



E46216

# การรื้อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระหว่างการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์

นายบศกร ภิเชษฐ์นทร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ปีการศึกษา 2553  
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



๖๐๐๒๕๖๐๖๖

ห้องสมุดงานวิจัย สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ



E46216

การเร่งการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายด้วยการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์



นายยศสวัสดิ์ พิเชียรสุนทร

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2553

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



5 2 7 0 4 5 9 5 2 1

ACCELERATING MICROALGAL GROWTH  
WITH CO<sub>2</sub> TRANSFORMATION



Mr. Yossaran Pichiansoontorn

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Engineering Program in Chemical Engineering

Department of Chemical Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2010

Copyright of Chulalongkorn University

Thesis Title

ACCELERATING MICROALGAL GROWTH  
WITH CO<sub>2</sub> TRANSFORMATION

By

Mr. Yossaran Pichainsoontorn


Field of Study

Chemical Engineering

Thesis Advisor


Associate Professor Prasert Pavasant, Ph.D.

Accepted by the Faculty of Engineering, Chulalongkorn University in  
Partial Fulfillment of the Requirements for the Master’s Degree

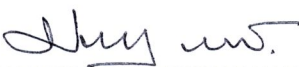


..... Dean of the Faculty of Engineering  
(Associate Professor Boonsom Lerdkhironwong, Dr.Ing.)


THESIS COMMITTEE




..... Chairman  
(Associate Professor Tharathon Mongkhonsi, Ph.D.)



..... Thesis Advisor  
(Associate Professor Prasert Pavasant, Ph.D.)



..... Examiner  
(Jirdsak Tscheikuna, Ph.D.)



..... External Examiner  
(Associate Professor Tawan Sooknoi, Ph.D.)

ยศสรล พิเชียรสุนทร: การเร่งการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายด้วยการเปลี่ยนรูปคาร์บอนไดออกไซด์.  
(ACCELERATING MICROALGAL GROWTH WITH CO<sub>2</sub> TRANSFORMATION) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:  
รศ.ดร. ประเสริฐ ภวสันต์, 99 หน้า.

**E46216**

การเพิ่มประสิทธิภาพในการดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำเพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนอินทรีย์สำหรับการเร่งการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายได้ถูกศึกษาโดยผลของค่าพีเอช, พื้นที่สัมผัสสำหรับแก๊สและของเหลว, ความสูง, อัตราการไหลของแก๊ส และความเค็มของน้ำทะเล ที่มีผลต่อความเข้มข้นของคาร์บอนอินทรีย์โดยรวมที่ละลายน้ำได้นำมาศึกษา การทดลองได้ถูกกระทำขึ้นที่หอป้อนอากาศและหอที่มีวัสดุแพคเกจที่มีความสูง 1-3 เมตร ค่าพีเอชของน้ำที่ทำการกำจัดแร่ธาตุออกได้ถูกปรับโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ และกรดไฮโดรคลอริก 0.5 โมลาร์ ค่า%ประสิทธิภาพในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ (ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ละลายน้ำ (กรัม) / ปริมาณคาร์บอนไดออกไซด์ที่ป้อนเข้าไป (กรัม)) ได้ถูกคำนวณขึ้น จากการทดลองพบว่า การเพิ่มค่าพีเอชสามารถทำให้เกิดการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำได้มากขึ้นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น การเพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างแก๊สและของเหลวและการกักแก๊สในน้ำทำให้การละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ดีขึ้นเล็กน้อย การเพิ่มความสูงสามเท่าของหอป้อนอากาศเท่าจาก 1 เมตรเป็น 3 เมตรให้%ประสิทธิภาพโดยรวมดีขึ้นแต่ไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับความสูง นอกเหนือจากนี้ ปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ในรูปแก๊สมีค่าลดลงตามระดับความสูงทำให้มีปริมาณของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลงที่ระดับความสูงที่เพิ่มขึ้น ที่อัตราการไหลของคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงขึ้น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีระยะเวลาในการสัมผัสกับสารละลายไม่เพียงพอและถูกปล่อยสู่บรรยากาศอย่างไม่ได้ใช้ประโยชน์ส่งผลให้เกิด%ประสิทธิภาพต่ำ ระบบ "Circulating Counterflow Contactor -C.C.C." ได้ถูกออกแบบให้มีการไหลของแก๊สและของเหลวไหลสวนทางกันเพื่อเพิ่มระยะเวลาในการสัมผัสและการผสมที่ดีขึ้น C.C.C. ให้%ประสิทธิภาพที่สูงอย่างคงที่ในช่วง 34-56% ในกรณีอัตราการไหลวนที่เหมาะสมที่สุดที่ 2 ลิตรต่อนาที ที่ระดับความเค็มของน้ำทะเลมากขึ้นพบว่าการละลายของคาร์บอนอินทรีย์โดยรวมลดลง นอกเหนือจากนี้ผลของไบคาร์บอเนตที่ผลต่อการเจริญเติบโตของจุลสาหร่ายได้ถูกศึกษาโดยปรับค่าพีเอชเริ่มต้นในช่วง 6-9 โซเดียมไบคาร์บอเนตที่ความเข้มข้น 30 พีพีเอ็มได้ถูกป้อนเข้าสู่ระบบการเลี้ยงโดยค่าพีเอชที่ 6 และ 7 แสดงให้เห็นถึงค่าพีเอชเริ่มต้นที่เหมาะสมที่สุดในการเลี้ยงโดยความเข้มข้นของเซลล์ที่มากที่สุดและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะแตกต่างกันเล็กน้อย การเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไบคาร์บอเนตจาก 30 พีพีเอ็มเป็น 80 และ 200 พีพีเอ็มไม่ได้ส่งผลต่อการเจริญเติบโตอย่างเห็นได้ชัด น้ำจากการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์จากระบบ C.C.C. ได้ถูกป้อนเข้าสู่ระบบการเลี้ยงจุลสาหร่าย *C. vulgaris* และผลแสดงให้เห็นชัดเจนว่าได้ความเข้มข้นเซลล์ที่สูงที่สุดและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะมากกว่าการใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตที่ละลายน้ำ

ภาควิชา วิศวกรรมเคมี  
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี  
ปีการศึกษา.....2553

ลายมือชื่อนิสิต .....  
ลายมือชื่ออ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....



# # 5270459521: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

**E46216**KEYWORDS: CARBON DIOXIDE / CO<sub>2</sub> / GAS DISSOLUTION / CAPTURE AND STORAGE / INORGANIC CARBON / BICARBONATE / CARBONATE / MICROALGAL CULTIVATION / CHLORELLA VULGARISYOSSARAN PICHIANSOONTORN: ACCELERATING MICROALGAL GROWTH WITH CO<sub>2</sub> TRANSFORMATION. THESIS ADVISOR: ASSOC. PROF. PRASERT PAVASANT, Ph.D., 99 pp.

The maximising carbon dioxide capture in the water as inorganic carbon source for accelerating microalgal growth was carried out where the effects of pH, gas-liquid contacting area, height, gas flowrate and salinity on dissolved Total Inorganic Carbon (TIC) concentration were observed. The experiments were conducted in 1-3 m high bubble column and packed column. The pH of the demineralised water was adjusted as required using NaOH 0.5 M and HCl 0.5 M. %Efficiency of CO<sub>2</sub> dissolution (Dissolved CO<sub>2</sub> (g)/ Input CO<sub>2</sub> (g)) was then computed. From the findings, an increase in pH could lead to a greater dissolution of CO<sub>2</sub> resulting in a greater effluent TIC concentration and high %CO<sub>2</sub> dissolution efficiency. Adding gas-liquid contact area and gas hold up ( $\epsilon_g$ ) caused a slightly greater dissolution of CO<sub>2</sub>. A triple increase in height from 1 m to 3 m in packed column gave the better overall %efficiency but not in a direct proportional to the height. Furthermore, the gas phase CO<sub>2</sub> decreased along the axial position resulting in a lesser quantity of CO<sub>2</sub> at higher position in the column. At high CO<sub>2</sub> flowrate, CO<sub>2</sub> did not have enough contact time with the solution and wastefully released to the atmosphere causing low %efficiency. The design of the –“Circulating Counterflow Contactor –C.C.C.” system was employed where the liquid and gas were counter-flowed to enhance the contact time and better mixing. The C.C.C. offered the steadily high %efficiency not only in early stage but also later stage in the range of 34-56% at the liquid flowrate of 2 LPM was employed. Higher degree of salinity was found to lower the dissolution of TIC in the solution. Additionally, the effect of bicarbonate on microalgal growth was examined by initially manipulating pH in range 6-9. NaHCO<sub>3</sub> at 30 ppm was fed into the cultivation system where pH 6 and 7 exhibited most suitable initial pH the in which maximum cell concentration and specific growth rate were slightly different. An increase in NaHCO<sub>3</sub> concentration from 30 to 80 and 200 ppm did not seem to have significant effect on the growth. CO<sub>2</sub> dissolution from C.C.C. system was also employed to cultivate *C. vulgaris* and obviously the results illustrated a higher growth where the maximum cell concentration and specific growth rate were higher than using dissolved NaHCO<sub>3</sub>.

Department: Chemical Engineering..

Academic Year: .....2010.....

Student's Signature.....Advisor's Signature.....

## ACKNOWLEDGEMENTS

I am deeply indebted to my thesis advisor, Associate Professor Dr. Prasert Pavasant, Department of Chemical Engineering, Chulalongkorn University. This thesis would not be accomplished without him and his excellent supervision. He always motivates me to actualize the goal I have set. I would like to say that thank you very much for everything given to support me and also a lot of chances provided to me. I wish I might study a Ph.D. with him after I fulfilled my dream as a field engineer and I would like to be an active researcher like him.

I would like to express my gratitude to my thesis chairman, Associate Professor Dr. Tharathon Mongkhonsi, thesis committee, Dr. Jirdsak Tscheikuna, Department of Chemical Engineering, Chulalongkorn University and external examiner Associate Professor Dr. Tawan Sooknoi, Department of Chemistry, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang for their worthy time on my thesis.

I would like to deeply thank Supersert's team (P'Tik for a lot of motivation and advice, P' Big for great support and reactor set-up, P' Max for his skillful techniques, P' Toey for her great tutorial in microalgal cultivation, P' Term for electronical devices, P' Note for inspiration, P' Mod Chattip for her support, P'Mod Mode, P' Aim, P' Dump and P' Aom for their useful advices. I'm grateful for your supports.

This work cannot be succeeded if it was without research grants from PTT and "Chula Cluster". I am deeply appreciated for very baht that I spent on my research.

I would like to sincerely thank the National Nanotechnology Center (NANOTEC) for permission of using TOC Analyser for Total Inorganic Carbon concentrations analyse. I would like to especially thank P' Porn for instrument training and her support. NANOTEC members: P' Toey, P' Beer, P' Job, and etc., I'm appreciated with your warm welcome.

I am appreciated of my friends' support: my OSK 123 friends (Keaw, Guard, F, Oak and Tu), my ChemTech friends (Elf, Fye, Tie, Ake, Poy, Pahn, Phai, Pla and Ed) and my ChemEn friends (Nhu, Bo, Preaw and Best).

I could not accomplish without the loves from my family. I would like to express my deep sense of appreciation to my parent and sister for their strong supports, encouragements and inspiration. Finally, I would like to thank Jane. You always stand by my side and give me wonderful times.

# CONTENTS

|   | Page       |
|---|------------|
| <b>ABSTRACT IN THAI</b> .....   | <b>iv</b>  |
| <b>ABSTRACT IN ENGLISH</b> .....  | <b>v</b>   |
| <b>ACKNOWLEDGEMENTS</b> .....   | <b>vi</b>  |
| <b>CONTENTS</b> .....   | <b>vii</b> |
| <b>LIST OF TABLES</b> .....   | <b>xi</b>  |
| <b>LIST OF FIGURES</b> .....  | <b>xii</b> |
| <br>  |            |
| <b>CHAPTER I Introduction</b> .....   | <b>1</b>   |
| 1.1 Motivation.....   | 1          |
| 1.2 Objectives.....   | 2          |
| 1.3 Scopes of research.....   | 2          |
| <br>  |            |
| <b>CHAPTER II Theoretical Background and Literature Review</b> .....                    | <b>3</b>   |
| 2.1 Global warming and CO <sub>2</sub> as greenhouse gas.....                           | 3          |
| 2.1.1 Global warming and greenhouse gases.....  | 3          |
| 2.2.2 CO <sub>2</sub> as greenhouse gas.....  | 3          |
| 2.2 CO <sub>2</sub> removal methods.....  | 4          |
| 2.2.1 CO <sub>2</sub> removal via absorption processes.....                             | 4          |
| 2.2.2 CO <sub>2</sub> removal via carbonation processes.....                            | 6          |
| 2.2.3 CO <sub>2</sub> removal via adsorption processes.....                             | 8          |
| 2.2.4 CO <sub>2</sub> removal via membrane contactors.....                              | 9          |
| 2.2.5 CO <sub>2</sub> removal via algal cultivation.....                                | 11         |
| 2.3 CO <sub>2</sub> Removal via algal cultivation (CO <sub>2</sub> Bio-mitigation)..... | 12         |
| 2.4 CO <sub>2</sub> and bicarbonate as inorganic carbon source for microalgal uptake... | 15         |
| 2.5 CO <sub>2</sub> solubility in the water.....  | 17         |



|   | <b>Page</b> |
|---|-------------|
| 2.6 Literature Review.....  | 21          |
| <b>CHAPTER III Materials and Methods.....</b>   | <b>26</b>   |
| 3.1 Experimental setup.....   | 27          |
| 3.1.1 Combined effect of system design for CO <sub>2</sub> dissolution.....                                 | 27          |
| 3.1.2 Effect of bicarbonate as inorganic carbon source for fresh water<br>microalgae.....                   | 30          |
| 3.2 Experimental Procedure.....   | 30          |
| 3.2.1 Maximising CO <sub>2</sub> dissolution in bubble column.....  | 30          |
| 3.2.1.1 Study of pH effect.....   | 32          |
| 3.2.1.2 Study of salinity effect.....   | 32          |
| 3.2.1.3 Study of gas-liquid contact area.....   | 33          |
| 3.2.1.4 Study of optimal gas flowrate effect.....   | 33          |
| 3.2.1.5 Study of height and gas-liquid contact area effect.....   | 34          |
| 3.2.1.6 Study of combined effect of optimal conditions.....   | 34          |
| 3.2.2 Effect of bicarbonate on microalgal growth.....   | 35          |
| 3.2.2.1 Cultivation of <i>Chlorella vulgaris</i> without NaHCO <sub>3</sub> added<br>and pH adjustment..... | 36          |
| 3.2.2.2 Effect of bicarbonate and pH on microalgal growth.....  | 36          |
| 3.2.2.3 Effect of 200 ppm of NaHCO <sub>3</sub> on microalgal growth.....                                   | 37          |
| 3.2.2.4 Effect of CO <sub>2</sub> dissolution water from optimal combined<br>effect bubble column.....      | 37          |
| 3.3 Analyses.....   | 38          |
| 3.3.1 Determination of Total Inorganic Carbon.....  | 38          |
| 3.3.2 Determination of %CO <sub>2</sub> dissolution efficiency.....   | 39          |
| 3.3.3 Determination of cell concentration.....  | 40          |
| 3.3.4 Determination of specific growth rate.....  | 41          |

|   | <b>Page</b> |
|---|-------------|
| <b>CHAPTER IV Results and Discussion.....</b>   | <b>42</b>   |
| 4.1 Maximising CO <sub>2</sub> dissolution in bubble column.....  | 42          |
| 4.1.1 Effect of pH on total inorganic carbon dissolved in the water.....  | 42          |
| 4.1.2 Effect of gas-liquid contacting area on total inorganic carbon<br>dissolved in the water.....   | 45          |
| 4.1.3 Effect of gas-liquid contacting area on total inorganic carbon at<br>pH 10 in 3 m high packed column.....   | 51          |
| 4.1.4 Effect of gas flowrate on CO <sub>2</sub> dissolution from 10-40 cc/min fed<br>into the 1 and 2m high bubble column.....  | 53          |
| 4.1.5 Effect of salinity on CO <sub>2</sub> dissolution.....  | 59          |
| 4.1.6 CO <sub>2</sub> dissolution using Circulating Counterflow Contactor<br>(C.C.C.).....  | 61          |
| 4.2 Accelerating microalgal growth with bicarbonate as inorganic carbon<br>source.....  | 63          |
| 4.2.1 Cultivation of <i>C. vulgaris</i> with NaHCO <sub>3</sub> at various pH range.....  | 63          |
| 4.2.2 Cultivation of <i>C. vulgaris</i> with high concentration of NaHCO <sub>3</sub><br>and CO <sub>2</sub> dissolved water from C.C.C. as inorganic carbon at pH 7..... | 65          |
| <b>CHAPTER V Conclusion.....</b>  | <b>68</b>   |
| 5.1 Conclusions.....  | 68          |
| 5.2 Contributions.....  | 69          |
| 5.3 Recommendations / Future works.....   | 70          |
| <b>REFERENCES.....</b>  | <b>71</b>   |
| <b>APPENDICES.....</b>  | <b>78</b>   |
| APPENDIX A : TOTAL INORGANIC CARBON ANALYSE<br>EXPERIMENTAL DATA.....   | 79          |



|  | Page      |
|--|-----------|
| APPENDIX B : CULTIVATION OF C. VULGARIS WITH<br>BICARBONATE EXPERIMENTAL DATA..... | 90        |
| APPENDIX C : SAMPLE CALCULATIONS.....  | 95        |
| APPENDIX D : PUBLICATIONS.....   | 98        |
| <b>BIOGRAPHY.....</b>  | <b>99</b> |

LIST OF TABLES

|                  |   | Page |
|------------------|---|------|
| Table 2.6.1      | Summary of CO <sub>2</sub> removal rate via amine processes.....  | 22   |
| Table 2.6.2      | Summary of CO <sub>2</sub> removal rate via algal cultivation.....  | 25   |
| Table 4.1.1      | %Efficiency of CO <sub>2</sub> dissolution at various pH levels.....  | 45   |
| Table 4.1.2      | %Efficiency of CO <sub>2</sub> dissolution in packed column at various pH levels<br>and positions.....  | 50   |
| Table 4.1.3      | %Efficiency of CO <sub>2</sub> dissolution in packed column at pH 10 and every<br>1 meter position.....   | 53   |
| Table 4.1.4.1    | %Efficiency of CO <sub>2</sub> dissolution in 1 m high column.....  | 55   |
| Table 4.1.4.2(a) | %Efficiency of CO <sub>2</sub> dissolution in 2 m high column: samples<br>collected at 1 m position.....  | 58   |
| Table 4.1.4.2(b) | %Efficiency of CO <sub>2</sub> dissolution in 2 m high column: samples<br>collected at 2 m position.....  | 58   |
| Table 4.1.5      | %Efficiency of CO <sub>2</sub> dissolution at various salinity levels from 0-30<br>ppt.....   | 60   |
| Table 4.1.6      | %Efficiency of CO <sub>2</sub> dissolution using recycle flow of 1-3 LPM.....   | 62   |
| Table 4.2.1      | Maximum cell concentration and specific growth rate (μ) of<br><i>Chlrollera vulgaris</i> cultivation with 30 ppm NaHCO <sub>3</sub> as inorganic<br>carbon source at various initial pH conditions.....     | 64   |
| Table 4.2.2      | Maximum cell concentration and specific growth rate (μ) of<br><i>Chlrollera vulgaris</i> cultivation with various amount of NaHCO <sub>3</sub> as<br>inorganic carbon source at initial pH 7 condition..... | 67   |



## LIST OF FIGURES

|   | <b>Page</b> |
|---|-------------|
| Figure 2.1      Process flow diagram for CO <sub>2</sub> recovery from the flue gas by chemical absorption .....  | 6           |
| Figure 2.2      Process flow diagram for CO <sub>2</sub> recovery from the flue gas by Benfield process or carbonation process.....   | 8           |
| Figure 2.3.1 <i>Chlorella sp.</i> open system cultivation ponds.....  | 13          |
| Figure 2.3.2 <i>Physcomitrella patens</i> photobioreactor for biopharmaceutical.....  | 14          |
| Figure 2.5.1      The relationship between solubility of CO <sub>2</sub> in the water (in g·10 <sup>-2</sup> ml <sup>-1</sup> ) at various temperature (°C) at 1 atm pressure ..... | 19          |
| Figure 2.5.2      The various fraction of carbonate species in pH range from 4 to 13.....   | 20          |
| Figure 3.1      Experimental diagram: Maximising CO <sub>2</sub> dissolution in bubble column....   | 26          |
| Figure 3.2      Experimental diagram: Study of bicarbonate as inorganic carbon source for fresh water microalgae cultivation.....   | 27          |
| Figure 3.3      Experimental setup for CO <sub>2</sub> fed bubble column.....   | 28          |
| Figure 3.4      One cm diameter packing material.....   | 29          |
| Figure 3.5      Experimental setup for Circulating Counterflow Contactor.....   | 30          |
| Figure 3.6      Experimental setup for cultivation of <i>Chlorella vulgaris</i> in sharing light source bubble columns.....   | 31          |
| Figure 4.1.1      Total Inorganic Carbon time profile at various pH levels.....   | 44          |
| Figure 4.1.2.1      Total Inorganic Carbon time profile at various pH levels in bubble column with packing material (a) at top of the column (b) at middle of the column.....       | 49          |
| Figure 4.1.2.2      Total Inorganic Carbon time profile at pH 10 level in different colum....   | 50          |
| Figure 4.1.3      Total Inorganic Carbon time profile: samples collected various axial positions in the 3 meter high bubble column.....   | 52          |
| Figure 4.1.4.1      Total Inorganic Carbon at different time in 1 m bubble column: Effect of gas flowrate from 10-40 cc·min <sup>-1</sup> .....                                     | 54          |

|                |   |    |
|----------------|---|----|
| Figure 4.1.4.2 | Total Inorganic Carbon at different time: effect of gas flowrate from 10-40 cc·min <sup>-1</sup> on Total Inorganic Carbon concentration and samples collected (a) at 1m height (b) at 2m height.....             | 57 |
| Figure 4.1.5   | Total Inorganic Carbon time profile and salinity levels from 0-30 ppt.....  | 60 |
| Figure 4.1.6   | Total Inorganic Carbon at different time at various recirculating flows in the gas-liquid contacting bubble column, using recycle flow in a range of 1-3 LPM (Litres per minute).....                             | 62 |
| Figure 4.2.1   | Growth curve of <i>Chlorella vulgaris</i> cultivation with 30 ppm NaHCO <sub>3</sub> as inorganic carbon at various pH ranges from 6-9.....   | 64 |
| Figure 4.2.2   | Growth curve of <i>C. vulgaris</i> cultivated with various 0, 30, 80 and 200 ppm NaHCO <sub>3</sub> and water from CO <sub>2</sub> dissolved water from C.C.C. as inorganic carbon at initial pH 7 condition..... | 66 |