

Bab 5

Hasil dan Pembahasan

Telah dibuat model yang menerangkan sistem fluida dengan materi di dalamnya dan berinteraksi dengan medan gauge Abelian dan non-Abelian berdasarkan prinsip *gauge*. Prinsip yang digunakan adalah mengerjakan simetri gauge pada materi (boson dan fermion). Untuk simetri gauge Abelian telah didapatkan lagrangian density yang invarian terhadap transformasi gauge lokal yaitu :

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{boson} - (eA_\mu + gB_\mu)J^\mu + (e^2 A_\mu A^\mu + g^2 B_\mu B^\mu + 2egA_\mu B^\mu)\Phi^*\Phi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}S_{\mu\nu}S^{\mu\nu}$$

dan

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{fermion} - (eA_\mu + gB_\mu)\bar{\psi}\gamma^\mu\psi - \frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} - \frac{1}{4}S_{\mu\nu}S^{\mu\nu}$$

Suku-suku pada lagrangian di atas merepresentasikan interaksi-interaksi yang terjadi antar medan. Pada suku ketiga terlihat bahwa terjadi interaksi antara materi dengan medan fluida dan medan gauge. Pada suku keempat untuk lagrangian boson terdapat suku interaksi antara medan fluida 3, medan gauge dan materi yang dinyatakan dengan $2egA_\mu B^\mu \Phi^* \Phi$. Suku ini tidak muncul pada lagrangian fermion yang menunjukkan bahwa untuk sistem fluida dengan materi fermion yang berada dalam medan gauge, interaksi antara medan fluida dan medan gauge tidak terjadi.

Untuk simetri gauge non-Abelian telah diperoleh :

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{boson} - g_F B_{\mu a} J_{aF}^\mu - g_G A_{\mu a} J_{aG}^\mu + g_G^2 A_a^\mu A_{\mu b} \Phi^\dagger T_{aG} T_{bG} \Phi + g_F^2 B_a^\mu B_{\mu b} \Phi^\dagger T_{aF} T_{bF} \Phi + g_F g_G A_a^\mu B_{\mu b} \Phi^\dagger (T_{aG} T_{bF} + T_{bF} T_{aG}) \Phi - \frac{1}{4} S_{\mu\nu a} S_a^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu a} F_a^{\mu\nu} + V(\Phi)$$

dan

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{fermion} - g_F B_{\mu a} J_{aF}^\mu - g_G A_{\mu a} J_{aG}^\mu - \frac{1}{4} S_{\mu\nu a} S_a^{\mu\nu} - \frac{1}{4} F_{\mu\nu a} F_a^{\mu\nu} + V(\Phi)$$

dengan mensubstitusi lagrangian di atas pada persamaan Euler-Lagrange maka akan diperoleh persamaan gerak untuk masing-masing medan. Dengan persamaan medan fluidanya adalah :

$$\partial_\mu S^{\mu\nu} = g J^\nu \quad \text{Abelian}$$

atau :

$$D_\mu S^{\mu\nu} = g_F \mathcal{J}_F^\nu \quad \text{non-Abelian}$$

bila $B_{\mu a}$ dipandang sebagai medan fluida yang mewakili sekumpulan fluida untuk setiap a , maka kita memiliki sistem multfluida dengan persamaan gerak seperti di atas. Analog dengan kasus Abelian, interaksi antara medan fluida, materi dan medan gauge hanya terdapat pada lagrangian medan boson yaitu pada suku $g_F g_G A_a^\mu B_{\mu b} \Phi^\dagger (T_{aG} T_{bF} + T_{bF} T_{aG}) \Phi$.

interaksi antara medan fluida ditunjukkan pada suku *pure gauge* yaitu :

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} S_{\mu\nu a} S_a^{\mu\nu}$$

sebab di dalam S_a^μ terdapat suku $-g_F C_{abc} B^{\mu b} B_{\mu c}$.

Dari persamaan gerak fluida Abelian dapat diperoleh persamaan Maxwell untuk medan fluida yaitu :

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{R} &= 0 \\ t[\nabla \times \vec{Q}] &= -\frac{\partial \vec{R}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{Q} &= \rho \\ \nabla \times \vec{R} - \frac{\partial \vec{Q}}{\partial t} &= \vec{j} \end{aligned}$$

pada persamaan gerak fluida, bila $J^\nu = 0$ maka $\partial_\mu S^{\mu\nu} = 0$, dengan kata lain $\nabla \cdot Q = 0$ dan $\nabla \times R - \frac{\partial Q}{\partial t} = 0$ yang berarti tidak terdapat sumber untuk fluida bila tidak terdapat materi. Sedangkan pada kasus non-Abelian, untuk $J^\nu = 0$ (tanpa adanya materi) akan didapatkan $\partial_\mu S_a^{\mu\nu} = g_G C_{abc} A_{\mu b} S_c^{\mu\nu} + g_F C_{abc} B_{\mu b} S_c^{\mu\nu}$ yang merepresentasikan $S_a^{\mu\nu}$ berperan sebagai sumber untuk medan

fluida itu sendiri. Hal ini disebabkan karena pada kasus Abelian medan $S^{\mu\nu}$ tidak membawa "muatan" sehingga tidak bisa menjadi sumber bagi medannya sendiri, sedangkan pada kasus non-Abelian medan $S_a^{\mu\nu}$ memiliki muatan non-Abelian yang dapat berperan sebagai sumber untuk medan fluida itu sendiri sehingga dimungkinkan adanya *self interaction* antar medan gauge. Hal ini mirip dengan kasus pada relativitas umum dimana medan gravitasi membawa energi yang sebanding dengan massa sehingga dapat berperan sebagai sumber gravitasi. Dari persamaan gerak fluida non-Abelian dapat diturunkan persamaan gerak umum sistem magnetofluida yaitu :

$$\frac{\partial(\gamma_a \vec{v}_a)}{\partial t} + \nabla(\phi \gamma_a) + g_F C_{abc} \phi^2 \gamma_b \gamma_c \vec{v}_b = g_F \int dt [\vec{\mathcal{J}} + \vec{F}_a] \quad (\text{relativistik})$$

atau

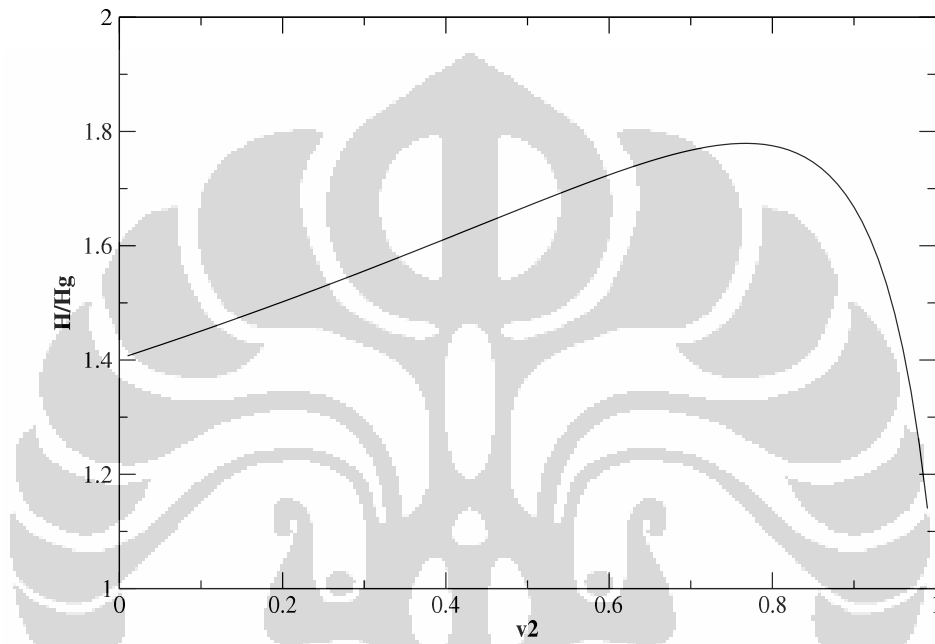
$$\frac{\partial \vec{v}_a}{\partial t} + (\vec{v}_a \cdot \nabla) \vec{v}_a + g_F C_{abc} \vec{v}_b = g_F \int dt [\vec{\mathcal{J}} + \vec{F}_a] \quad (\text{non-relativistik})$$

Bentuk persamaan di atas mirip dengan persamaan gerak plasma, sehingga dapat disimpulkan bahwa persamaan di atas relevan terhadap plasma yang dibentuk oleh quark dan gluon. Pada QGP medan fluida disusun oleh medan gluon dengan materi di dalamnya adalah quark dan anti-quark yang berinteraksi dengan medan elektromagnetik. Untuk sistem plasma dengan medan fluida Abelian, semua konstanta struktur bernilai nol dan nilai $\vec{F}_a = 0$.

Dari lagrangian ini kita juga dapat menghitung energi total dari sistem QGP yang dinyatakan dalam persamaan (4.17). Asumsi yang dibuat adalah kecepatan gluon dan arus quark dianggap hanya pada sumbu z. Grafik dibawah ini menunjukkan variasi nilai perbandingan *energy density* total QGP (4.17) dengan *energy density* gluon terhadap kecepatan gluon v_2 . Nilai kecepatan gluon (kecuali untuk v_2) dan arus quark untuk semua indeks diasumsikan konstan yaitu : $v_1 = v_3 \dots = v_8 = 0.8c$ dan $J_q = 1$. Dari grafik dapat dilihat bahwa pada nilai kecepatan gluon rendah energi sistem magnetofluida didominasi oleh suku interaksi quark dan gluon, hal ini dapat diinterpretasikan karena pada nilai-nilai kecepatan ini quark dan gluon masih terikat sebagai hadron. Pada kecepatan gluon tinggi energi sistem magnetofluida didominasi oleh energi gluon. Ketika kecepatan gluon menjadi sangat tinggi quark dan gluon menjadi *deconfined* dan

akan membentuk QGP yang disusun oleh awan gluon dengan materi quark dan anti quark.

H/Hg terhadap kecepatan gluon



Gambar 5.1: H = rapat energi QGP, H_g = rapat energi gluon, $\rho_q = 1$, $J_q = 1$, $\alpha_s = 1$, $\phi = 0.8$