

APLIKASI TEORI LANDAU-DE GENNES PADA TRANSISI FASE NEMATIK-ISOTROPIK *LIQUID CRYSTAL*

Warsono^a, Kamsul Abraha^b, Yusril Yusuf^b, Pekik Nurwantoro^b

^a Jurusan Pendidikan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Yogyakarta, Yogyakarta 55281, Indonesia

^b Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Gadjah Mada Yogyakarta, Yogyakarta 55281, Indonesia

Abstrak

Makalah ini bertujuan untuk mengkaji : (1). suhu batas pada keadaan transisi , (2). hubungan antara order parameter dengan suhu, (3) hubungan antara energi bebas dengan suhu dan, (4) hubungan antara energi bebas dengan order parameter, pada transisi fase nematik-isotropik *liquid crystal* melalui aplikasi teori Landau-de Gennes. Berdasarkan hasil kajian diketahui bahwa pada transisi fase nematik-isotropik *liquid crystal* : (1). ada 3 suhu batas pada keadaan transisi yaitu T_N^* , T_{NI} dan T_I^* dengan $T_N^* < T_{NI} < T_I^*$ yang menyebabkan ada 4 keadaan, yaitu : pada suhu $T < T_N^*$ materi dalam keadaan fase nematik penuh, pada suhu $T_N^* < T < T_{NI}$ materi dalam keadaan *paranematik* (fase nematik lebih dominan), pada suhu $T_{NI} < T < T_I^*$, materi dalam keadaan *metastabil nematik* (fase isotropik lebih dominan) dan pada suhu $T > T_I^*$ materi dalam keadaan fase isotropik penuh, rentang suhu dalam keadaan *paranematik* dan *metastabil nematik* bernilai kecil (2). jika suhu dinaikkan, maka nilai order parameter akan turun secara kontinyu sampai suhu batas atas T_I^* dan kemudian turun tajam mencapai nol, di atas suhu T_I^* nilai orde parameter adalah nol, (3). hubungan antara energi bebas dengan suhu pada titik transisi bersifat kontinyu (4). hubungan antara energi bebas dengan order parameter tidak bersifat linear, nilai minimum energi bebas pada keadaan transisi berkaitan dengan order parameter $\eta = 0$ atau $\eta \neq 0$ bergantung pada suhu.

Kata-kata kunci : teori Landau-de Gennes, transisi fase nematik-isotropik, *liquid crystal*

PENDAHULUAN

1. Latar Belakang Masalah

Liquid crystal saat ini menjadi salah satu bahan yang banyak dikaji oleh para ilmuwan. Hal ini karena sifat-sifat bahan tersebut yang peka terhadap pengaruh medan luar, seperti pengaruh suhu, tekanan, medan listrik, medan magnet dan cahaya. Sifat peka *liquid crystal* terhadap medan luar telah dimanfaatkan untuk berbagai terapan. Salah satu terapan yang sangat luas dan bermanfaat saat ini adalah penggunaan *liquid crystal* untuk bahan layar monitor (LCD, *liquid crystal display*) pada televisi, komputer maupun kalkulator. Terapan lain di masa yang akan datang sangat menjanjikan sehingga kajian tentang bahan ini sangat penting.

Liquid crystal dapat dikelompokkan menjadi beberapa jenis, diantaranya adalah *termotropik*, yakni jenis *liquid crystal* yang transisi fasenya dipengaruhi oleh suhu. Ada 3 jenis *liquid crystal termotropik* yaitu *nematik*, *kolesterik* dan *smektik*. Nematik adalah jenis *liquid crystal* yang order posisinya random seperti fase cair, namun susunan molekul-molekulnya cenderung menuju arah tertentu atau dengan kata lain memiliki order orientasi. Kolesterik atau sering disebut *chiral nematik* tersusun dari *liquid crystal nematik* dengan sifat-sifat hampir sama dengan nematik, namun molekul-molekulnya cenderung membentuk heliks. *Liquid crystal smektik* adalah jenis *liquid crystal* yang memiliki order posisi, tidak seperti nematik. Kajian ini dibatasi pada jenis *liquid crystal nematik* karena jenis ini lebih banyak digunakan daripada jenis lainnya.

Salah satu sifat penting yang perlu dikaji dari *liquid crystal* adalah perilaku bahan tersebut pada keadaan transisi. Pada keadaan transisi, variabel-variabel termodinamik seperti energi bebas, entropi dan panas jenis dari bahan dapat bersifat kontinyu atau diskrit. Untuk mengetahui keadaan

variabel-variabel tersebut pada transisi fase dapat digunakan teori tertentu. Teori yang cukup baik untuk menjelaskan fenomena tersebut adalah teori medan rerata (*mean field theory*). Ada dua teori dasar medan rerata untuk transisi fase liquid crystal yaitu teori Landau-de Gennes dan Maier-Saupe (Ostapenko, dkk., 2008 : 2). Teori Landau-de Gennes didasarkan pada ekspansi energi bebas sebagai fungsi order parameter dan teori Maier-Saupe didasarkan pada pendekatan ketergantungan orientasi terhadap interaksi intermolekuler. Kajian ini dibatasi pada penggunaan teori Landau-de Gennes karena sifatnya yang sederhana dan penggunaannya yang umum (*universal*).

2. Rumusan Masalah

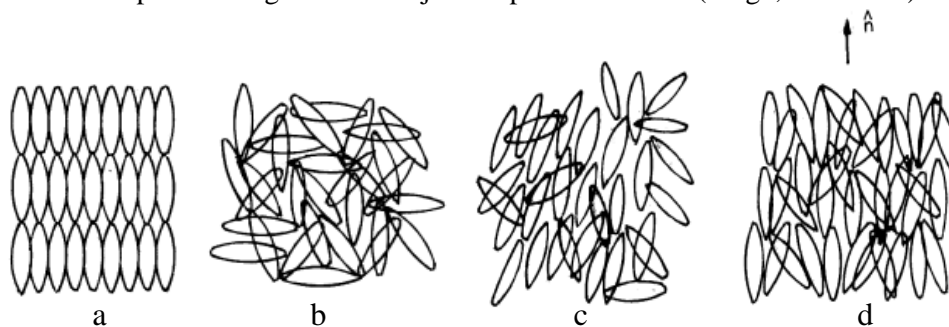
Berdasarkan latar belakang masalah, permasalahan yang akan dikaji dalam makalah ini adalah :

- Bagaimana suhu batas pada transisi nematik-isotropik liquid crystal menurut teori Landau-de Gennes ?
- Bagaimana hubungan antara order parameter dengan suhu pada transisi nematik-isotropik liquid crystal menurut teori Landau-de Gennes ?
- Bagaimana hubungan antara energi bebas dengan suhu pada transisi nematik-isotropik liquid crystal menurut teori Landau-de Gennes ?
- Bagaimana hubungan antara energi bebas dengan order parameter pada transisi nematik-isotropik liquid crystal menurut teori Landau-de Gennes ?

PEMBAHASAN

1. Liquid Crystal

Liquid Crystal (LC) adalah bahan yang berada dalam fase antara (*mesophase*), yaitu antara fase cair dan fase padat/kristal (Andrienko, 2006:2). Ia memiliki beberapa sifat yang mirip cairan dan juga mirip kristal (padatan). Zat padat memiliki orde posisi dan orientasi yang kuat sedangkan zat cair lemah. Orde posisi dan orientasi pada LC terletak diantara zat padat dan zat cair (Syah, 2007 : 6). Sifat-sifat tersebut pertama kali ditemukan oleh seorang ahli botani berkebangsaan Austria yang bernama Freidrich Reinitzer pada tahun 1888. Sampai saat ini kajian tentang LC terus dilakukan karena hasil yang diperoleh telah memberi dampak positif yang signifikan bagi perkembangan bidang sains dan teknologi. Beberapa aplikasi dari LC antara lain untuk : uji kekuatan bahan, holografi, visualisasi, dan berbagai aplikasi dalam nanoteknologi (Yalçın, 2005 : 1). Susunan molekul pada berbagai fase ditunjukkan pada Gambar 1 (Singh, 2000 :110).



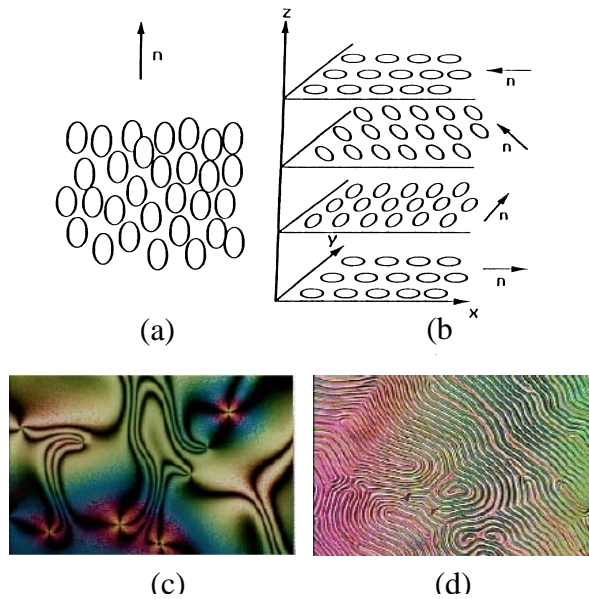
Gambar 1. Susunan Molekul pada fase : a. Kristal , b. Cair, c. Kristal Plastik, dan d. *Liquid Crystal*

a. Jenis-Jenis Liquid Crystal

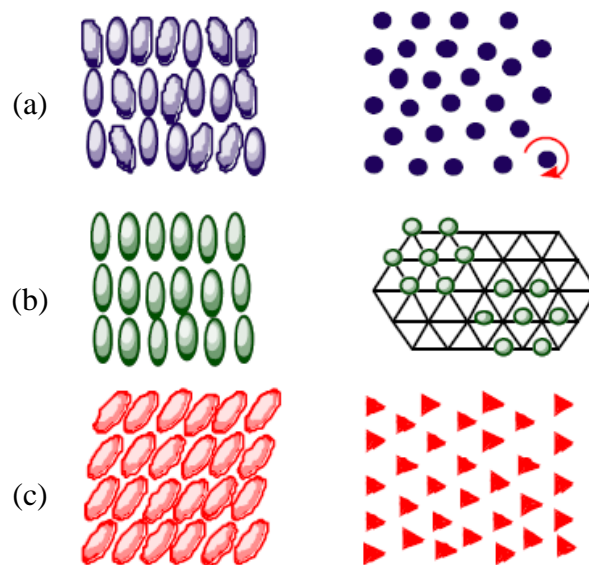
Liquid Crystal dapat dikelompokkan dengan beberapa macam cara. Pengelompokkan liquid crystal berdasarkan parameter fisis yang mengontrol keberadaannya dibedakan menjadi 3 jenis, yaitu : *termotropik*, *litoropik* dan *polimerik* (Khoo, 2007 :6). Liquid crystal termotropik adalah liquid crystal yang transisi fasenya dipengaruhi oleh suhu. Jenis ini paling banyak digunakan dan dikaji dibanding dua jenis lainnya. Litoropik adalah jenis liquid crystal yang keberadaannya dipengaruhi oleh konsentrasi larutan. Polimerik adalah liquid crystal yang mempunyai sifat-sifat polimer karena jenis ini tersusun dari rantai polimer dan mesogen (liquid crystal).

Liquid crystal termotropik dapat diklasifikasikan menjadi 3 macam, yaitu : *nematik*, *kolesterik* dan *smektik*. Nematik adalah jenis liquid crystal yang order posisinya random seperti fase cair, namun susunan molekul-molekulnya cenderung menuju arah tertentu atau dengan kata lain memiliki order orientasi. Kolesterik atau sering disebut *chiral nematik* tersusun dari liquid crystal nematik dengan sifat-sifat hampir sama dengan nematik, namun molekul-molekulnya cenderung membentuk heliks. Arah susunan molekul-molekul dan tekstur dari LC nematik dan LC kolesterik ditunjukkan pada Gambar 2.

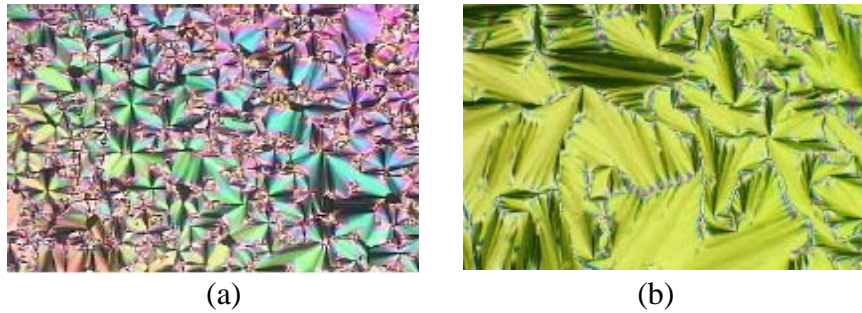
Liquid crystal smektik memiliki order posisi, tidak seperti nematik. Susunan molekul smektik A, smektik B dan smektik C ditunjukkan pada Gambar 3 dan tekstur smektik A dan smektik C ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 2. Susunan molekul pada : (a). nematik, (b). kolesterik dan tekstur pada : (c). nematik, dan (d). kolesterik

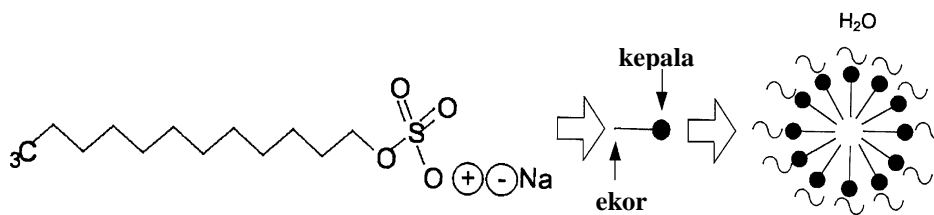


Gambar 3. Susunan molekul pada : (a). smektik A, (b). smektik B dan (c). Smektik C (Goodby).



Gambar 4. Tekstur LC pada tipe : (a). smektik A dan (c). Smektik C

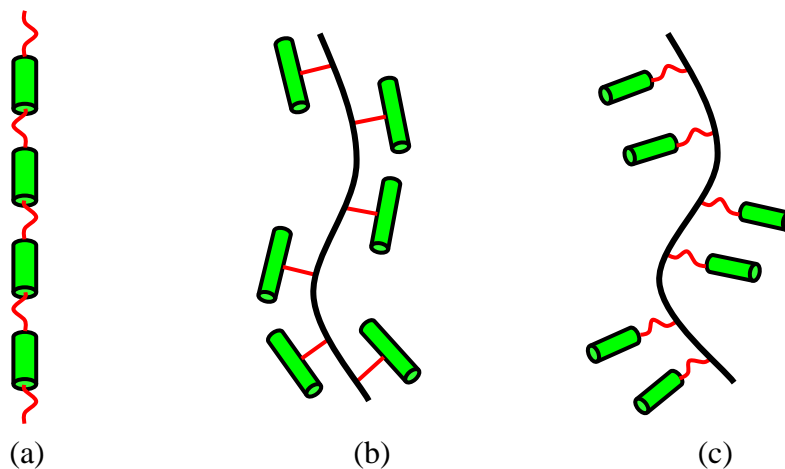
Liquid kristal litotropik mempunyai banyak jenis, diantaranya adalah : *sabun*, *deterjen* dan *lipida*. Jenis ini banyak dikaji dalam ilmu biologi. Gambar 4 menunjukkan contoh liquid crystal litotropik yakni *sodium dodecylsulfate* (sabun).



Gambar 5. Struktur kimia dan gambaran molekul sabun

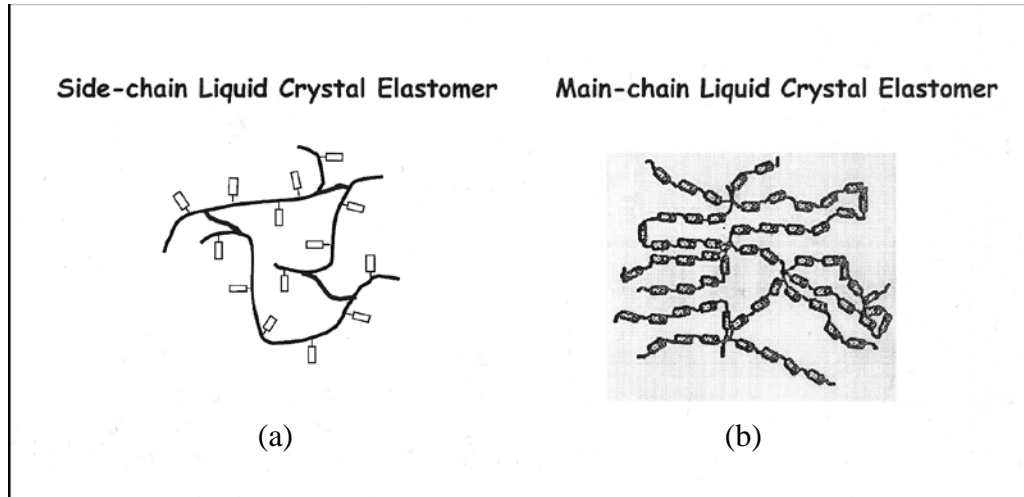
Liquid Crystal dan Polimer merupakan materi yang mempunyai sifat-sifat menakjubkan dan berbeda dari material biasa (padat, cair atau gas). Kombinasi antara liquid crystal dengan polimer menghasilkan materi baru yang disebut *liquid crystal polimer* (LCP). Liquid crystal polimer tersusun dari kelompok mesogen yang digabungkan pada rantai polimer. Jika kelompok mesogen digabungkan pada rantai utama polimer, maka jenis LCP ini disebut *main-chain* LCP (MCLCP) dan jika kelompok mesogen diletakkan di sisi rantai utama polimer, maka LCP tersebut dinamakan *side-group* LCP (SGLCP), seperti tampak pada Gambar 6 (Ferduzco, 2007 :7). Materi ini mempunyai sifat-sifat polimer di satu sisi dan di sisi lain mempunyai sifat-sifat liquid crystal.

Salah satu jenis *liquid crystal polimer* adalah Liquid Crystal Elastomer (LCE). LCE mempunyai sifat elastis yang merupakan bawaan dari polimer dan sifat orientasi yang merupakan sifat dari unsur liquid crystal. Ada dua macam LCE yaitu *Side-Chain Liquid Crystal Elastomer* (SCLCE) dan *Main-Chain Liquid Crystal Elastomer* (MCLCE) seperti ditunjukkan pada Gambar 7 (Pleiner, 2007 : 4).



Gambar 6. Skematik dari : (a). *main-chain* LCP, (b). *side-on* SGLCP dan (c). *end-on* SGLCP

Salah satu jenis *liquid crystal polimer* adalah Liquid Crystal Elastomer (LCE). LCE mempunyai sifat elastis yang merupakan bawaan dari polimer dan sifat orientasi yang merupakan sifat dari unsur liquid crystal. Ada dua macam LCE yaitu *Side-Chain Liquid Crystal Elastomer* (SCLCE) dan *Main-Chain Liquid Crystal Elastomer* (MCLCE) seperti ditunjukkan pada Gambar 7 (Pleiner, 2007 : 4).



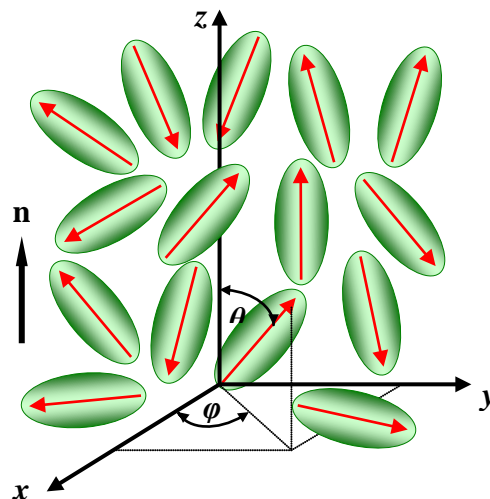
Gambar 7. Dua macam LCE : (a). Side-Chain Liquid Crystal Elastomer dan (b). Main-Chain Liquid Crystal Elastomer

b. Order Orientasi Liquid Crystal

Variabel yang sangat penting dalam nematik liquid crystal adalah order orientasi (*order parameter*) Q , yang menunjukkan arah susunan molekul. Nilai order parameter dapat digunakan untuk mengetahui secara kuantitatif derajat orientasi suatu liquid crystal dan dapat mempengaruhi sifat-sifat anisotropi suatu bahan, misalnya sifat *birefringence* atau anisotropi dielektrik (Ferduzco, 2007 :4). Order parameter di didefinisikan sebagai nilai harap polinomial Legendre orde dua (Wang dan Warner, 1986 : 2216), yaitu :

$$Q = \langle P_2(\cos \theta) \rangle = \left\langle \frac{3}{2} \cos^2 \theta - \frac{1}{2} \right\rangle \tag{1}$$

dengan θ adalah sudut antara sumbu molekul-individual dengan arah *director* \mathbf{n} , seperti tampak pada Gambar 8. Simbol bra-ket menunjukkan rerata untuk seluruh molekul.



Gambar 8. Orientasi mesogen di dalam fase nematik LCE

Jika mesogen berarah ke atas ($\theta = 0$) atau ke bawah ($\theta = \pi$) maka nilai $Q = 1$ menunjukkan bahwa materi dalam keadaan fase nematik penuh. Nilai $Q = 0$ menunjukkan bahwa LC dalam keadaan fase isotropik dengan orientasi random (tidak memiliki order orientasi, *disorder*). Jika mesogen arahnya tegak lurus \mathbf{n} ($\theta = \pi/2$), maka nilai $Q = -1/2$. Kecenderungan molekul-molekul nematik LC untuk memposisikan diri sepanjang *director* dikenal sebagai keadaan *anisotropi*, yang mempunyai sifat-sifat fisis sangat bervariasi tergantung pada arah pengukuran. Oleh karena itu semua parameter makroskopik didefinisikan dalam dua arah, yaitu sejajar (\parallel) dan tegak lurus (\perp) *director*. Sebagai contoh anisotropi diamagnetik $\chi_a = \chi_{\parallel} - \chi_{\perp}$, anisotropi dielektrik $\epsilon_a = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ dan anisotropi *birefringence* optik $\Delta n = n_{\parallel} - n_{\perp}$ (Yusril Yusuf, 2005 : 6).

Persamaan (1) adalah nilai skalar order parameter untuk keadaan liquid crystal yang mempunyai simetri rotasi atau silindris, namun jika simetri rotasi tidak terjadi, misalnya karena adanya molekul-molekul sisipan atau adanya interaksi intramolekuler, maka order parameter lebih umum dinyatakan dengan tensor (Khoo, 2007 : 23). Komponen tensor order parameter merupakan matriks diagonal dengan *trace*-nya bernilai nol seperti diungkapkan dalam persamaan (2) (de Gennes, 1993 : 77, Singh, 2000: 126, Chandrasekhar, 1992 :41).

$$Q = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}(q+s) & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2}(q-s) & 0 \\ 0 & 0 & q \end{pmatrix} \quad (2)$$

Berdasarkan persamaan (2), ada 3 keadaan yang berkaitan dengan nilai q dan s , yaitu: $q = s = 0$ untuk keadaan isotropik, $q \neq 0$ dan $s = 0$ untuk keadaan uniaksial, dan $q \neq 0$ dan $s \neq 0$ untuk keadaan biaksial. Uniaksial adalah fase nematik yang susunan molekul-molekulnya cenderung disepanjang *director* \hat{n} atau memiliki simetri rotasi. Jika simetri rotasi di sekitar *director* rusak, maka formasinya disebut biaksial. Nilai trace tensor order parameter (jumlah elemen-elemen diagonal matriksnya), baik untuk uniaksial maupun biaksial, bernilai nol ($\text{Tr}(Q) = 0$). Pada bagian ini yang ditinjau adalah keadaan uniaksial. Jadi untuk keadaan uniaksial, tensor order parameternya adalah :

$$Q = \begin{pmatrix} -\frac{1}{2}q & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{2}q & 0 \\ 0 & 0 & q \end{pmatrix} \quad (3)$$

c. Teori Landau-De Gennes Pada Transisi Fase Nematik-Isotropik Liquid Crystal

Liquid Crystal Nematik termasuk jenis liquid crystal yang banyak dikaji dan digunakan secara luas. Nematik merupakan contoh terbaik dari liquid crystal yang memiliki dua sifat alamiah, yaitu sifat fluiditas-cairan dan struktur kristal (Iam-Choon Khoo, 2007 : 36). Ada beberapa perbedaan antara fase nematik dan fase isotropik cair, yaitu nematik memiliki simetri yang lebih rendah daripada fase isotropik cair dan memiliki derajat keteraturan (*ordered*) lebih tinggi daripada fase isotropik cair. Nematik memiliki simetri sumbu (*axial symmetry*) dan isotropik cair memiliki simetri bola (*spherical symmetry*). Pada fase nematik, molekul-molekulnya dalam keadaan *terorder*, sedangkan pada fase isotropik cair keadaan molekul-molekulnya acak atau *disorder*. Hal ini berarti bahwa pada fase nematik, nilai order parameter $Q \neq 0$ dan pada fase isotropik nilai order parameter $Q = 0$.

Model Landau-de Gennes merupakan pengembangan teori Landau dengan menambahkan suku pangkat tiga order parameter pada ekspansi energi bebas di sekitar titik transisi. Jika energi bebas dinyatakan dengan G dan order parameter dinyatakan dengan Q , maka ekspansi energi bebas dalam pangkat Q sampai tingkat empat dinyatakan sebagai berikut :

$$G(T, P, Q) = G_0(T, P) + B(T - T_C)Q^2 + cQ^3 + dQ^4 \quad (5)$$

dengan $c < 0$ dan $d > 0$. Munculnya suku Q^3 , yang merupakan suku ganjil, menyebabkan keadaan di Q tidak sama dengan keadaan di $-Q$. Keadaan setimbang dicapai ketika $\frac{\partial G}{\partial \eta} = 0$ sehingga persamaan keadaannya menjadi :

$$2B(T - T_C)Q + 3cQ^2 + 4dQ^3 = 0$$

$$\left(2B(T - T_C) + 3cQ + 4dQ^2\right)Q = 0 \quad (6)$$

Penyelesaian dari persamaan (6) adalah :

$$Q = 0 \quad (7)$$

$$Q = \frac{-3c + \sqrt{9c^2 - 32Bd(T - T_C)}}{8d} \quad \text{dan} \quad (8)$$

$$Q = \frac{-3c - \sqrt{9c^2 - 32Bd(T - T_C)}}{8d} \quad (9)$$

Untuk keadaan akar real diperoleh :

$$T_+ = T_C + \frac{9c^2}{32Bd} \quad (10)$$

Jika $T > T_+$, maka hanya $Q = 0$ merupakan keadaan yang stabil. Pada $T < T_+$, ada keadaan metastabil yang terkait dengan $Q \neq 0$. Titik transisi fase order pertama diperoleh ketika $G - G_0 = 0$, yaitu :

$$T_t = T_C + \frac{c^2}{4Bd} \quad (11)$$

Transisi fase yang sesungguhnya terjadi pada suhu T_t dengan lonjakan order parameter yang besarnya dinyatakan dalam persamaan (12).

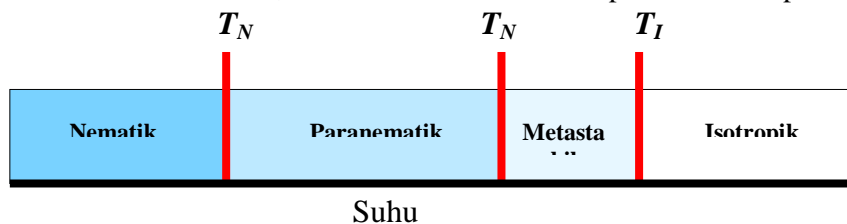
$$\Delta Q = \frac{-3c + \sqrt{9c^2 - 32Bd(T_t - T_C)}}{8d} = \frac{-3c + \sqrt{9c^2 - 32Bd\left(T_C + \frac{c^2}{4Bd} - T_C\right)}}{8d}$$

$$\Delta Q = -\frac{c}{2d} \quad (12)$$

Berdasarkan uraian diatas ada 3 nilai suhu yang menjadi titik batas keadaan yaitu T_C , T_t dan T_+ dengan urutan nilai : $T_C < T_t < T_+$. Adanya 3 titik batas tersebut berarti ada 4 keadaan yang terjadi, yaitu:

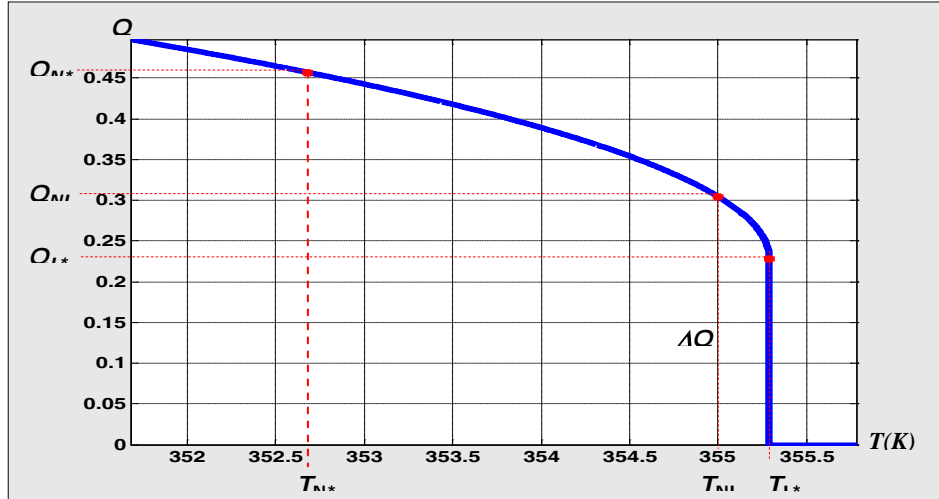
- 1). Jika $T > T_+$, maka materi dalam keadaan stabil pada fase isotropik penuh
- 2). Jika $T_+ > T > T_t$, maka materi dalam keadaan metastabil antara fase nematik-isotropik, namun keadaan isotropik lebih dominan atau disebut keadaan *metastabil nematik*
- 3). Jika $T_t > T > T_C$, maka materi dalam keadaan metastabil antara fase nematik-isotropik, namun keadaan nematik lebih dominan atau disebut keadaan *paranematik*
- 4). Jika $T < T_C$, maka materi dalam keadaan stabil pada fase nematik penuh

Titik-titik batas T_C , T_t dan T_p selanjutnya diberi simbol T_{N^*} untuk T_C , T_{NI} untuk T_t dan T_{I^*} untuk T_p . Berdasarkan titik-titik batas tersebut, transisi fase nematik-isotropik dilukiskan pada Gambar 9.



Gambar 9. Keadaan-keadaan pada transisi fase nematik-isotropik

Nilai order parameter bergantung pada variabel suhu T dan konstanta-konstanta B , c , d , dan T_{NI} . Untuk nilai-nilai konstanta $B = 42000 \text{ J}/(\text{m}^3\text{K})$, $c = -640000 \text{ J}/\text{m}^3$, $d = 1050000 \text{ J}/\text{m}^3$, dan $T_{NI} = 355 \text{ K}$ serta penggunaan persamaan (8), hubungan antara order parameter dengan suhu ditampilkan pada Gambar 10. Berdasarkan persamaan (11) dan (10), nilai $T_{N^*} = 352.6780 \text{ K}$ nilai $T_{I^*} = 355.2902 \text{ K}$.



Gambar 10. Hubungan antara order parameter dengan suhu pada transisi fase nematik-isotropik liquid crystal untuk $B = 42000 \text{ J}/(\text{m}^3\text{K})$, $c = -640000 \text{ J}/\text{m}^3$, $d = 1050000 \text{ J}/\text{m}^3$, dan $T_{NI} = 355 \text{ K}$

Rentang suhu pada fase *paranematik* adalah :

$$\Delta T_{N^*} = T_{NI} - T_{N^*} = 355 - 352.6780$$

$$\Delta T_{N^*} = 2.3220 \text{ K}$$

sedangkan rentang suhu pada fase *metastabil nematik* adalah :

$$\Delta T_{I^*} = T_{I^*} - T_{NI} = 355.2902 - 355$$

$$\Delta T_{I^*} = 0.2902 \text{ K}$$

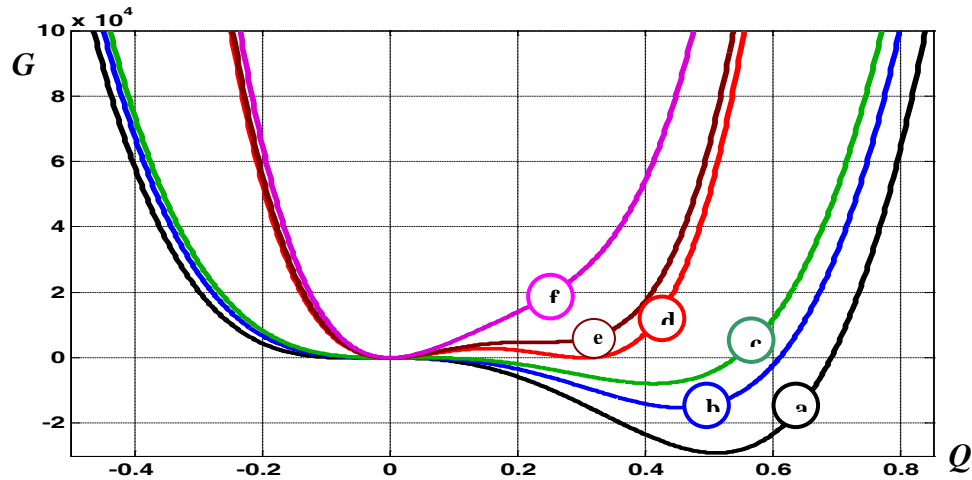
sehingga rentang suhu yang diperlukan untuk mengubah dari fase isotropik penuh ke fase nematik penuh tidak diperlukan perubahan suhu yang tinggi, yaitu sebesar 2,5506 K.

Nilai lonjakan order parameter ΔQ pada titik transisi T_{NI} dihitung berdasarkan persamaan (12), yaitu :

$$\Delta Q = Q_{NI} = -\frac{c}{2d} = -\frac{-640.000}{2(1.050.000)} = 0,3048$$

Nilai tersebut tampak di Gambar 10 berada sedikit di atas nilai 0,3. Nilai order parameter di titik batas T_{N^*} dan T_{I^*} masing-masing adalah 0,4571 dan 0,2286, sedangkan di atas T_{I^*} nilai Q adalah nol. Jelas berdasarkan gambar tersebut bahwa transisi fase nematik-isotropik liquid crystal merupakan transisi fase order pertama (*first order phase transition*).

Jika nilai order parameter Q telah diperoleh, maka nilai energi bebas $G(T,P,Q)$ dapat dihitung berdasarkan persamaan (5). Hubungan antara energi bebas dengan order parameter untuk $G_0(T,P) = 0$ dan berbagai variasi suhu T , ditunjukkan pada Gambar 11.



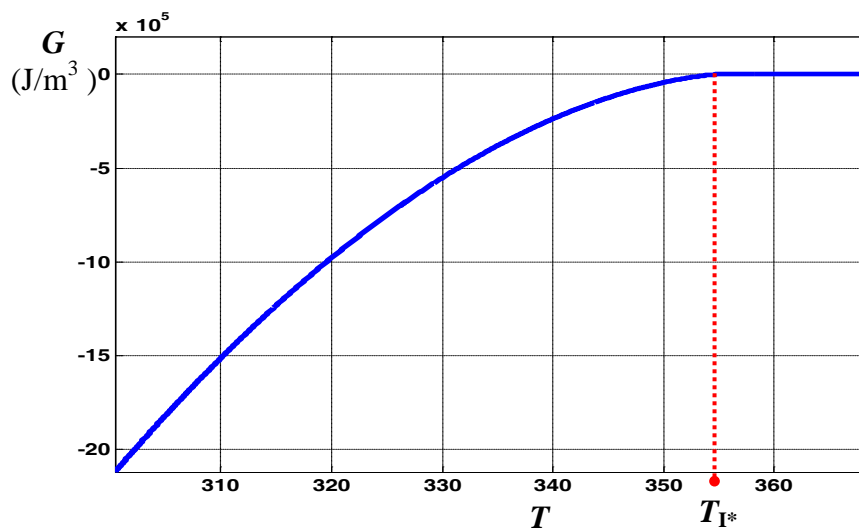
Gambar 11. Energi bebas sebagai fungsi order parameter dalam Model Landau- de Gennes untuk: a. $T < T_{N^*}$, b. $T = T_{N^*}$, c. $T_{N^*} < T < T_{NI}$, d. $T = T_{NI}$, e. $T = T_{I^*}$ dan f. $T > T_{I^*}$

Gambar 11 menunjukkan hubungan antara energi bebas dengan order parameter untuk berbagai variasi suhu. Masing-masing gambar dijelaskan sebagai berikut :

- 1). Gambar 11.(a) untuk $T < T_{N^*}$ dengan $T = 351,2848$ K. Pada keadaan ini nilai rapat energi bebas bervariasi bergantung pada order parameter. Nilai G minimum pada keadaan tersebut adalah $-29.083,136$ J/m³ dan nilai ini bersesuaian dengan nilai order parameter $Q = 0,51141$. Ini berarti bahwa pada fase nematik penuh dengan suhu $T = 351,2848$ K, keadaan stabil terjadi pada $G = -29.083,136$ J/m³ dan $Q = 0,51141$.
- 2). Gambar 11.(b) untuk $T = T_{N^*} = 352.6780$ K. Keadaan ini merupakan batas antara fase nematik penuh dengan fase paranematik. Energi minimum terjadi pada $G = -15.285,3541$ J/m³ dan order parameter $Q = 0,4573$.
- 3). Gambar 11.(c) untuk $T_{N^*} < T < T_{NI}$ dengan $T = 354,5356$ K. Pada suhu ini, materi dalam keadaan paranematik. Nilai rapat energi bebas minimum terjadi pada $G = -2.126,4131$ J/m³ dan order parameter $Q = 0,3509$.
- 4). Gambar 11.(d) untuk $T = T_{NI} = 355$ K. Keadaan ini merupakan batas antara fase paranematik dengan fase metastabil nematik atau titik ini merupakan titik transisi sesungguhnya. Energi minimum terjadi pada $G = 0$ J/m³ dan order parameter $Q = 0,3048$.
- 5). Gambar 11.(d) untuk $T = T_{I^*} = 355,2902$ K. Gambar ini menunjukkan keadaan energi bebas pada titik transisi antara keadaan metastabil nematik dan isotropik. Pada gambar tersebut terdapat titik belok yang berkaitan dengan $Q = 0,2286$ dan energi $G = 955,3353$ J/m³. Energi ini menunjukkan titik metastabil fase metastabil nematik, di atas energi ini materi dalam fase isotropik penuh.
- 6). Gambar 11.(f) untuk $T > T_{I^*}$ dengan $T = 356,3932$ K. Keadaan tersebut menunjukkan bahwa energi minimum hanya terjadi pada $G = 0$, yang berarti materi dalam keadaan fase isotropik penuh.

Nilai energi bebas sebagai fungsi suhu dan order parameter dapat dihitung dengan persamaan (5) dan persamaan (8). Jika nilai-nilai konstanta diambil seperti tersebut di atas ($B = 42000$ J/(m³K), $c = -640000$ J/m³, $d = 1050000$ J/m³, dan $T_{NI} = 355$ K), maka hubungan antara energi bebas $G(T,P,Q)$ dengan suhu T untuk $G_0(T,P) = 0$ ditunjukkan pada Gambar 12. Gambar tersebut menunjukkan bahwa di atas suhu T_{I^*} energi bebas bernilai sama dengan $G_0(T,P)$ yaitu sama dengan nol. Hal ini sesuai dengan persamaan (5) karena di atas suhu T_{I^*} materi berada dalam keadaan fase

isotropik penuh sehingga nilai order parameter $Q = 0$.



Gambar 12. Grafik hubungan antara energi bebas dengan suhu pada Model Landau-de Gennes

KESIMPULAN

1. Pada transisi nematik-isotropik liquid kristal, ada 3 suhu batas keadaan yaitu T_N^* , T_{NI} dan T_I^* dengan $T_N^* < T_{NI} < T_I^*$ yang menyebabkan ada 4 keadaan yakni: pada suhu $T < T_N^*$ materi dalam keadaan fase nematik penuh, pada suhu $T_N^* < T < T_{NI}$ materi dalam keadaan *paranematik* (fase nematik lebih dominan), pada suhu $T_{NI} < T < T_I^*$, materi dalam keadaan *metastabil nematik* (fase isotropik lebih dominan) dan pada suhu $T > T_I^*$ materi dalam keadaan fase isotropik penuh, rentang suhu dalam keadaan *paranematik* dan *metastabil nematik* bernilai kecil
2. Hubungan antara order parameter dengan suhu menunjukkan bahwa jika suhu dinaikkan, maka nilai order parameter akan turun secara kontinyu sampai suhu batas atas T_I^* dan kemudian turun tajam mencapai nol, di atas suhu T_I^* nilai orde paramater adalah nol
3. Hubungan antara energi bebas dengan suhu pada titik transisi bersifat kontinyu
4. Hubungan antara energi bebas dengan order parameter tidak bersifat linear, nilai minimum energi bebas pada keadaan transisi berkaitan dengan order parameter $\eta = 0$ atau $\eta \neq 0$ bergantung pada suhu.

DAFTAR PUSTAKA

- Andrienko, D. 2006. **Introduction To Liquid Crystals**. Bad Marienberg : International Max Planck Research School. (http://www.mpip-mainz.mpg.de/_andrienk/lectures/IMPRS/liquid_crystals.pdf)
- Chandrasekhar, S. 1992. **Liquid Crystals**, 2nd Edition. Cambridge : Cambridge University Press.
- De Gennes, P.G. dan Prost. 1993. **The Physics Of Liquid Crystals**, 2nd Edition. New York : Oxford University Press.
- Ferduzco, R. 2007. **Self-Assembled Liquid Crystal Polymer Gels**. Pasadena : California Institute of Technology
- Goodby, J.W. 2007. **Liquid Crystal Phase Transitions**, *Differential Scanning Calorimetry and Optical Microscopy*. The York Liquid Crystal Group.
- Khoo, I.C. 2007. **Liquid Crystals**, *Second Edition*. Hoboken : John Wiley & Sons.

- Ostapenko, T., Wiant, D.B., Sprunt, S.N, Jakli, A. dan Gleeson, J.T. 2008. **Magnetic-Field Induced Isotropic to Nematic Liquid Crystal Phase Transition.**
http://www.e-lc.org/docs/2008_10_15_17_04_24
- Pleiner, H. 2007. **Introduction to Liquid Crystalline Elastomers.** Mainz : Max Planck Institute for Polymer Research
- Singh, S.. 2000. **Phase Transitions In Liquid Crystals.** Amsterdam : Elsevier Science B.V.
- Syah, H.J. 2007. **Engineered Interfaces for Liquid Crystal Technology.** Drexel : Faculty Of Drexel University.
(http://www.e-lc.org/dissertations/docs/2007_09_07_10_35_41)
- Yalçın, A.G. 2005. *Liquid Crystals.* Bogaziçi University.
(<http://www.mslab.boun.edu.tr/LiquidCrystals.pdf>)
- Yusuf, Y. 2005. *Swelling Dynamics and Electromechanical Effects of Liquid Crystal Elastomers as An Artificial Muscle.* Kyushu : Kyushu University.
- Wang, X.J. dan Warner, M. 1986. **Theory of Nematic Backbone Polymer Phases and Conformations.** Great Britain : J. Phys. A : Math.Gen. 19. 2215-2227