroslip pola persegi dengan tekstur tampak samping



Gambar 3.17 Geometri *slider bearing* kondisi heteroslip pola persegi dengan tekstur tampak atas





Gambar 3.18 Geometri *slider bearing* kondisi heteroslip pola persegi dengan teksturtampak isometri

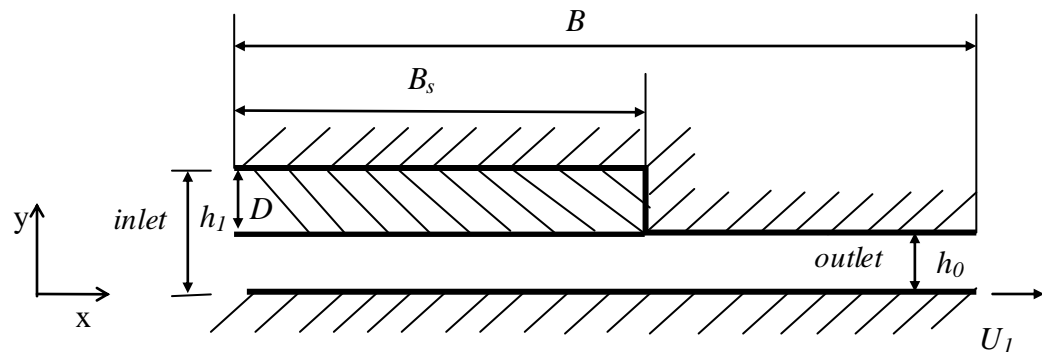
- Geometri

konfigurasi ini sama seperti dengan konfigurasi II, dimana kondisi batas pada kedua permukaan memiliki kondisi heteroslip pola persegi. Perbedaannya adalah adanya tekstur disepanjang permukaan slip. Geometri yang digunakan pada kasus ini adalah:

- Panjang *bearing*  $B = 1 \text{ mm}$
- Lebar *bearing*  $L = 1 \text{ mm}$
- Kedalaman *tekstur*  $D = 0.2 \mu\text{m}$
- Tinggi maksimum  $h_1 = h_0 + D = 1.2 \mu\text{m}$
- Tinggi minimum  $h_0 = 1 \mu\text{m}$
- Panjang permukaan slip  $B_s = 0.65 \text{ mm}$
- Lebar permukaan slip  $L_s = 0.8 \text{ mm}$

- *Boundary Conditions*

Asumsi nilai tekanan pada sisi masuk dan keluar *bearing* diatur nol dan gradien kecepatan bernilai nol pada arah normal terhadap *sliding*. Pada permukaan yang bergerak, kondisi batas heteroslip diasumsikan untuk persamaan aliran, yaitu kecepatan dinilai konstan, sementara tekanan memiliki kondisi batas gradien nol.



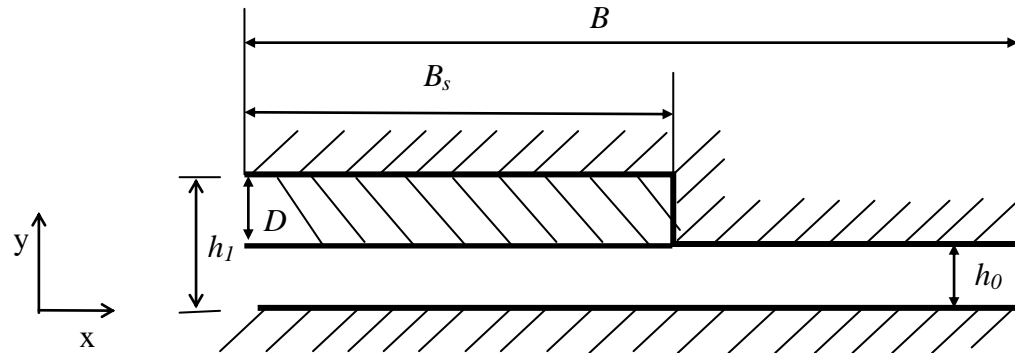
Gambar 3.19 Kondisi batas pada domain komputasi *slider bearing* dengan kondisi heteroslip pola persegi dengan tekstur

Kondisi batas yang digunakan pada kasus ini adalah:

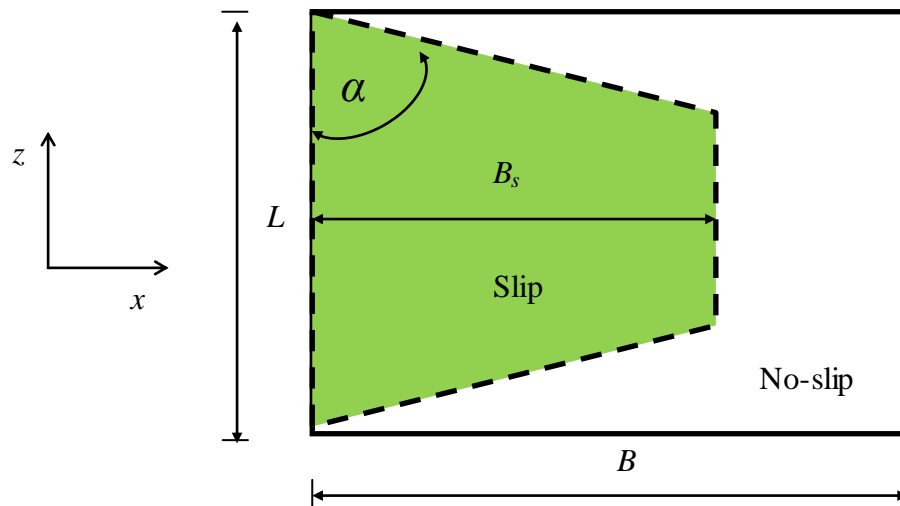
- Kecepatan dinding bawah  $U_1 = 10 \text{ m/s}$
- Bilangan *Reynolds*  $Re = 10$  (aliran laminar)
- Massa jenis pelumas  $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$
- Viskositas dinamis pelumas  $\eta = 10^{-3} \text{ Pas}$

### 3.2.5 Kasus V - Permukaan dengan Kondisi Heteroslip Menggunakan Pola Trapesium dengan Tambahan Tekstur

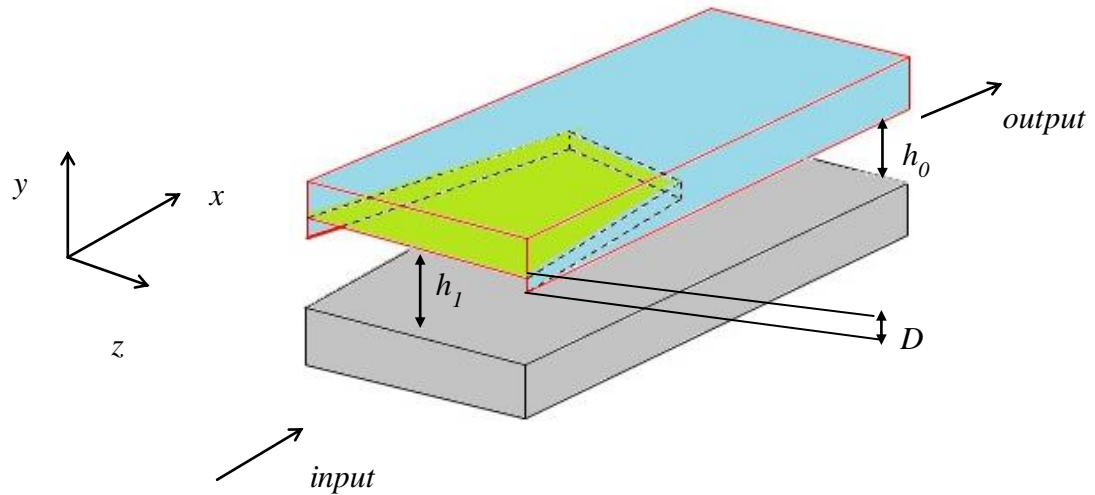
Konfigurasi V adalah kasus yang hampir sama seperti konfigurasi IV tetapi dengan heteroslip yang menggunakan pola trapesium dengan tambahan tekstur pada daerah slipnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.20, Gambar 3.21 dan Gambar 3.22.



Gambar 3.20 Geometri *slider bearing* kondisi heteroslip pola trapesium dengan tekstur tampak samping



Gambar 3.21 Geometri *slider bearing* kondisi heteroslip pola trapesium dengan tekstur tampak atas



Gambar 3.22 Geometri *slider bearing* kondisi heteroslip pola trapesium dengan tekstur tampak isometri

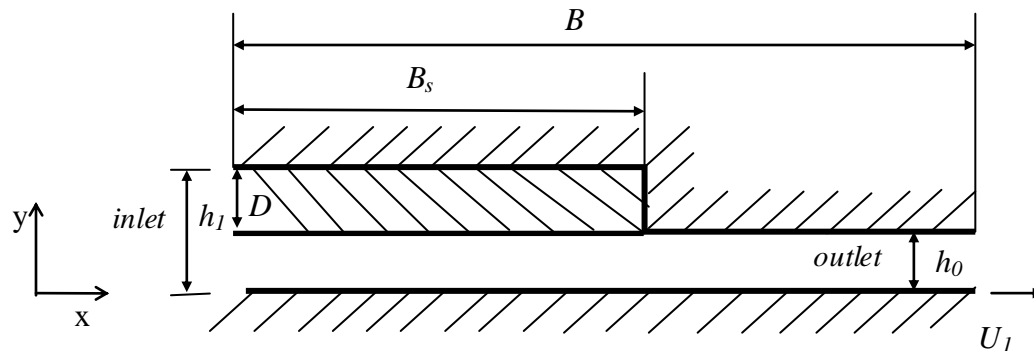
- Geometri

Konfigurasi ini sama seperti dengan kasus sebelumnya dimana kondisi batas pada kedua permukaan memiliki kondisi heteroslip pola trapesium. Perbedaannya adalah adanya tekstur disepanjang permukaan slip. Geometri yang digunakan pada kasus ini adalah:

- Panjang *bearing*  $B = 1 \text{ mm}$
- Lebar *bearing*  $L = 1 \text{ mm}$
- Kedalaman tekstur  $D = 0.2 \mu\text{m}$
- Tinggi maksimum  $h_1 = h_0 + D = 1.2 \mu\text{m}$
- Tinggi minimum  $h_0 = 1 \mu\text{m}$
- Panjang permukaan slip  $B_s = 0.65 \text{ mm}$
- Lebar permukaan slip  $L_s = 0.8 \text{ mm}$

- *Boundary Conditions*

Asumsi nilai tekanan pada sisi masuk dan keluar *slider bearing* diatur nol dan gradien kecepatan bernilai nol pada arah normal terhadap *sliding*. Pada permukaan yang bergerak, kondisi batas heteroslip diasumsikan untuk persamaan aliran, yaitu kecepatan dinilai konstan, sementara tekanan memiliki kondisi batas gradien nol.



Gambar 3.23 Kondisi batas pada domain komputasi *slider bearing* dengan kondisi heteroslip pola trapesium dengan tekstur

Kondisi batas yang digunakan pada kasus ini adalah:

- Kecepatan dinding bawah  $U_1 = 10 \text{ m/s}$
- Bilangan *Reynolds*  $Re = 10$  (aliran laminar)
- Massa jenis pelumas  $\rho = 10^3 \text{ kg/m}^3$
- Viskositas dinamis pelumas  $\eta = 10^{-3} \text{ Pas}$