

**REFORMULASI DARI SOLUSI 3-SOLITON  
UNTUK PERSAMAAN KORTEWEG-de VRIES**

Dian Mustikaningsih dan Sutimin  
Jurusan Matematika FMIPA Universitas Diponegoro

**Abstract**

The solution of 3-soliton for Korteweg-de Vries (KdV) equation can be obtained by the Hirota Method. The reformulation of the 3-soliton solution was represented as the superposition of the solution of each individual soliton. Moreover, the asymptotic form of 3-soliton solution was obtained by limiting of the  $t$  parameter. The phase shift of each individual soliton are analysed in detail based its asymptotic form. The results of the analysis shown that the first soliton always have a phase shift called forward, the second soliton have some possibility (there is no phase shift, have a forward phase shift, or have a backward phase shift), and for the third soliton always have a phase shift called backward.

Kata kunci : Soliton, fase, soliter.

**1. PENDAHULUAN**

Berbagai fenomena alam yang terdapat di sekitar kita, salah satu fenomena yang terjadi adalah gelombang. Meskipun mekanisme fisik untuk masing-masing proses dari gelombang-gelombang dapat berbeda, tetapi semuanya mempunyai gejala umum bahwa gelombang-gelombang tersebut disebabkan adanya gangguan fisik yang tidak putus-putus dan merambat melalui suatu medium. Gelombang merambat dengan kecepatan yang bergantung pada sifat medium.

Dalam tulisan ini dibahas sifat interaksi gelombang soliter yang dari persamaan Korteweg-deVries (KdV). Solusi soliter dan solusi multi soliton (solusi 3-soliton) dari persamaan KdV digunakan metode Hirota (operator bilinear Hirota). Solusi 3-soliton ini selanjutnya akan dinyatakan sebagai reformulasi dari superposisi individu soliton dan akan dianalisis pergeseran fase untuk masing – masing soliton.

## 2. GELOMBANG SOLITER UNTUK PERSAMAAN KORTEWEG-DE VRIES

Gelombang soliter merupakan gelombang tunggal yang merambat dengan satu puncak gelombang, tanpa mengalami perubahan bentuk dan kecepatan baik sebelum maupun sesudah tumbukan. Profil dari gelombang soliter merupakan fungsi sech.

Untuk menjelaskan gelombang soliter ini, diberikan suatu persamaan Korteweg-deVries (KdV). Dalam bentuk normal, persamaan KdV adalah

$$u_t - 6uux + uxxx = 0. \quad (1)$$

Selanjutnya, untuk menyelesaikan persamaan KdV didefinisikan transformasi koordinat bergantung,

$$u(x,t) = f(x - ct) = f(\xi) \quad (2)$$

dengan  $\xi = x - ct$ ,  $c$  konstanta sebarang. Jika persamaan (2) didifferensialkan ke- $t$  diperoleh dan ke- $x$ , kemudian disubstitusikan ke persamaan KdV (1) maka diperoleh

$$-c \frac{df}{d\xi} - 6f \frac{df}{d\xi} + \frac{d^3 f}{d\xi^3} = 0. \quad (3)$$

Dengan mengintegalkan persamaan (3) sebanyak 2 kali dan menggunakan syarat  $f, \frac{df}{d\xi}, \frac{d^2 f}{d\xi^2}, \dots \rightarrow 0$  untuk  $\xi \rightarrow \pm \infty$  (syarat batas untuk gelombang soliter) diperoleh

$$-\frac{1}{2}c f^2 - f^3 + \frac{1}{2} \left( \frac{df}{d\xi} \right)^2 = 0 \quad (4)$$

atau

$$\frac{df}{f\sqrt{2f+c}} = \pm d\xi. \quad (5)$$

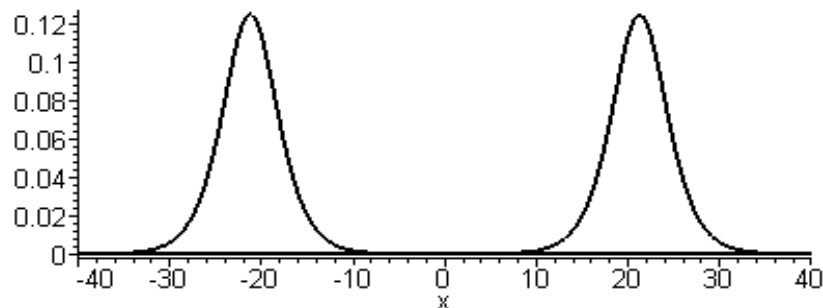
Solusi akan diperoleh jika  $\left( \frac{df}{d\xi} \right)^2 \geq 0$ , dan  $(2f + c) \geq 0$ . Dengan menyelesaikan persamaan (5) diperoleh

$$\pm (e^{\xi}) = \left( \frac{u - \sqrt{c}}{u + \sqrt{c}} \right)^{1/\sqrt{c}}. \quad (6)$$

Sehingga solusi gelombang soliter dari persamaan KdV adalah

$$u(x, t) = -\frac{1}{2} c \operatorname{sech}^2 \frac{1}{2} \sqrt{c}(x - ct). \quad (7)$$

Profil gelombang dari persamaan (7) untuk  $u$  positif diperlihatkan pada gambar 1, dengan  $c = 1/4$ .



Gambar 1. Profil gelombang soliter  $u(x, t) = \frac{1}{2} c \operatorname{sech}^2 \frac{1}{2} \sqrt{c}(x - ct)$  pada  $t = -50$  dan  $t = 50$ , yang merambat dalam arah  $x$

### 3. SOLUSI 3-SOLITON DARI PERSAMAAN KDV DENGAN METODE HIROTA

Misalkan solusi gelombang soliter  $u = w_x$ , maka persamaan KdV dapat ditulis menjadi

$$w_{xt} - 6w_x w_{xx} + w_{xxx} = 0, \quad (8)$$

kemudian apabila diintegalkan terhadap  $x$  dan menggunakan syarat  $w_t, w_x, w_{xx}, \dots \rightarrow 0$  untuk  $x \rightarrow \pm \infty$  maka persamaan (12) dapat ditulis menjadi

$$w_t - 3w_x^2 + w_{xxx} = 0. \quad (9)$$

Dengan mengambil  $w = 2 \frac{f_x}{f}$  dan didifferensialkan terhadap  $x$  dan  $t$ , maka diperoleh persamaan KdV Hirota

$$ff_{xt} - f_x f_t + 3f_{xx}^2 + ff_{xxxx} - 4f_x f_{xxx} = 0. \quad (10)$$

Dengan menggunakan operator bilinear

$$D_t^m D_x^n (f \cdot g) = \left( \frac{\partial}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial t_1} \right)^m \left( \frac{\partial}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x_1} \right)^n f(x, t) g(x_1, t_1) \Big|_{\substack{x_1=x \\ t_1=t}} \quad (11)$$

maka persamaan (10) menjadi

$$B(f \cdot f) = D_x (D_t + D_x^3) (f \cdot f) = 2 \cdot 0 = 0 \quad (12)$$

yang merupakan bentuk bilinear dari persamaan KdV.

Solusi gelombang soliter dapat digeneralisasi ke solusi N-soliton, yang lebih mudah diselesaikan dengan mengambil parameter sebarang  $\varepsilon$ , misalkan solusi N-soliton secara umum dapat ditulis

$$u(x, t) = 2 \frac{\partial^2}{\partial x^2} \ln f(x, t) \quad (13)$$

dengan  $f(x, t) = 1 + \sum_{n=1}^{\infty} \varepsilon^n f_n(x, t) \quad (14)$

dan  $f_n = \sum_{n=1}^{\infty} \exp(2\theta_n), \quad (15)$

dimana  $\theta_n = a_n x + \omega_n t + \alpha_n, \quad n = 1, 2, 3, \dots$  apabila persamaan (15) disubstitusikan ke persamaan (16) maka diperoleh

$$B(1.1) + \varepsilon B(f_1 \cdot 1 + 1 \cdot f_1) + \varepsilon^2 B(f_2 \cdot 1 + f_1 \cdot f_1 + 1 \cdot f_2) + \dots + \varepsilon^r B \left( \sum_{m=0}^{\infty} f_{r-m} \cdot f_m \right) + \dots = 0 \quad (16)$$

dimana  $\sum_{m=0}^r f_{r-m} f_m = f_{r-0} f_0 + f_{r-1} f_1 + f_{r-2} f_2 + \dots + f_{r-(r-1)} f_{r-1} + f_{r-r} f_r.$

Jika diasumsikan  $f_0 = 1$  dan karena  $\varepsilon$  sebarang parameter maka  $\varepsilon^r$  ( $r = 1, 2, \dots$ ) tidak identik dengan nol sehingga persamaan (16) dapat dinyatakan oleh

$$B(1.1) = 0, \quad (17)$$

$$B(f_1 \cdot 1 + 1 \cdot f_1) = 0, \quad (18)$$

$$B(f_2 \cdot 1 + f_1 \cdot f_1 + 1 \cdot f_2) = 0, \quad (19)$$

$$B(f_3 \cdot 1 + f_2 \cdot f_1 + f_1 \cdot f_2 + 1 \cdot f_3) = 0, \quad (20)$$

begitu seterusnya.

Karena  $D_t D_x (a \cdot 1) = \frac{\partial^2 a}{\partial t \partial x} = D_t D_x (1 \cdot a)$ , maka  $B(f_n \cdot 1) =$

$B(1 \cdot f_n)$ , dan  $B(f_n \cdot f_{n+1}) = B(f_{n+1} \cdot f_n)$ , untuk  $n = 1, 2, 3, \dots$  sehingga dari persamaan (17) – (20) dapat ditulis menjadi

$$Df_1 = 0, \quad (21)$$

$$2 Df_2 = - B(f_1 \cdot f_1), \quad (22)$$

$$Df_3 = - B(f_1 \cdot f_2). \quad (23)$$

Menurut persamaan (15), dimisalkan

$$f_1 = \exp(2\theta_1) + \exp(2\theta_2) + \exp(2\theta_3), \quad (24)$$

dengan variabel fase  $\theta_i = a_i x + \omega_i t + \alpha_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ . Substitusi  $f_1$  ke persamaan (21), diperoleh

$$\left\{ (2\omega_1 + 8a_1^3) + (2\omega_2 + 8a_2^3) + (2\omega_3 + 8a_3^3) \right\} (\exp(2\theta_1) + \exp(2\theta_2) + \exp(2\theta_3)) = 0 \quad (25)$$

Persamaan (25) akan menentukan relasi dispersi non linier untuk solusi 3-soliton  $\omega_i = -4a_i^3$ ,  $i = 1, 2, 3$  sehingga variabel fase dapat ditulis menjadi  $\theta_i = a_i x - 4a_i^3 t + \alpha_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ .

Apabila  $f_1$  disubstitusikan ke persamaan (22) maka

$$Df_2 = 3a_1 a_2 (a_1 - a_2)^2 \exp(2\theta_1 + 2\theta_2) + 3a_1 a_3 (a_1 - a_3)^2 \exp(2\theta_1 + 2\theta_3) + 3a_2 a_3 (a_2 - a_3)^2 \exp(2\theta_2 + 2\theta_3). \quad (26)$$

Kemudian apabila persamaan (26) diintegrasikan terhadap  $x$  dan  $t$  untuk menghilangkan operator  $D$  maka diperoleh

$$f_2 = \mathbf{A}_{12} \exp(2\theta_1 + 2\theta_2) + \mathbf{A}_{13} \exp(2\theta_1 + 2\theta_3) + \mathbf{A}_{23} \exp(2\theta_2 + 2\theta_3) \quad (27)$$

$$\text{dengan } \mathbf{A}_{12} = \left( \frac{a_1 - a_2}{a_1 + a_2} \right)^2, \quad \mathbf{A}_{13} = \left( \frac{a_1 - a_3}{a_1 + a_3} \right)^2, \quad \mathbf{A}_{23} = \left( \frac{a_2 - a_3}{a_2 + a_3} \right)^2. \quad (28)$$

Dengan cara yang sama untuk memperoleh  $f_3$

$$f_3 = \frac{(a_1 - a_2)^2 (a_1 - a_3)^2 (a_2 - a_3)^2}{(a_1 + a_2)^2 (a_1 + a_3)^2 (a_2 + a_3)^2} \exp (2\theta_1 + 2\theta_2 + 2\theta_3) \quad (36)$$

$$\text{dengan } \mathbf{A}_{123} = \left( \frac{a_1 - a_2}{a_1 + a_2} \right)^2 \left( \frac{a_1 - a_3}{a_1 + a_3} \right)^2 \left( \frac{a_2 - a_3}{a_2 + a_3} \right)^2. \quad (37)$$

Substitusi  $f_1, f_2,$  dan  $f_3$  ke persamaan (14) dengan mengambil  $\varepsilon = 1$  dan  $f_n = 0, n = 4, 5, \dots,$  diperoleh

$$f(x, t) = 1 + (\exp (2\theta_1) + \exp (2\theta_2) + \exp (2\theta_3)) + (\mathbf{A}_{12} \exp (2\theta_1 + 2\theta_2) + \mathbf{A}_{13} \exp (2\theta_1 + 2\theta_3) + \mathbf{A}_{23} \exp (2\theta_2 + 2\theta_3) + \mathbf{A}_{123} \exp (2\theta_1 + 2\theta_2 + 2\theta_3)). \quad (38)$$

Dengan mengambil  $\exp (2\theta_1) = h_1, \exp (2\theta_2) = h_2,$  dan  $\exp (2\theta_3) = h_3,$  sehingga persamaan (38) dapat ditulis menjadi

$$f = 1 + h_1 + h_2 + h_3 + \mathbf{A}_{12} h_1 h_2 + \mathbf{A}_{13} h_1 h_3 + \mathbf{A}_{23} h_2 h_3 + \mathbf{A}_{123} h_1 h_2 h_3 \quad (39)$$

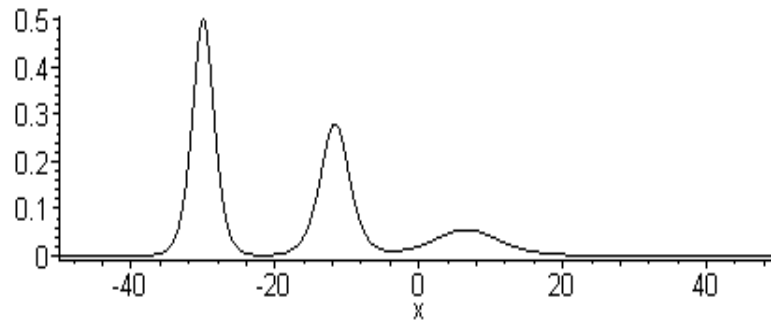
dimana  $\mathbf{A}_{12}, \mathbf{A}_{13}, \mathbf{A}_{23},$  dan  $\mathbf{A}_{123}$  dinyatakan pada persamaan (29) dan (37). Menurut persamaan (18), maka solusi 3-soliton dari persamaan KdV adalah

$$u(x, t) = 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{f_x}{f} \right) \quad (40)$$

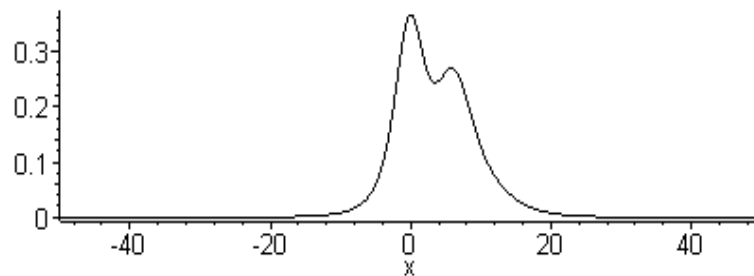
dengan  $f$  dinyatakan pada persamaan (40) dan

$$f_x = 2a_1 h_1 + 2a_2 h_2 + 2a_3 h_3 + 2(a_1 + a_2) \mathbf{A}_{12} h_1 h_2 + 2(a_1 + a_3) \mathbf{A}_{13} h_1 h_3 + 2(a_2 + a_3) \mathbf{A}_{23} h_2 h_3 + 2(a_1 + a_2 + a_3) \mathbf{A}_{123} h_1 h_2 h_3. \quad (41)$$

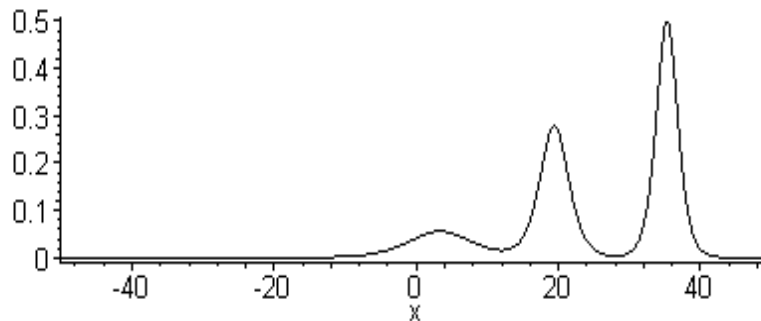
Profil gelombang untuk solusi 3-soliton dari persamaan KdV diperlihatkan pada gambar 2 – 4, dengan mengambil  $a_1 = 1, a_2 = 3/4, a_3 = 1/3,$  dan  $\alpha = 0.$



Gambar 2. Profil gelombang dari solusi 3-soliton pada  $t = -30$  (sebelum tumbukan)



Gambar 3. Profil gelombang dari solusi 3-soliton pada  $t = 0$  (saat tumbukan)



Gambar 4. Profil gelombang dari solusi 3-soliton pada  $t = 30$  (setelah tumbukan)

#### 4. REFORMULASI SOLUSI 3-SOLITON

Solusi 3-soliton dari persamaan KdV pada persamaan 3.48 dapat dinyatakan sebagai superposisi soliton individu.

Proposisi :

Solusi N-soliton ( $N = 3$ ) dari persamaan KdV ditulis dalam bentuk

$$u = \sum_{n=1}^3 u_n \tag{42}$$

$$\text{dimana } u_n = 2a_n \frac{\partial}{\partial x} \tanh g_n = 2a_n \frac{\partial g_n}{\partial x} \operatorname{sech}^2 g_n \quad (43)$$

$$g_n = \theta_n + \frac{1}{2} \ln \left[ \frac{\bar{f}_n}{f_n} \right], \quad (44)$$

dengan  $\theta_n = a_n x + a_n^3 t + \alpha_n$ ,  $n=1, 2, 3$ .

Fungsi  $f_n$  dan  $\bar{f}_n$  untuk kasus  $N=3$  adalah

$$\begin{aligned} f_1 &= 1 + \exp(2\theta_2) + \exp(2\theta_3) + A_{23} \exp(2\theta_2 + 2\theta_3), \\ f_2 &= 1 + \exp(2\theta_1) + \exp(2\theta_3) + A_{13} \exp(2\theta_1 + 2\theta_3), \\ f_3 &= 1 + \exp(2\theta_1) + \exp(2\theta_2) + A_{12} \exp(2\theta_1 + 2\theta_2), \\ \bar{f}_1 &= 1 + A_{12} \exp(2\theta_2) + A_{13} \exp(2\theta_3) + A_{123} \exp(2\theta_2 + 2\theta_3), \\ \bar{f}_2 &= 1 + A_{12} \exp(2\theta_1) + A_{23} \exp(2\theta_3) + A_{123} \exp(2\theta_1 + 2\theta_3), \\ \bar{f}_3 &= 1 + A_{13} \exp(2\theta_1) + A_{23} \exp(2\theta_2) + A_{123} \exp(2\theta_1 + 2\theta_2), \end{aligned} \quad (45)$$

Bukti :

Dari persamaan (39), persamaan (45) dapat ditulis menjadi

$$\begin{aligned} f_1 &= 1 + h_2 + h_3 + A_{23} h_2 h_3, & \bar{f}_1 &= 1 + A_{12} h_2 + A_{13} h_3 + A_{123} h_2 h_3, \\ f_2 &= 1 + h_1 + h_3 + A_{13} h_1 h_3, & \bar{f}_2 &= 1 + A_{12} h_1 + A_{23} h_3 + A_{123} h_1 h_3, \\ f_3 &= 1 + h_1 + h_2 + A_{12} h_1 h_2, & \bar{f}_3 &= 1 + A_{13} h_1 + A_{23} h_2 + A_{123} h_1 h_2, \end{aligned}$$

kemudian jika diatas disubstitusikan ke persamaan (44) diperoleh

$$\begin{aligned} g_1 &= \theta_1 + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1 + A_{12} h_2 + A_{13} h_3 + A_{123} h_2 h_3}{1 + h_2 + h_3 + A_{23} h_2 h_3} \right), \\ g_2 &= \theta_2 + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1 + A_{12} h_1 + A_{23} h_3 + A_{123} h_1 h_3}{1 + h_1 + h_3 + A_{13} h_1 h_3} \right), \\ g_3 &= \theta_3 + \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1 + A_{13} h_1 + A_{23} h_2 + A_{123} h_1 h_2}{1 + h_1 + h_2 + A_{12} h_1 h_2} \right). \end{aligned} \quad (47)$$

Perhatikan bahwa,

$$\begin{aligned} &a_1 \tanh g_1 + a_2 \tanh g_2 + a_3 \tanh g_3 \\ &= \frac{2a_1 h_1 + 2a_2 h_2 + 2a_3 h_3 + 2(a_1 + a_2) A_{12} h_1 h_2 + 2(a_1 + a_3) A_{13} h_1 h_3 + 2(a_2 + a_3) A_{23} h_2 h_3 + 2(a_1 + a_2 + a_3) A_{123} h_1 h_2 h_3}{1 + h_1 + h_2 + h_3 + A_{12} h_1 h_2 + A_{13} h_1 h_3 + A_{23} h_2 h_3 + A_{123} h_1 h_2 h_3} - (a_1 + a_2 + a_3) \end{aligned}$$



atau 
$$\sum_{n=1}^3 a_n \tanh g_n = \frac{f_x}{f} - (a_1 + a_2 + a_3). \quad (48)$$

Apabila persamaan (48) dikalikan dengan dua dan didiferensialkan terhadap  $x$ , maka

$$\sum_{n=1}^3 \frac{\partial}{\partial x} 2a_n \tanh g_n = 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{f_x}{f} \right) - 2 \frac{\partial}{\partial x} (a_1 + a_2 + a_3) \quad (49)$$

diperoleh

$$\sum_{n=1}^3 u_n = 2 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{f_x}{f} \right). \quad (51)$$

## 5. BENTUK ASYMPTOTIK SOLUSI 3-SOLITON

Dalam pembahasan bentuk asymptotik dari solusi 3-soliton akan ditinjau perambatan gelombang pada transformasi koordinat bergerak dengan mengambil parameter  $t \rightarrow \pm \infty$ . Tanpa mengurangi keumuman diasumsikan  $a_1 > a_2 > a_3 > 0$  dan mengambil  $\alpha_n = 0$ , sehingga untuk variabel fase  $\theta_n = a_n x - a_n^3 t + \alpha_n$ ,  $n = 1, 2, 3$ , berlaku

$$\theta_n = a_n x - a_n^3 t. \quad (52)$$

(i) Pada  $t \rightarrow -\infty$ .

Untuk  $\theta_i = \text{konstan}$ ,  $\theta_2, \theta_3 \rightarrow -\infty$ , maka diperoleh

$$u \approx u_1 = 2 a_1^2 \operatorname{sech}^2(\theta_1) \quad (53)$$

yang ekuivalen dengan solusi soliton pertama tanpa mengalami pergeseran fase.

Untuk  $\theta_2 = \text{konstan}$ ,  $\theta_3 \rightarrow -\infty$ ,  $\theta_1 \rightarrow \infty$  maka diperoleh

$$u \approx u_2 = 2 a_2^2 \operatorname{sech}^2\left(\theta_2 + \frac{1}{2} \ln A_{12}\right). \quad (54)$$

yang ekuivalen dengan solusi soliton kedua yang mengalami perubahan fase sebesar  $\frac{1}{2} \ln A_{12}$ .

Untuk  $\theta_3 = \text{konstan}$ ,  $\theta_2 \rightarrow \infty$ ,  $\theta_1 \rightarrow \infty$  maka diperoleh

$$u \approx u_3 = 2 a_3^2 \operatorname{sech}^2\left(\theta_3 + \frac{1}{2} (\ln A_{13} + \ln A_{23})\right) \quad (55)$$

yang ekuivalen dengan solusi soliton ketiga yang mengalami pergeseran fase sebesar  $\frac{1}{2} (\ln A_{12} + \ln A_{13})$ .

(ii) Pada  $t \rightarrow \infty$ .

Dengan cara yang sama, diperoleh

$$\begin{aligned} u &\approx u_1 = 2a_1^2 \operatorname{sech}^2\left(\theta_1 + \frac{1}{2}(\ln A_{12} + \ln A_{13})\right). \\ u &\approx u_2 = 2a_2^2 \operatorname{sech}^2\left(\theta_2 + \frac{1}{2}\ln A_{23}\right) \\ u &\approx u_3 = 2a_3^2 \operatorname{sech}^2(\theta_3) \end{aligned} \tag{56}$$

## 6. PERGESERAN FASE SOLUSI 3-SOLITON

Pergeseran fase merupakan perubahan arah fase masing-masing soliton sebelum dan sesudah tumbukan terhadap soliton yang lain. Pergeseran fase ini dijelaskan terhadap arah sumbu  $x$  karena gelombang soliton berjalan sepanjang sumbu  $x$ . Misal  $\Delta_n$  menyatakan pergeseran fase soliton ke- $n$  ( $n=1, 2, 3$ ) antara  $t = -\infty$  (sebelum tumbukan) dan  $t = \infty$  (setelah tumbukan), maka pergeseran fase dapat dihitung melalui bentuk asymptotik atau limit-limit asymptotik.

Menurut persamaan (53) maka pada  $t = -\infty$  soliton ke pertama tidak mengalami pergeseran fase ( $\Delta_{(t \rightarrow -\infty)} = 0$ ) sedangkan menurut persamaan (56) maka pada  $t = \infty$  soliton pertama mengalami pergeseran fase ( $\Delta_{(t \rightarrow \infty)}$ ) sebesar

$$\frac{1}{2a_1} (\ln A_{12} + \ln A_{13}) \text{ sehingga diperoleh}$$

$$\Delta_1 = -\frac{\frac{1}{2}(\ln A_{12} + \ln A_{13})}{a_1}. \tag{57}$$

Dengan cara yang sama akan diperoleh pergeseran fase soliton kedua dan ketiga masing – masing adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \Delta_2 &= \frac{\frac{1}{2}(\ln A_{12} - \ln A_{23})}{a_2}. \\ \Delta_3 &= \frac{\frac{1}{2}(\ln A_{13} - \ln A_{23})}{a_3}. \end{aligned} \tag{58}$$

Jika  $0 < A_{ij} < 1$  dengan  $i = 1, 2, 3$  dan  $j = 1, 2, 3$  maka  $\Delta_1 > 0$ , mengakibatkan  $u_1$  selalu mengalami pergeseran fase maju sepanjang sumbu  $x$  dan  $\Delta_3 < 0$ , mengakibatkan  $u_3$  selalu mengalami pergeseran fase mundur,  $\Delta_2$  mempunyai beberapa kemungkinan, sebagai berikut :

- 1)  $\Delta_2$  bernilai nol, jika  $\ln A_{12} = \ln A_{23}$  atau  $a_2^2 = a_1 a_3$ , yaitu  $u_2$  tidak mengalami pergeseran fase .
- 2)  $\Delta_2$  bernilai positif, jika  $\ln A_{12} > \ln A_{23}$  atau  $a_2^2 < a_1 a_3$ , yang mengakibatkan  $u_2$  mengalami pergeseran fase maju.
- 3)  $\Delta_2$  bernilai negatif, jika  $\ln A_{12} < \ln A_{23}$  atau  $a_2^2 > a_1 a_3$ , yang mengakibatkan  $u_2$  mengalami pergeseran fase mundur.

## **7. KESIMPULAN**

Solusi 3-soliton dari persamaan Korteweg-de Vries (KdV) dapat diperoleh dengan Metode Hirota. Reformulasi solusi 3-soliton dinyatakan sebagai superposisi solusi masing-masing individu soliton. Sedangkan bentuk asymptotik solusi 3-soliton diperoleh melalui proses pelimitan terhadap parameter  $t$ . Pergeseran fase dari masing-masing individu soliton dibahas secara detail berdasarkan bentuk asymptotiknya. Soliton pertama dan ketiga selalu mengalami pergeseran fase karena selisih antara pergeseran fase sebelum dan setelah tumbukan tidak pernah nol, dimana soliton pertama mengalami pergeseran fase maju dan soliton ketiga mengalami pergeseran fase mundur. Soliton kedua tidak selalu mengalami pergeseran fase karena selisih antara pergeseran fase sebelum dan setelah tumbukan dapat bernilai nol, tergantung pada bilangan gelombang individu soliton, dimana apabila kuadrat bilangan gelombang soliton kedua sama dengan hasil kali bilangan gelombang soliton pertama dan ketiga maka soliton kedua tidak mengalami pergeseran fase, apabila kuadrat bilangan gelombang soliton kedua lebih kecil dari hasil kali bilangan gelombang soliton pertama dan ketiga maka soliton kedua mengalami pergeseran fase maju, dan apabila kuadrat bilangan gelombang soliton kedua lebih besar dari hasil kali bilangan gelombang soliton pertama dan ketiga maka soliton kedua mengalami pergeseran fase mundur.

## DAFTAR PUSTAKA

1. Alonso, Marcelo, *Fundamental University Physic*, 2<sup>nd</sup> Editions, Addison-Werlag Publishing Com Inc, Washington D. C, 1980, 232-241, 253-255..
2. Ayres F. Jr, *Teori dan Soal-Soal Diferensial dan Integral Kalkulus*, Erlangga, Jakarta, 1998, Edisi 2, 264-265, 269-270
3. Baisuri H. M, *Kalkulus*, Universitas Indonesia Press, Jakarta, 1986, 431-441, 459-461.
4. Bullough R. K, Laudrey P. J, *Solitons*, Springer-Verlag Berlin, Heidelberg, New York, 1980, 1-13, 65-67, 157-167, 373-375.
5. Drazin P. G, Johnson R. S, *Solitons : Analisis Introduction*, Cambridge University Press, New York, 1990.1-16, 21-22, 73-81, 102-109.
6. Haeussler E. F, Jr, Paul R, *Introductory Mathematical Analysis*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1983, 959-961,
7. Heck, Andre, *Introduction of Maple with 84 Illustrations*, Springe-Verlag, New York, 1993.
8. Humi, Mayer, and Miller W. B, *Boundary Value Problems And Partial Differential Equations*, PWS-KENT Publishing Co, Boston, 1991, 36-40.
9. Logan J. D, *An Introduction to Nonlinear Partial Differential Equations*, A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons Inc, New York, 1981, 1-9, 36-47, 116-121.
10. Toda, Morikazi, *Mathematic and Its Aplications Non Linear Waves and Solitons*, Kluwer Akademic Publishers, Norwell, 1983, 47-70, 143-147, 163-172.