

## INDICE TABELLE

| <b>1.</b>            | <b>STATO DELL'ARTE</b>   | <b>Pag</b> |
|----------------------|--|------------|
| <i>Tabella 1.1</i>   | <i>Rese indicative in biogas sui solidi volatili di diverse tipologie di biomasse e rifiuti organici (CRPA, 2008).</i>                                     | 8          |
| <i>Tabella 1.2</i>   | <i>Principali composti inibenti</i>  | 12         |
| <i>Tabella 1.3</i>   | <i>Vantaggi e svantaggi dei processi ad umido (APAT, 2005)</i>   | 14         |
| <i>Tabella 1.4</i>   | <i>Intervalli tipici per i valori dei parametri di processo e le rese dei processi ad umido (APAT, 2005).</i>  | 15         |
| <i>Tabella 1.5</i>   | <i>Vantaggi e svantaggi del processo a semi-secco (CITEC, 2000).</i>   | 15         |
| <i>Tabella 1.6</i>   | <i>Intervalli tipici dei parametri operativi e delle rese del processo a semi-secco (APAT, 2005).</i>  | 15         |
| <i>Tabella 1.7</i>   | <i>Vantaggi e svantaggi dei processi a secco (APAT, 2005).</i>   | 16         |
| <i>Tabella 1.8</i>   | <i>Intervalli tipici dei parametri operativi e delle rese del processo a secco (APAT, 2005).</i>   | 16         |
| <i>Tabella 1.9</i>   | <i>Età degli impianti di biogas che operano con liquami zootecnici, scarti agro-industriali e colture Energetiche</i>                                      | 28         |
| <i>Tabella 1.10</i>  | <i>Risultati del censimento fatto dal CRPA nel 2007</i>  | 30         |
| <i>Tabella 1.11</i>  | <i>Contaminanti e loro limiti di tolleranza per le MCFC</i>  | 31         |
| <i>Tabella 1.12</i>  | <i>Impianti FCE alimentati a biogas</i>  | 33         |
| <i>Tabella 1.13</i>  | <i>Impianti MTU alimentati a biogas</i>  | 34         |
| <i>Tabella 1.14</i>  | <i>Progetti dimostrativi di Ansaldo Fuel Cells alimentati a biogas</i>   | 34         |
| <b>2.</b>            | <b>IDROGENO E CELLE A COMBUSTIBILE: STATO ATTUALE DELLE CONOSCENZE</b>   |            |
| <i>Tabella 2.1:</i>  | <i>Costi di produzione dell' idrogeno (Watkiss, 2002).</i>   | 42         |
| <i>Tabella 2.2</i>   | <i>Potenzi di produzione di idrogeno da rinnovabili per fonte o tecnologia. (CIRPS: Centro Interuniversitario di ricerca per lo Sviluppo Sostenibile).</i> | 49         |
| <i>Tabella. 2.3.</i> | <i>Evoluzione dei componenti di cella per una MCFC. (ENEA,02).</i>   | 71         |
| <b>3.</b>            | <b>PARAMETRI FONDAMENTALI PER IL DIMENSIONAMENTO ED IL MONITORAGGIO DEI PROCESSI DI DIGESTIONE ANAEROBICA</b>  |            |
| <i>Tabella 3.1</i>   | <i>Set di risultati della caratterizzazione chimica e biologica (Adani F. et al., 2007).</i>   | 83         |
| <i>Tabella 3.2</i>   | <i>Confronto tra le prestazioni dei processi di digestione al varia del tipo di pretrattamento (Park C. et al., 2005).</i>                                 | 87         |
| <i>Tabella 3.3</i>   | <i>Contenuto in Fe, Co, Ni, Cu e Zn nei batteri metanogeni (Y. Zhang et al., 2003).</i>  | 101        |
| <i>Tabella 3.4</i>   | <i>Valori inibenti di ammoniaca</i>  | 106        |
| <i>Tabella 3.5</i>   | <i>Energia Libera di Gibbs in condizioni standard (Q. Wang et al., 1999).</i>  | 122        |

#### 4. MATERIALI E METODI

|             |                                       |     |
|-------------|---------------------------------------|-----|
| Tabella 4.1 | Metodiche analitiche utilizzate ..... | 128 |
|-------------|---------------------------------------|-----|

#### 5 STUDIO DELLA DIGESTIONE ANAEROBICA CONVENZIONALE DA LIQUAMI SUINICOLI IN REATTORI TIPO BATCH

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Tabella 5.1  | Caratterizzazione dell'inoculo e del substrato.....  | 137 |
| Tabella 5.2  | Schema delle prove.....  | 138 |
| Tabella 5.3  | Schema delle prove per la riduzione di idrogeno solforato.....   | 138 |
| Tabella 5.4  | Volume di biogas prodotto e durata del processo di digestione per le prove A35-7, A55-7, A75-7e A55-6.....   | 139 |
| Tabella 5.5  | Volume di biogas prodotto e durata del processo di digestione per le prove B 35-6, B 55-6 B 55-7, B55/65-7, B <sub>1</sub> 65-7 e B <sub>2</sub> 65-7..... | 141 |
| Tabella 5.6  | Valori del rapporto VFA/Alk delle prove dell'esperimento 1.....  | 149 |
| Tabella 5.7  | Valori del rapporto VFA/Alk delle prove dell'esperimento 2.....  | 149 |
| Tabella 5.8  | Valori dei nutrienti nell'ingestato.....   | 150 |
| Tabella 5.9  | Valori dei nutrienti nel digestato.....  | 150 |
| Tabella 5.10 | Rese energetiche .....   | 164 |
| Tabella 5.11 | Caratterizzazione del primo set di prove.....  | 167 |
| Tabella 5.12 | Caratterizzazione del secondo set di prove.....  | 168 |
| Tabella 5.13 | Caratterizzazione del terzo set di prove .....   | 174 |
| Tabella 5.14 | Caratterizzazione del quarto set di prove.....   | 180 |
| Tabella 5.15 | Caratterizzazione del quinto set di prove.....   | 185 |
| Tabella 5.16 | Caratterizzazione del sesto set di prove.....  | 191 |
| Tabella 5.17 | Risultati delle prove sui pretrattamenti dell'inoculo.....   | 193 |
| Tabella 5.18 | Schema delle prove per la riduzione del contenuto di H <sub>2</sub> S durante la produzione di idrogeno da digestione anaerobica di refluo suinicolo ..... | 200 |

#### 6. STUDIO DELLA CODIGESTIONE IN DOPPIO STADIO DI LIQUAMI SUINICOLI E FORSU IN REATTORI TIPO BATCH

|             |  |     |
|-------------|--|-----|
| Tabella 6.1 | Caratterizzazione degli inoculi e della FORSU..... | 204 |
| Tabella 6.2 | Schema delle prove sugli inoculi.....              | 204 |
| Tabella 6.3 | Caratterizzazione degli inoculi e della FORSU..... | 209 |
| Tabella 6.4 | Schema delle prove.....                            | 209 |
| Tabella 6.5 | Schema riassuntivo dei risultati .....             | 212 |
| Tabella 6.6 | Schema delle prove.....                            | 213 |

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Tabella 6.7  | Schema riassuntivo dei risultati: produzioni cumulate, specifiche, composizione media e durata della produzione..... | 215 |
| Tabella 6.8  | Riduzione del contenuto in solidi della FORSU mediante pretrattamento meccanico.....                                 | 215 |
| Tabella 6.9  | Caratterizzazione delle matrici e dell'inoculo.....  | 216 |
| Tabella 6.10 | Schema riassuntivo delle prove.....  | 216 |
| Tabella 6.11 | Parametri caratteristici del processo: COD, Alk <sub>0</sub> , COD <sub>0</sub> /ALK <sub>0</sub> .....              | 222 |
| Tabella 6.12 | Parametri caratteristici del processo: TKN, NNH <sub>3</sub> , SVs, SVi.....   | 223 |
| Tabella 6.13 | Parametri caratteristici dell'equazione di Gompertz.....   | 228 |
| Tabella 6.14 | Miscele utilizzate nel secondo step.....   | 230 |
| Tabella 6.15 | Condizioni iniziali del secondo step.....  | 232 |

## **7. STUDIO DELLA DIGESTIONE ANAEROBICA CONVENZIONALE DI LIQUAMI SUINICOLI IN REATTORI ALIMENTATI IN SEMICONTINUO**

|              |  |     |
|--------------|--|-----|
| Tabella 7.1  | Composizione in solidi totali (ST) e in solidi volatili (SV) del substrato utilizzato.....   | 244 |
| Tabella 7.2  | Composizione in solidi totali (ST) e in solidi volatili (SV) dell'inoculo utilizzato.....  | 244 |
| Tabella 7.3  | Schema delle prove.....  | 245 |
| Tabella 7.4  | Valori medi del rapporto VFA/AlK di ogni set di prova, distinti per le condizioni operative considerate.....   | 248 |
| Tabella 7.5  | Valori del volume, del tempo di ritenzione idraulica, della concentrazione del substrato e del carico organico utilizzati nella sperimentazione.....                       | 252 |
| Tabella 7.6  | Valori medi della produzione specifica di metano per unità di volume alimentato (Nml CH <sub>4</sub> / ml miscela alimentata). .....                                       | 257 |
| Tabella 7.7  | Tabella riassuntiva dei valori medi di produzione specifica di metano per unità di massa di sostanza organica alimentata (Nml CH <sub>4</sub> /g SV).....                  | 260 |
| Tabella 7.8  | Confronto tra i valori della produzione specifica di biogas per kg di sostanza organica alimentata (Nm <sup>3</sup> biogas/kgSV) sperimentali e quelli di letteratura..... | 261 |
| Tabella 7.9  | Valori del contenuto medio di H <sub>2</sub> S nel biogas prima e dopo l'aggiunta del cloruro ferroso.....   | 265 |
| Tabella 7.10 | Caratteristiche dell'azienda suinicola Benini&Baldassari.....  | 266 |
| Tabella 7.11 | Volume del digestore stimato in corrispondenza di ogni set di prove.....   | 267 |
| Tabella 7.12 | Dati utilizzati per il calcolo della portata di biogas prodotto, in corrispondenza di ciascun set di prove, per tutte le condizioni di temperatura considerate.....        | 267 |
| Tabella 7.13 | Valori della portata di biogas prodotto, calcolati in corrispondenza di ciascun set di prove, per tutte le condizioni di temperatura considerate.....                      | 268 |
| Tabella 7.14 | Produzioni di biogas migliori.....   | 269 |
| Tabella 7.15 | Energia prodotta in corrispondenza di ciascun caso considerato.....  | 270 |

## **8 STUDIO DELLA CODIGESTIONE ANAEROBICA IN DOPPIO STADIO DI LIQUAMI SUINICOLI E FORSU IN REATTORI ALIMENTATI IN SEMICONTINUO**

|                     |   |     |
|---------------------|---|-----|
| <i>Tabella 8.1</i>  | <i>Caratterizzazione delle biomasse utilizzate</i>  | 272 |
| <i>Tabella 8.2</i>  | <i>Carichi organici applicati ai reattori acidogeni</i>   | 273 |
| <i>Tabella 8.3</i>  | <i>Schema riassuntivo dei risultati del primo stadio</i>  | 278 |
| <i>Tabella 8.4</i>  | <i>Carichi organici applicati ai reattori metanogeni</i>  | 278 |
| <i>Tabella 8.5</i>  | <i>Schema riassuntivo dei risultati del secondo stadio</i>  | 283 |
| <i>Tabella 8.6</i>  | <i>Caratterizzazione dei substrati alimentati nel processo a singolo e doppio stadio</i>                            | 284 |
| <i>Tabella 8.7</i>  | <i>Rese e composizione del biogas (dati sperimentali)</i>   | 284 |
| <i>Tabella 8.8</i>  | <i>Composizione delle miscele di alimentazione e caratteristiche dei digestori</i>                                  | 285 |
| <i>Tabella 8.9</i>  | <i>Portate dei gas in uscita dai digestori.</i>   | 285 |
| <i>Tabella 8.10</i> | <i>Risultati del bilancio energetico nel caso di installazione di una cella a combustibile a carbonati fusi</i>     | 285 |
| <i>Tabella 8.11</i> | <i>Risultati del bilancio energetico nel caso di installazione di un motore endotermico in assetto cogenerativo</i> | 286 |

## **Appendice A: RIFERIMENTI NORMATIVI**

|                    |   |     |
|--------------------|---|-----|
| <i>Tabella A.1</i> | <i>Allegato 1C L 748/84 (modificato dal DM 27/3/1998)</i> | 300 |
|--------------------|---|-----|