

## **PENENTUAN ENERGI DAN FINESSE DARI RESONANSI WHISPERING GALERY MODE DALAM MICROSPEHRE**

**Zakarias Seba Ngara**

*Jurusan Fisika, Fakultas Sains dan Teknik, Universitas Nusa Cendana, Jl. Adisucipto Penfui, Kupang, Nusa Tenggara Timur, Indonesia*  
Email: zakariasngara@staf.undana.ac.id

### **Abstrak**

*Kajian ini menyajikan penentuan energi WGM, faktor kualitas (faktor-Q) dan finesse dari spektrum resonansi whispering gallery mode (WGM) dalam mikrospehere F8tpy. Dalam penelitian ini, data yang digunakan data sekunder yang diambil disertasi dan beberapa jurnal terkait. Spektrum WGM dalam microsphere sebagai data sekunder utama diambil referensi (3). Sedangkan perumusan energi WGM antara transversal listrik (TE) dan transversal (TM) didasarkan pada referensi (6). Berdasarkan analisis spektrum WGM dalam microsphere F8tpy dengan diameter (d) 4.53  $\mu\text{m}$ , energi WGM rata-rata dan faktor-Q (Q-factor) masing-masing adalah 2,48 eV dan 264.2. Sedangkan nilai finesse adalah 5,28. Energi WGM sebanding lurus dengan nilai momentum sudut. Untuk faktor-Q, semakin besar diameter mikrosphere F8tpy, semakin tinggi nilai faktor-Q dari microsphere F8tpy. Ini berarti bahwa semakin tinggi kinerja dan efisien mikrosphere F8tpy ketika material tersebut digunakan sebagai material aktif dalam piranti sensor, laser dan piranti-piranti photonik lainnya. Hasil-hasil penelitian ini menunjukkan bahwa mikrosphere F8tpy berpotensi digunakan sebagai material aktif dalam mikrodivais optik.*

**Kata kunci:** Energi; WGM, Faktor-Q; Finesse; Mikrosphere

### **Abstract**

**(Title: The Determination Of Energy And Finesse Of Whispering Gallery Mode Resonance In The Microsphere).** *This study presents the determination of WGM energy, Q-factor and finesse of whispering gallery mode (WGM) spectrum in the F8tpy microsphere. In this research, the used datas are secondary datas which were taken from dissertation and several related papers. The WGM spectrum in the microsphere as the main secondary data was derived from ref.3. Whereas the formulae to find WGM energy between transversal electric (TE) and transversal magnetic (TM) was realized from ref.6. Based on the analysis of WGM spectrum in the F8tpy microsphere with diameter (d) of 4.54  $\mu\text{m}$ , the average WGM energy and Q-factor are 2.48eV and 264.2, respectively. Whereas the finesse value is 5.28. The WGM Energy is linear proportional to the angular momentum number. For Q-factor, the bigger the diameter of F8tpy microsphere, the higher the Q-factor of F8tpy microsphere. This means that the higher performance and efficiency of F8tpy microsphere when it was used as an active material in the device of laser, sensor, and other photonic devices. These research results display that F8tpy microsphere has potential to be used as an active material in the optical microdevices.*

**Key words:** Energy; WGM; Q-factor; Finesse; Microsphere

## Pendahuluan

Sejak ditemukan peristiwa resonansi whispering gallery mode (WGM) pertama kali oleh Lord Rayleigh in 1910[1,2], kajian-kajian peristiwa resonansi WGM dalam berbagai microresonator dan aplikasinya telah berkembang pesat [3]. Lord Rayleigh menginvestigasi bagaimana gelombang bunyi merambat secara efisien sepanjang dinding bagian dalam gereja katedral santo Paul di kota London. Dia menjelaskan bahwa gelombang bunyi hanya merambat bagian dalam dari dinding kuba pada permukaan kuba yang berbentuk melengkung. Hasil-hasil kajiannya telah dipublikasikan sebagai problem WGM[1,4]. Resonansi WGM merupakan suatu mekanisme untuk mengurung (*confinement*) cahaya dalam mikroresonator ketika cahaya merambat sepanjang keliling dari mikroresonator melalui proses pemantulan internal total (*total internal reflection*)[5].

Saat ini, kajian peristiwa resonansi WGM dalam berbagai bentuk geometri mikroresonator optik dari material-material organik dan aplikasinya dalam berbagai kehidupan manusia telah berkembang pesat. Jika sebuah mikroresonator optik dengan bentuk geometri seperti mikrosphere, persegi, persegi panjang, selinder, heksagonal, cincing, mikrodisk, dan lain-lain dapat mendemonstrasikan WGM, mikroresonator-mikroresonator tersebut memiliki aplikasi yang luas dalam berbagai kehidupan manusia dengan faktor kualitas (*quality factor*, *Q-factor*) yang tinggi dan mode volume yang kecil[6]. Sejauh ini, peristiwa resonansi WGM telah diaplikasikan pada *cavity quantum electrodynamics* (QED)[7], mikrolaser[8,9] sensor[2,10–12], optik nonlinear[13,14], komunikasi optik [14] dan piranti-piranti optik lainnya.

Dalam kajian ini, peristiwa resonansi WGM didemonstrasikan dalam mikrosphere dari material polimer besar (*large polymer*) yang mengandung fluorene-terpyridine, yaitu poly[(9,9'-dioctyl-9H-fluoren-2,7-yl)-5,5'-(2,2':6',2''-terpyridine (F8tpy). Pemilihan F8tpy ini karena mengandung polyfluorene (PF) yang memancarkan warna emisi biru dan terpyridine (tpy) yang memiliki tiga atom nitrogen yang memungkinkan polimer besar ini dapat bereaksi dengan logam [3,15]. Material polimer F8tpy memiliki struktur amorphous sehingga diharapkan dalam agregasi

partikelnya (*self-assembly*) membentuk mikrosphere sehingga peristiwa resonansi WGM dapat diamati. Berdasarkan spektrum WGM suatu material, beberapa parameter dapat ditentukan seperti bilangan momentum sudut, indeks bias, factor-*Q*, Finesse, energi WGM antara transversal listrik (TE) dan transversal magnetik (TM), dan lain-lain. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah kajian kelayakan mikrosphere F8tpy sebagai material aktif dalam mikrodevais optik melalui penentuan energi WGM, factor-*Q*, dan finesse.

Agregasi F8tpy dalam bentuk mikrosphere menghasilkan nilai energi WGM, faktor-*Q* dan finesse masing-masing adalah 2,48 eV, 264,2 dan 5,28. Hasil-hasil penelitian ini menunjukkan bahwa mikrosphere F8tpy berpotensi sebagai material aktif dalam mikrodivais optik.

## Dasar Teori

### Polimer F8tpy dan WGM

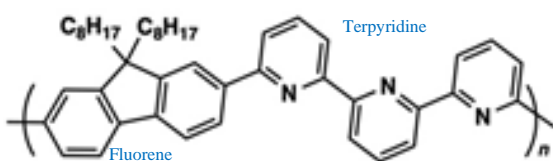
Dalam kajian ini, polimer besar (*makromolekul*) yang dipilih untuk menampilkan resonansi WGM adalah F8tpy dengan struktur molekulnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1[3,15,16]. F8tpy mengandung PF dan tpy. PF ini memancarkan warna emisi biru. Sedangkan tpy memiliki tiga atom nitrogen yang memungkinkan polymer ini dapat bereaksi dengan logam [15] dan atau dapat diprotonasi menggunakan asam[16]. Selain itu, pemilihan F8tpy karena F8tpy memiliki struktur amorphous[3] sehingga diharapkan dalam agregasi partikelnya membentuk mikroresonator berbentuk mikrosphere dan peristiwa resonansi WGM dapat diamati. WGM merupakan suatu mekanisme untuk mengurung cahaya dalam mikroresonator ketika cahaya merambat sepanjang keliling dari mikroresonator melalui proses pemantulan internal total (*total internal reflection*)[5]. Ada beberapa bentuk geometri mikroresonator seperti mikrosphere, mikrodisk, hexagonal, dan lain-lain. Dalam mikrosphere, cahaya terjebak (*trapped*) oleh pemantulan total di permukaan mikrosphere[9]. Pemantulan total dapat terjadi a) jika sudut datang lebih besar dari sudut kritis, dan b) sinar datang dari medium berindeks bias besar ke medium berindeks bias kecil. Untuk mikroresonator yang berbentuk mikrosphere, persamaan dasar yang dipenuhi untuk mendemonstrasikan WGM disajikan dalam Pers.(1), yaitu [5,15]

$$\pi \eta d = l \lambda \quad (1)$$

dengan  $d$ ,  $\eta$ ,  $l$ , dan  $(\lambda)$  masing-masing adalah diameter mikrosphere, indeks bias, bilangan momentum sudut, dan panjang gelombang.

Berdasarkan Pers.(1), resonansi WGM bergantung pada diameter mikrosphere, indeks bias dan panjang gelombang resonansi. Semakin besar diameter suatu mikrosphere, semakin tinggi pengurangan cahaya dan jumlah Mode TE dan TM semakin banyak serta tampilan spektrum WGM semakin baik dan jelas. Akibatnya semakin tinggi nilai factor- $Q$ . Perubahan panjang gelombang resonansi sebagai akibat perubahan indeks bias medium berguna untuk penerapan WGM sebagai sensor, laser, dan lain-lain. Tantangan terbesar dalam penelitian peristiwa WGM adalah sulitnya memperoleh bentuk geometri dari microresonator yang baik dan permukaannya yang halus [5]. Oleh karena itu, metode untuk memperoleh agregasi partikel (*self-assembly*) memiliki pengaruh yang signifikan untuk mendapatkan resonansi WGM yang baik dengan faktor- $Q$  yang tinggi. Bentuk geometri dan ukuran mikroresonator merupakan dua parameter utama yang mempengaruhi spektrum WGM [17,18] ketika bentuk geometrinya bagus (*well-defined*) dan permukaannya halus, microresonator akan menghasilkan profil spektrum WGM yang baik, faktor- $Q$  yang tinggi dan daya energi ambangnya (*threshold energy power*) rendah

Ada beberapa parameter yang diperoleh berdasarkan spektrum WGM suatu microresonator, antara lain faktor- $Q$ , *Free spectral range* (FSR), indeks bias, finesse, energi ambang (*threshold energy*), Energi WGM, dan lain-lain. Pada dasarnya, spektrum WGM terdiri atas mode TE dan TM seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2 [3]. Intensitas puncak TE lebih tinggi daripada intensitas puncak TM karena mode TE memiliki mode volume yang lebih kecil dibandingkan dengan mode TM.



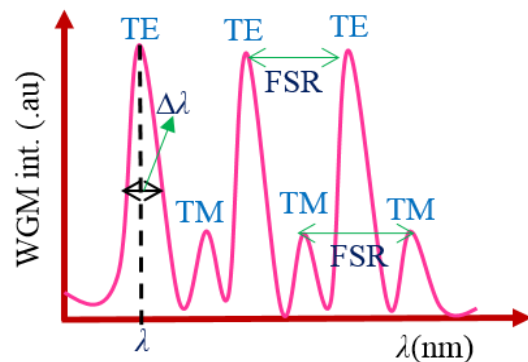
Gambar 1 Struktur molekul F8tpy [3]

### Faktor- $Q$

Faktor- $Q$  merupakan ukuran kemampuan sebuah mikroresonator untuk menyimpan energi dalam mikroresonator[4,19]. Ini berarti bahwa faktor- $Q$  yang tinggi menyajikan pengukuran kehilangan optik yang rendah melalui pengurangan cahaya yang efisien dalam mikroresonator. Oleh karena itu, faktor- $Q$  adalah faktor yang menjelaskan mikroresonator laser [20] di mana semakin tinggi nilai factor- $Q$ , semakin tinggi pengurangan cahaya dalam mikroresonator atau semakin kecilnya kehilangan energi. Berdasarkan Gambar 2[3], faktor- $Q$  didefinisikan sebagai perbandingan antara panjang gelombang resonansi dengan lebar puncak TE ( $\Delta\lambda$ ) seperti yang dinyatakan dalam Pers.(2), yaitu

$$Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \quad (2)$$

Berdasarkan Pers.(2), nilai tertinggi dari  $Q$  bersesuaian dengan dengan lebar terkecil dari puncak TE.



Gambar 2. TE and TM modes in WGM resonance spectrum [3]

### Waktu paruh (*life time*) photon

Waktu paruh (*lifetime*,  $\tau$ ) sebuah photon adalah waktu yang diperlukan oleh sebuah photon cahaya untuk meluruhkan energinya sebesar  $1/e$  dari nilai awalnya. Waktu paruh ini didefinisikan sebagai perbandingan antara faktor- $Q$  dengan frekuensi sudut ( $\omega$ ). Secara matematis, dapat ditulis [1,21]

$$\tau = \frac{Q}{\omega} \quad (3)$$

Berdasarkan Pers.(3), semakin besar faktor- $Q$ , semakin besar waktu paruh. Waktu bolak-balik (*round- trip time*,  $\tau_r$ ) sebuah photon

sebagai fungsi dari diameter mikrosphere diberikan dalam Pers.(4), yaitu

$$\tau_r = \frac{\pi \eta d}{c} \quad (4)$$

Dengan menggabungkan Pers.(3) dan Pers.(4), diperoleh nilai faktor-Q sebagai fungsi diameter mikrosphere, indeks bias dan panjang gelombang resonansi, yaitu [3]

$$Q = \frac{2\pi^2 \eta d}{\lambda} \quad (5)$$

dengan demikian, semakin besar nilai diameter suatu mikrosphere, semakin besar nilai faktor-Q dan waktu hidupnya.

### Free spectral range (FSR)

Spektrum WGM dicirikan oleh adanya polarisasi mode TE dan TM. Polarisasi mode TE terjadi ketika medan listrik dan medan magnet tegak lurus dan sejajar terhadap permukaan mikrosphere. Sedangkan polarisasi mode TM terjadi ketika medan listrik dan medan magnet sejajar dan tegak lurus terhadap permukaan mikrosphere[22]. Nilai FSR didefinisikan sebagai jarak antara dua mode TE atau TM yang berturutan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Nilai FSR sebagai fungsi panjang gelombang, diameter mikrosphere dan indeks bias disajikan dalam Pers.(6), yaitu

$$FSR = \frac{d\lambda}{dl} = \frac{\lambda^2}{\pi \eta d} \quad (6)$$

### Finesse

Finesse sebuah mikroresonator optik merupakan perbandingan antara FSR dengan lebar puncak mode TE atau TM[23,24]. Secara matematis, dapat ditulis

$$F = \frac{FSR}{\Delta\lambda} \quad (7)$$

Pers.(6) dengan sedikit modifikasi dan dimasukkan ke Pers.(7), diperoleh

$$F = \frac{\lambda^2}{\pi \eta \Delta\lambda d} \quad (8)$$

Pers.(1) dan Pers.(2) dimasukkan ke Pers.(8), diperoleh nilai finesse sebagai fungsi dari faktor-Q dan momentum sudut ( $l$ ), yaitu

$$F = \frac{Q}{l} \quad (9)$$

dengan  $Q = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  dan  $l = \frac{\pi \eta d}{\lambda}$ .

Dengan demikian, finesse menyajikan kuantitas kehilangan cahaya dan efisiensi penyimpanan energi dalam mikroresonator.

### Energi WGM

Kebergantungan energi WGM pada mode TE dan TM adalah meningkat dengan mengecilnya mode ruang TE dan TM. Kebergantungan energi WGM pada mode TE dan TM adalah cukup sulit untuk diinterpretasikan karena spektrum WGM mengandung sejumlah mode TE dan TM. Energi WGM ( $E_l$ ) sebagai sebagai fungsi bilangan momentum sudut, indeks bias dan diameter mikroresonator dapat ditulis [6]

$$E_l = \frac{hcl}{\eta \pi d} \quad (10)$$

dengan  $h$ , dan  $c$  masing-masing adalah tetapan plank dan kecepatan cahaya dalam ruang hampa.

Berdasarkan Pers.(10), Energi WGM suatu mikroresonator berbanding terbalik dengan indeks biasnya. Indeks bias ( $\eta$ ) suatu material berkaitan dengan kemampuan suatu medium untuk membiaskan cahaya dalam medium tersebut. Secara eksperimen, nilai indeks bias suatu material dapat diukur secara langsung menggunakan spektroskopi elipsometri (*ellipsometry spectroscopy*). Hal yang menarik adalah, indeks bias suatu material juga dapat ditentukan dari analisis spektrum WGM dengan menggunakan Pers.(11), yaitu[3,15]

$$\lambda^{-1} = \frac{1}{\pi \eta d} l \quad (11)$$

Dengan membuat grafik antara  $\lambda^{-1}$  dan  $l$ , nilai indeks bias dapat ditentukan, yaitu

$$\eta = \frac{1}{\pi ad} \quad (12)$$

dengan  $a$  adalah gradien grafik dari  $\lambda^{-1}$  terhadap  $l$ .

### Metode penelitian

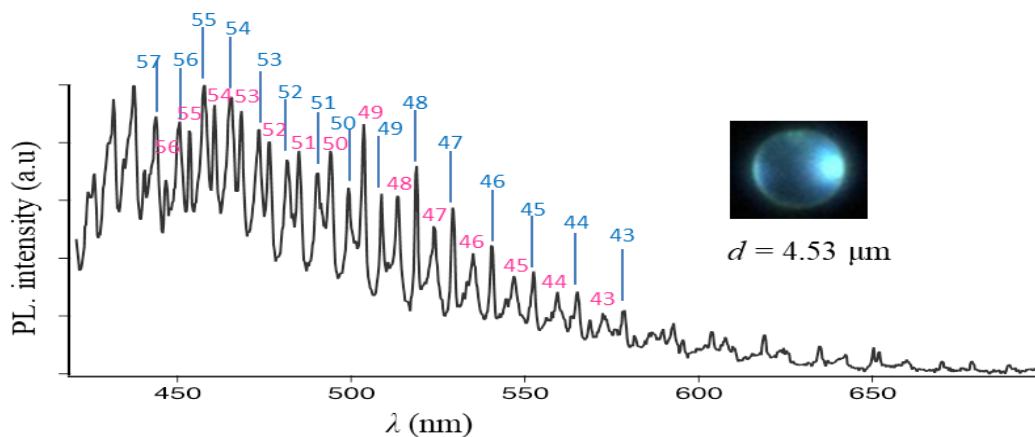
Dalam kajian ini, data-data yang digunakan adalah data sekunder seperti spektrum WGM dan mikrosphere dari F8tpy. Parameter utama yang ditentukan adalah energi WGM (Pers.(10), faktor-Q (Pers.(2) dan Finesse pada Pers.(9).

### Hasil dan Pembahasan

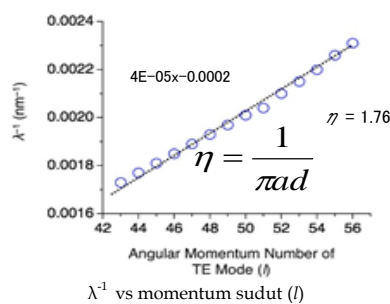
Dalam dasar teori telah dijelaskan bahwa pemilihan F8tpy karena F8tpy memiliki

struktur amorfus sehingga agregasi partikelnya membentuk mikrosphere yang memungkinkan peristiwa WGM dapat diamati dalam mikrosphere F8tpy. Selain itu, F8tpy memancarkan warna biru dan mengandung atom nitrogen yang memungkinkan F8tpy dapat direaksikan dengan logam atau dapat diprotonasi menggunakan asam. Mikrosphere F8tpy difabrikasi menggunakan metode difusi uap (*vapour diffusion method*) [3,15]. Gambar 3 menunjukkan spektrum WGM dalam mikrosphere F8tpy dengan puncak TE (bilangan momentum sudut berwarna biru) dan TM (bilangan momentum sudut berwarna oranye) [3,15]. Sisipan (*inset*) pada Gambar 3 merupakan mikrosphere dari F8tpy dengan

diameter 4,53  $\mu\text{m}$ . Mikrosphere F8tpy memancarkan warna biru karena F8tpy mengandung PF yang memancarkan warna biru. Spektrum WGM ini diperoleh dengan panjang gelombang eksitasi 355 nm. Berdasarkan Gambar 3, sebagian besar spektrum WGM dari mikrosphere F8tpy berada dalam jangkauan 370 – 500 nm. Hal ini sesuai dengan warna emisi mikrosphere F8tpy, yaitu warna emisi biru. Dalam spektrum WGM F8tpy terlihat bahwa intensitas TE lebih tinggi daripada intensitas TM karena mode TE memiliki mode volume yang lebih kecil dibandingkan dengan mode TM. Puncak-puncak TE dan TM ini terbentuk karena adanya pemantulan total dalam mikrosphere [6].



Gambar 3. Spektrum WGM dalam mikrosphere F8tpy ( $d = 4.53 \mu\text{m}$ ), yang mengandung puncak TE (blue) dan TM (oranye). Inset pada Gambar 3: mikrosphere F8tpy dengan  $d = 4,53 \mu\text{m}$  [3]



Gambar 4.  $\lambda^{-1}$  vs momentum sudut ( $l$ )

Gambar 4 diperoleh menggunakan Pers.(11) dengan gradien grafik ( $a$ ) bernilai  $4 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ . Dengan menggunakan Pers.(12) dan nilai gradien grafik serta diameter mikrosphere sebesar 4,53  $\mu\text{m}$ , nilai indeks bias mikrosphere F8tpy adalah 1,76. Nilai ini sesuai dengan hasil

pengukuran langsung menggunakan spektroskopi ellipsometri sebesar 1,72 [3,15].

Dengan menggunakan Pers.(10) dan  $h = 6,63 \times 10^{-33} \text{ J/K}$ ,  $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ ,  $\eta = 1,76$  dan  $d = 4,53 \mu\text{m}$ , nilai energi WGM sebagai fungsi bilangan momentum sudut adalah

$$E_l = \frac{hcl}{\eta\pi d} = 49,69l \text{ eV} \quad (13)$$

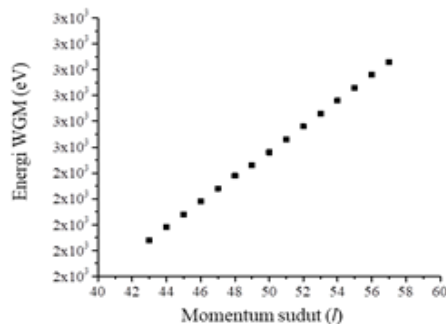
Gambar 5 diperoleh dengan menggunakan data Tabel 1 dan Pers.(13). Berdasarkan Gambar 5, Nilai energi WGM sebanding lurus dengan momentum sudut.

Artinya semakin besar nilai momentum sudut, nilai energi WGM juga semakin besar. Berdasarkan Tabel 1, nilai rata-rata energi WGM adalah 2,48 eV. Dengan menggunakan Pers.(4), Waktu bolak-balik (*round-trip time*,  $\tau_r$ ) sebuah photon dalam mikrosphere dengan  $d$

= 4.53  $\mu\text{m}$  dan indeks bias 1,76 adalah 8,34 x 10<sup>-14</sup> sekon.

Tabel 1. Nilai energi WGM berdasarkan nilai momentum sudutnya untuk TE

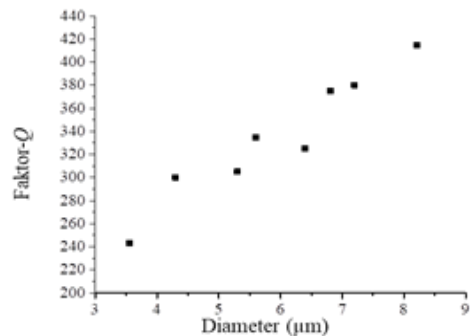
No	Bilangan Momentum sudut	Energi WGM (eV) x 10 <sup>3</sup>
1	43	2,14
2	44	2,19
3	45	2,24
4	46	2,29
5	47	2,34
6	48	2,39
7	49	2,43
8	50	2,48
9	51	2,53
10	52	2,58
11	53	2,63
12	54	2,68
13	55	2,73
14	56	2,78
15	57	2,83



Gambar 5. Energi WGM vs momentum sudut (*l*)

Nilai faktor-*Q* dari F8tpy sebagai fungsi diameter (*d*) mikrosphere F8tpy ditunjukkan pada Gambar 6. Semakin besar nilai *d* mikrosphere, semakin besar nilai faktor-*Q*. Hasil ini sesuai dengan Pers.(5), yaitu faktor-*Q* sebanding lurus dengan nilai *d* mikrosphere. Ada beberapa hasil penelitian yang telah dipublikasikan bahwa nilai faktor-*Q* sebanding eksponensial dengan nilai *d*. Perbedaan sedikit hasil penelitian ini dengan penelitian orang lain disebabkan oleh tingkat kehalusan permukaan mikroresonator yang diperoleh. Semakin halus permukaan sebuah mikroresonator, semakin tinggi pengurangan cahaya dalam mikroresonator sehingga nilai faktor-*Q*nya semakin besar. Berdasarkan Gambar 3 dan

menggunakan Pers.(2), nilai factor-*Q* pada panjang gelombang 502 nm dengan nilai momentum sudut 50 adalah 264,2. Dengan menggunakan Pers.(9) dan nilai finnesnya adalah 5,28.



Gambar 6. Faktor-*Q* vs *d*

### KESIMPULAN

Sebagai kesimpulan, energi WGM, faktor-*Q*, dan finesse sebagai respon optik dari mikrosphere F8tpy telah dikaji. Juga telah diinvestigasi nilai waktu hidup photon dalam mikrosphere F8tpy. Dalam penelitian ini, energi WGM rata-rata dan faktor-*Q* masing-masing adalah 2,48 eV dan 264.2. Energi WGM sebanding lurus dengan nilai momentum sudut. Semakin besar diameter suatu mikroresonator, semakin tinggi Faktor-*Q*. Hasil-hasil penelitian ini menunjukkan bahwa mikrosphere F8tpy dapat diintegrasikan sebagai materialaktif dalam mikrodivais optik

### References

- 1 He L, Ozdemir SK, Yang L. 2013. Whispering gallery microcavity lasers. *Laser Photonic Rev.* **82**(1): 60.
- 2 François A, Riesen N, Ji H, V SA, Monro TM. 2015. Polymer based whispering gallery mode laser for biosensing applications Polymer based whispering gallery mode laser for biosensing applications. *Appl. Phys. Lett.* **X**. **106**(031104): 1.
- 3 Ngara ZS. Study on Whispering Gallery Mode Lasers of Self-Assembled Microspheres of Polymer-Lanthanide Metal Hybrids, Disertasi, University of Tsukuba, Japan.
- 4 Chiasera A, Dumeige Y, Patrice F, Ferrari M, Jestin Y, Conti GN, Pelli S, Soria S, Righini GC. 2010. Spherical whispering-gallery-mode

- microresonators. *Laser Phot. Rev.* **4**(3): 457.
- 5 Tabata K, Braam D, Kushida S, Tong L, Kuwabara J, Kanbara T, Beckel A, Lorke A, Yamamoto Y. 2014. Self-assembled conjugated polymer spheres as fluorescent microresonators. *Sci. Rep.* **4**: 3.
- 6 Bando K, Fujii H, Mizuno K, Narushima K, Miyazaki A, Sasaki F, Hotta S, Yanagi H. 2018. Self-Assembled Organic Crystalline Microring Cavities with High Q-Factors. *ChemNanoMat.* **4**(9): 936.
- 7 T. Aoki, B. Dayan, E. Wilcut, W. P. Bowen, A. S. Parkins, T. J. Kippenberg, K. J. Vahala and HJK. 2006. Observation of strong coupling between one atom and a monolithic microresonator. *Nature.* **443**: 671.
- 8 Ta VD, Caixeiro S, Fernandes FM, Sapienza R. 2017. Microsphere Solid-State Biolasers. *Adv. Opt. Mater.* **5**: 1.
- 9 Ta VD, Chen R, Sun HD. 2012. Self-assembled flexible microlasers. *Adv. Mater.* **24**(10): OP60.
- 10 Gao M, Wei C, Lin X, Liu Y, Hu F, Zhao YS. 2017. Controlled assembly of organic whispering-gallery-mode microlasers as highly sensitive chemical vapor sensors. *Chem. Commun.* **53**(21): 3102.
- 11 Fernandez-bravo A et al. 2018. Continuous-wave upconverting nanoparticle microlasers. *Nat. Nanotechnol.* **13**: 572.
- 12 François A, Riesen N, Gardner K, Monro TM, Meldrum A. 2016. Lasing of whispering gallery modes in optofluidic microcapillaries. *Opt. Express.* **24**(12): 12466.
- 13 Strelakov D V, Marquardt C, Matsko AB. 2016. Nonlinear and quantum optics with whispering gallery resonators. *J. Opt.* **18**: 123002.
- 14 Ciftci S, Mikosch A, Haehnle B, Witczak Ł, Kuehne AJC. 2016. Silica core / conjugated polymer shell particles via seeded Knoevenagel dispersion polymerization – laser action in whispering gallery mode resonators †. *Chem. Commun.* **52**: 14222.
- 15 Ngara ZS, Okada D, Oki O, Yamamoto Y. 2019. Energy Transfer-Assisted Whispering Gallery Mode Lasing in Conjugated Polymer/Europium Hybrid Microsphere Resonators. *Chem. - An Asian J.* **14**(10): 1637.
- 16 Ngara ZS, Yamamoto Y. 2019. Modulation of Whispering Gallery Modes from Fluorescent Copolymer Microsphere Resonators by protonation/Deprotonation. *Chem. Lett.* **48**: 607.
- 17 Venkatakrishna D, Chandrasekar R. 2016. Engineering the Self - Assembly of DCM Dyes into Whispering - Gallery - Mode  $\mu$  - Hemispheres and Fabry - Pèrot - Type  $\mu$  - Rods for Visible – NIR ( 600 – 875 nm ) Range Optical Microcavities. *Adv. Opt. Mater.* **4**: 112.
- 18 Zhang C et al. 2015. Organic printed photonics: From microring lasers to integrated circuits. *Sci. Adv.* **8**(1:e1500257): 1.
- 19 Reynolds T, Riesen N, Meldrum A, Fan X, Hall JMM, Monro TM, François A. 2017. Fluorescent and lasing whispering gallery mode microresonators for sensing applications. *Laser Photonics Rev.* **11**(2): 1.
- 20 Yu J, Cui Y, Xu H, Yang Y, Wang Z, Chen B, Qian G. 2013. Confinement of pyridinium hemicyanine dye within an anionic metal-organic framework for two-photon-pumped lasing. *Nat. Commun.* **4**(May): 1.
- 21 Zhang C, Zou C, Yan Y, Wei C, Cui J, Sun F, Yao J, Zhao YS. 2013. Self - Assembled Organic Crystalline Microrings as Active Whispering - Gallery - Mode Optical Resonators. *Adv. Opt. Mater.* **1**: 357.
- 22 Duong Ta V, Chen R, Ma L, Jun Ying Y, Dong Sun H. 2013. Whispering gallery mode microlasers and refractive index sensing based on single polymer fiber. *Laser Photonics Rev.* **7**(1): 133.
- 23 Mariani S. Three-wave mixing in semiconductor whispering gallery mode microcavities To cite this version: Three-wave mixing in semiconductor whispering gallery mode microcavities. Paris Diderot University.
- 24 Ostby, E. P., 2009, *Photonic Whispering-Gallery Resonators in New Environments*, Disertasi,